

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 2 (15)
Июнь 2017

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ВЫРЫХАНОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ

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
Д.А. ВЫРЫХАНОВ	к.т.н., 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, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, 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, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 2 (15)
June 2017

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Editor-in-Chief:

Assistant to the Editor-in-Chief:

Chief Executive Officer

ARKHANGELSKIY YURI SERGEEVICH

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

VIRIKHANOV DENIS ALEKSANDROVICH

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKIY

N.V. BEKRENEV

D.A. VIRIKHANOV

Yu.V. GULYAEV

V.B. DEMIDOVICH

L.S. ZIMIN

S.G. KALGANOVA

V.A. KOLOMEITSEV

V.N. LYASNIKOV

A.N. MAKAROV

G.A. MOROZOV

Yu. P. PERELIGIN

A.F. REZCHIKOV

I.V. RODIONOV

V.P. RUBTSOV

F.N. SARAPULOV

Yu. B. TOMASHEVSKY

G.G. UGAROV

V.N. KHMELEV

V.A. TSAREV

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

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

PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dr.Sc., Professor, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Горева Л.П.** Метод расчета активного и индуктивного сопротивлений трубок электрододержателя руднотермической печи ... 5
- Яфаров Р.К., Суздальцев С.Ю., Шаныгин В.Я.** Влияние ионного легирования на автоэмиссионные свойства алмазографитовых пленочных структур 11
- Дмитриев А.А., Суздальцев С.Ю., Нефедов Д.В.** Получение нанотрубок методом PECVD для автоэлектронной эмиссии 21
- Юдина В.О., Архангельский Ю.С.** Барабанные СВЧ электротермические установки 25
- Сивяков Д.Б.** Камера с бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо... 29
- Калганова С.Г., Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В., Захаров В.В.** Численное моделирование электротехнологических процессов с применением программного пакета COMSOL Multiphysics..... 34
- Докучаев В.С., Кожевников В.Ю.** Электротехнология интенсификации процесса получения пеностекла СВЧ энергией 43
- Анашкин А.А., Угаров Г.Г.** Концепция энергосбережения в области электрохимической защиты подземных металлических трубопроводов 50

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Артюхов И.И., Гордеев Е.С., Земцов А.И.** Особенности построения регулируемого источника для централизованного питания анодных цепей группы пакетированных магнетронов 57
- Голембиовский Ю.М., Костерев А.А.** Оперативно перестраиваемые преобразовательные сети на базе инверторов напряжения 61
- Вахнина В.В., Самолина О.В.** Механизм возникновения и протекания геоиндуцированных токов в системах электроснабжения..... 72

ЭЛЕКТРОНИКА

- Федоров А.В., Архангельский Ю.С.** Применение сверхвысокочастотных электронных приборов в установках диэлектрического нагрева 80

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Демидович В.Б., Ситько П.А., Андрушкевич В.В., Перевалов Ю.Ю.** Система управления температурой заготовок в модульных кузнечных индукционных нагревателях 87
- Кувалдин А.Б., Федин М.А., Генералов И.М., Кулешов А.О.** Разработка и исследование системы управления перестраиваемым тиристорным преобразователем частоты для индукционного нагрева при сильно изменяющейся нагрузке..... 93

ИЗМЕРЕНИЯ

- Архангельский Ю.С., Калганова С.Г., Тригорлый С.В.** Измерение диэлектрических параметров диэлектриков в диапазоне СВЧ при высокой температуре ... 102

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

- Раецкая О.В.** Междисциплинарная интеграция дисциплин «Информатика» и «Электротехника» в военном образовательном учреждении..... 109

ЛЕТОПИСЬ

- Состояние и перспективы научной работы в СГТУ имени Гагарина Ю.А.
Интервью с И.Г. Остроумовым..... 114
- Демидович В.Б.** К столетию со дня рождения Владислава Валентиновича Вологодина 117
- Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В.** Двадцатипятилетие подготовки электротехнологов в г. Саратове 119
- К сведению авторов 123

CONTENTS

ELECTROTHERMY

Aliferov A.I., Bikeev R.A., Goreva L.P. A method for calculating pure resistance and inductance of electrode holder tubes in orethermal furnaces.....	5
Yafarov R.K., Suzdaltsev S.Yu., Shanygin V.Ya. Effect of ion implantation doping on field-emission properties of diamond and related carbon films	11
Dmitriev A.A., Suzdaltsev S.Yu., Nefedov D.V. Using the PECVD method to synthesize nanocarbon materials for autoelectronic emission	21
Yudina V.O., Arkhangelskiy Yu.S. Drum microwave electrothermal units	25
Sivvyakov D.B. A folded waveguide traveling wave tube	29
Kalganova S.G., Arkhangelskiy Yu.S., Trigorly S.V., Zakharov V.V. Numerical modeling of electrotechnological processes using the COMSOL Multiphysics software package.....	34
Dokuchaev V.S., Kozhevnikov V.Yu. Electrotechnology for intensification of foam glass fabrication using the microwave energy.....	43
Anashkin A.A., Ugarov G.G. The concept of energy conservation in the field of electrochemical protection of underground metal pipelines	50

ELECTRIC POWER SUPPLY

Artyukhov I.I., Gordeev E.S., Zemtsov A.I. Specific design characteristics of controlled source to the centralized power supply of anodic circuits in packaged magnetrons	57
Golembiovskiy Yu.M., Kosterev A.A. Reconfigurable converters based on voltage inverters.....	61
Vakhnina V.V., Samolina O.V. Sources and flow patterns of geinduced currents in electrical supply systems.....	72

ELECTRONICS

Fedorov A.V., Arkhangelskiy Yu.S. Application of microwave electronic devices for Dielectric heating units.....	80
--	----

CONTROLLING SYSTEMS

Demidovich V.B., Syt'ko P.A., Andrushkevich V.V., Perevalov Yu.Yu. Heat control systems in modular forging induction heaters	87
Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Generalov I.M., Kuleshov A.O. Research and development of control systems to the thyristor frequency converter for induction heating under varying load conditions.....	93

MEASUREMENT

Arkhangelskiy Yu.S., Kalganova S.G., Trigorly S.V. Measuring dielectric properties of dielectrics in the microwave frequency range at high temperatures.....	102
---	-----

SOCIAL ASPECT

Raetskaya O.V. An interdisciplinary incorporation of the courses in informatics and electrical engineering at military schools.....	109
--	-----

CHRONICLE

Status and prospects of scientific work in the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. <i>Interview with I.G. Ostroumov</i>	114
Demidovich V.B. To the centenary of the birth of Vladislav V. Vologdin	117
Arkhangelskiy Yu.S., Trigorly S.V. Twenty-five years of training electrical engineers in Saratov	119
Information for Authors.....	123

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.365.61

МЕТОД РАСЧЁТА АКТИВНОГО И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРУБОК ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЯ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева

A METHOD FOR CALCULATING PURE RESISTANCE AND INDUCTANCE OF ELECTRODE HOLDER TUBES IN ORE-THERMAL FURNACES

A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, L.P. Goreva

Предложена методика расчета активного и индуктивного сопротивлений трубок электрододержателя руднотермической печи (РТП). Этот участок заслуживает особого внимания вследствие сложной пространственной конфигурации проводников, значительной доли его сопротивления в полном сопротивлении вторичного токоподвода, так как на этом участке по пучкам трубок протекают токи одной полуфазы и компенсация магнитного потока отсутствует.

Предлагается рассматривать изогнутые проводники как ломаные линии и применить методы, развитые до практического применения авторами и основанные на расчете собственной индуктивности и взаимной индуктивности двух прямолинейных проводников, произвольно расположенных в пространстве. При этом неравномерность распределения тока по отдельным трубкам учитывается итерационным расчетом.

При расчете активного сопротивления учитывается поверхностный эффект и эффект близости между участками проводников. Методика была использована для создания программного продукта для расчета электрических параметров вторичного токоподвода РТП. Апробация методики была проведена при проектировании РТП мощностью 60 МВА ЗАО «Электро-

The article is dedicated to a method for calculating the pure resistance and inductance of electrode holder tubes in ore-thermal furnaces. This section requires particular attention due to a sophisticated spatial configuration of the conductors, and significant proportion of its resistance within the total resistances of the secondary current leads. This results from the fact that in this section the tube clusters contain single phase currents, where compensation of the magnetic flux is not found.

The authors propose to consider the curved conductors as polygonal chains and apply the methodology developed for practical application based on the calculations of self-inductance and the mutual inductance of two arbitrarily situated rectilinear conductors. Irregularity of the current distribution across the tubes is taken into consideration in the process of iterative calculation.

The calculation of pure resistance takes into consideration the skin effect and the proximity effect between the sections of conductors. The given method was used to create the software needed in calculation of electric parameters of the secondary current lead of the ore-thermal furnace. This method was tested when designing the 60 MVA capacity ore-thermal furnace by ZAO Elektroterm (Russia, Novosibirsk). The results were verified for the numer-

терм» (Россия, Новосибирск). Полученные результаты были проверены на численных 3D моделях, разработанных в среде ANSYS.

Ключевые слова: *руднотермическая печь, вторичный токоподвод, трубы электрододержателя, активное и индуктивное сопротивление*

В последние десятилетия интенсивное развитие электросталеплавильного производства инициирует внимание к ферросплавному оборудованию. Поскольку производство ферросплавов энергоемко, актуальной является задача повышения энергоэффективности эксплуатации электропечного оборудования. Одним из путей решения такой задачи является проектирование вторичного токоподвода РТП с минимальным активным и индуктивным сопротивлениями.

Уменьшение активного сопротивления снижает электрические потери в токоподводе, зависящие от электрического режима. По короткой сети РТП протекают токи порядка 100 кА. При таком рабочем токе уменьшение активного сопротивления короткой сети на 1 мОм снижает мощность электрических потерь на 10 кВт.

Влияние индуктивного сопротивления на активную мощность в ванне печи определяется следующим. Если предположить, что трехфазный электропечной контур симметричен, полезная активная мощность печи, выделяемая в ее ванне, определяется по выражению

$$P_{пол} = 3 \cdot I \cdot \sqrt{U^2 - (I \cdot x)^2} - I^2 \cdot r, \text{ Вт},$$

где I – ток электрода, А; U – напряжение фазы, В; x и r – индуктивное и активное сопротивления короткой сети.

Анализ этой зависимости показывает, что уменьшение индуктивного сопротивления приводит к увеличению полезной мощности, выделяемой в рабочем пространстве печи.

Таким образом, одной из задач при проектировании является разработка вторичного токоподвода, обеспечивающего минимум электрических потерь в токоподводе, максимум коэффициента мощности, сим-

metrical 3D models developed with the ANSYS software.

Keywords: *ore-thermal furnace, secondary current lead, electrode holder tubes, pure resistance, inductance*

метрию мощностей фаз, обеспечивающую равномерность распределения мощности в ванне печи. При этом необходим инструмент для расчета электрических параметров участков короткой сети РТП для оценки различных конструктивных вариантов.

Особенности конструкции короткой сети руднотермической печи. На рис. 1 представлена конструкция вторичного токоподвода современной круглой руднотермической печи. Несмотря на значительную протяженность токоподвода в целом, за счет компенсации магнитного потока (бифилирование) удастся существенно уменьшить реактивное сопротивление короткой сети. Особенно это касается неподвижного шинопакета, методика расчета электрических параметров которого в настоящее время достаточно отработана [1-5].

Очень специфичным по конструкции, а значит и по способу определения активного и индуктивного сопротивлений, является жесткий подвижный участок трубок электрододержателя (поз. 4 рис. 1). Это обусловлено сложной трехмерной пространственной конфигурацией трубок, ведущих к охватывающим электрод контактным щекам. В зависимости от мощности РТП контактных щек может быть от 2 до 12. К каждой контактной щече подходит по 2 трубки, что обеспечивает замкнутый контур водоохлаждения. На рис. 1 изображен вариант конструкции РТП, в котором с разных сторон к электроду подводятся полуфазы двух разных фаз, при этом осуществляется преобразование схемы «треугольник» в «звезду». На рис. 2 отдельно показана конструкция подвижной части вторичного токоподвода установки, спроектированной ЗАО «Электротерм» (Россия, Новосибирск) [6]. Одним из элементов подвижной части токоподвода являются трубки электрододержателя.

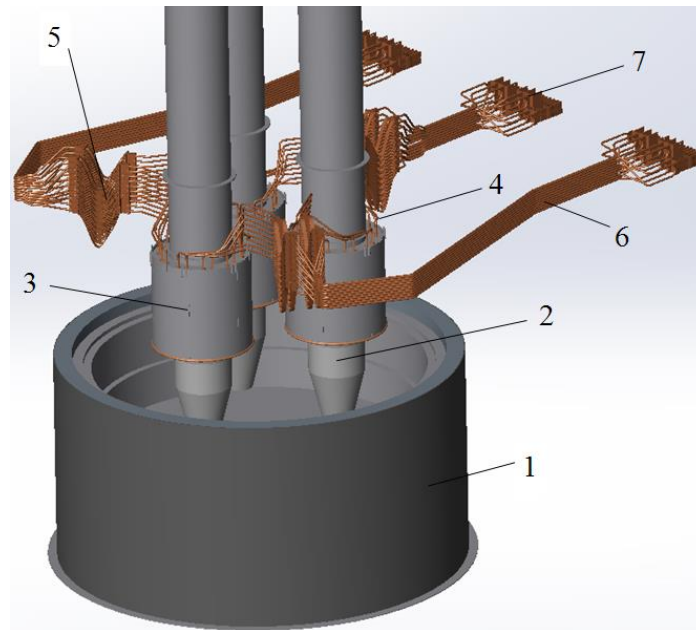


Рис. 1. Система ввода энергии в рабочее пространство РТП: 1 – ванна печи; 2 – электрод; 3 – механизм прижима контактных щек; 4 – трубки электрододержателя; 5 – кабельная гирлянда; 6 – шихтованный шинопакет; 7 – мост расшихтовки

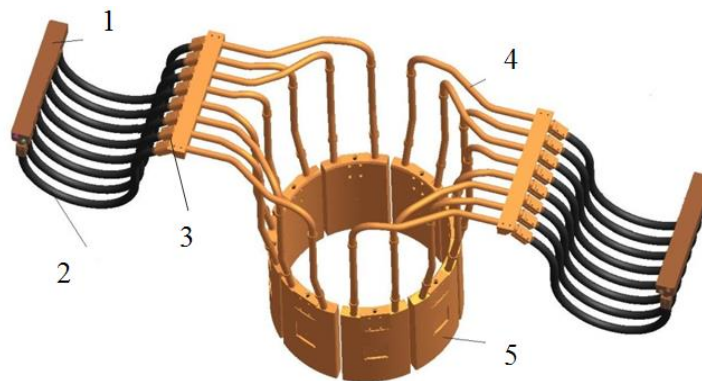


Рис. 2. Подвижная часть токоподвода РТП: 1 – неподвижная контактная плита; 2 – гибкий токоподвод; 3 – подвижная контактная плита; 4 – трубки электрододержателя; 5 – контактная щетка

Следует отметить, что на данном участке по пучку трубок протекает ток одной полуфазы, а значит, компенсация магнитного потока слабая. По данным работы [7] индуктивность данного участка составляет 20-40% индуктивности короткой сети в целом.

Для данного участка в [7] предлагается упрощенная методика, согласно которой индуктивность трубок электрододержателя может быть определена по формуле

$$X_{TЭ} = X_C + \Delta X \cdot K_C + X_M + X_H, \quad (1)$$

где X_C – реактивное сопротивление, определяемое собственной индуктивностью трубок; $\Delta X \cdot K_C$ – поправка, учитывающая расстояние между трубками; X_M – реактив-

ное сопротивление, определяемое взаимной индуктивностью трубок электрододержателя одной фазы с трубками соседних фаз; X_H – реактивное сопротивление, определяемое взаимной индуктивностью трубок электрододержателя и электрода.

Все составляющие выражения (1) в [7] определяются по графикам или протабулированным функциям в зависимости от средней длины трубок (расстояние от подвижной контактной плиты до середины контактных щек), количества трубок, подходящих к электроду, диаметра электродов и диаметра распада электродов. При этом использование таблиц и номограмм приводит к существенным погрешностям, а также не учитывается

реальная геометрия участка трубок электро-
додержателя и перераспределение тока меж-
ду параллельными проводниками фаз.

Следует также отметить еще одну не-
определенность в вышеописанной методике,
представленной в работе [7]. В разных прин-
ципиальных схемах токоподвода РТП к элек-
троду могут с разных сторон подходить
трубки одной фазы, если преобразование
«треугольника» в «звезду» было осуществ-
лено до электродов, или трубки разных по-
луфаз, если преобразование «треугольника»
в «звезду» осуществляется на электродах.
Эти две ситуации различаются степенью
влияния электромагнитного взаимодействия
между трубками, подходящими к электроду с
одной стороны, и трубками, подходящими с
другой его стороны, на величину индуктив-
ного сопротивления данного участка.

**Развитие методики расчета активного
и индуктивного сопротивлений трубок
электрододержателя.** Индуктивность i -го
проводника в системе из n проводников
складывается из собственной и взаимной
индуктивностей [7]:

$$L_i = L_{\text{соб}i} + \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot M_{ij}, \quad (j \neq i), \quad (2)$$

где $L_{\text{соб}i}$ – собственная индуктивность i -го
проводника, Г; M_{ij} – взаимная индуктив-
ность между i -м и j -м из n проводников, Г;
 $a_{ij} = (I_i/I_j) \cos \varphi_{ij}$ – коэффициент взаимоин-
дуктивности, зависящий от сдвига фаз φ_{ij}
между векторами токов I_i и I_j .

Собственная индуктивность легко опре-
деляется длиной и размерами сечения про-
водников. Взаимная индуктивность между
такими геометрически сложными провод-
никами может быть определена либо с по-

мощью численной модели, полностью ими-
тирующей конфигурацию проводников,
либо с преобразованием геометрии систе-
мы к виду, позволяющему применить из-
вестные формулы. Был избран второй путь,
а первый использован как проверочный.

За основу была принята методика опре-
деления взаимоиндуктивности для наибо-
лее общего случая – для прямолинейных
проводников, произвольно расположенных
в пространстве (рис. 3) [8].

Рассмотрим два прямолинейных провод-
ника, произвольно расположенных в про-
странстве друг относительно друга (рис. 3).

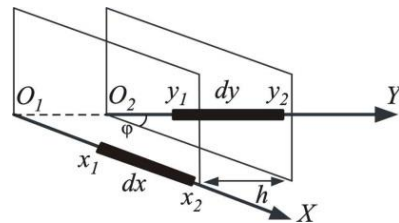


Рис. 3. Взаимное расположение двух прямоли-
нейных проводников в общем случае

Проведем две параллельные плоскости
так, чтобы в каждой из них лежал один из
рассматриваемых проводов. При этом h –
расстояние между этими параллельными
плоскостями; φ – угол между направлени-
ями токов, протекающих по данным провод-
никам. Введем координаты x и y , отсчиты-
ваемые от общего перпендикуляра O_1O_2 к
проводникам в направлении протекающих
по ним токов. Тогда в результате интегри-
рования получается выражение для опреде-
ления взаимной индуктивности между пря-
молинейными проводниками, произвольно
расположенными в пространстве [8]:

$$M_{21} = 2 \cos \varphi \cdot$$

$$\cdot \left(x_2 \operatorname{Arth} \frac{l_2}{D_{22} + D_{21}} + y_2 \operatorname{Arth} \frac{l_1}{D_{22} + D_{12}} - x_1 \operatorname{Arth} \frac{l_2}{D_{11} + D_{12}} - y_1 \operatorname{Arth} \frac{l_1}{D_{11} + D_{21}} + \frac{h}{\sin \varphi} \cdot A \right) \cdot 10^{-9}, \quad (3)$$

где D_{11} , D_{12} , D_{21} , D_{22} – расстояния между началами и концами соответствующей пары про-
водников; l_1 , l_2 – длины проводников;

$$A = \arctg \left(\frac{x_1 + y_1 + D_{11}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) + \arctg \left(\frac{x_2 + y_2 + D_{22}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \arctg \left(\frac{x_1 + y_2 + D_{12}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \arctg \left(\frac{x_2 + y_1 + D_{21}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right). \quad (4)$$

Прямое использование выражения (3) невозможно из-за неопределенности значения A для ряда случаев расположения проводников:

- проводники параллельны, токи направлены в одном или противоположном направлениях ($h \neq 0, \varphi \rightarrow 0; \varphi \rightarrow \pi$);
- пересекаются проводники или пересекаются линии, которым принадлежат данные проводники ($h \rightarrow 0, 0 < \varphi < \pi$);
- проводники находятся на одной линии, причем направления токов разные ($h \rightarrow 0, \varphi \rightarrow \pi$).

Для всех вышеуказанных случаев неопределенность относительно A была разрешена [9].

Чтобы применить эту методику, предлагается траекторию каждого проводника заменить ломаной линией, состоящей из последовательности прямолинейных отрезков, тогда по формуле (3) рассчитываются взаимоиנדуктивности каждого прямолинейного участка ломаной линии со всеми остальными. По формуле (2) рассчитываются действующие индуктивности прямолинейных участков ломаной линии. Сумма сопротивлений ее отдельных участков дает сопротивление отдельной трубки. Этот прием использовался в работе [9] для расчета индуктивности токоподвода дуговой сталеплавильной печи. Естественно, что чем больше отрезков в ломаной линии, тем точнее получаемые результаты. Процесс подготовки исходных данных для такого расчета необходимо выполнять вручную, используя конструкторскую документацию на вторичный токоподвод РТП. Задача существенно упрощается при использовании проекта, выполненного в САПР.

В предлагаемой методике активное сопротивление определяется также для каждого прямолинейного участка, имитирующего элемент трубки электрододержателя. Активное сопротивление i -го прямолинейного участка определяется по формуле

$$R_i = k_{дж} \cdot k_n \cdot k_{\bar{oi}} \cdot R_{0i}, \quad k_{\bar{oi}} = \prod_{j=1}^n K_{ij}^{\bar{\sigma}},$$

где R_{0i} – активное сопротивление i -го участка постоянному току, Ом; определяется

удельным сопротивлением материала проводника, его длиной и площадью сечения; k_n – коэффициент поверхностного эффекта; $k_{\bar{oi}}$ – коэффициент близости i -го участка, являющийся произведением коэффициентов близости i -го участка и всех остальных участков всех трубок; $k_{дж}$ – коэффициент добавочных потерь, учитывающий наличие вблизи проводников металлических конструкций (в [7] рекомендуется его принять равным 1,2, но исследования электрических потерь в металлических конструкциях, расположенных у мощных токоподводов, показали, что его величина может существенно отличаться от этого значения [10, 11]).

При расчете активного сопротивления возникает неопределенность при расчете коэффициентов близости, так как в справочной литературе [7] приводятся сведения для определения коэффициентов близости только между параллельными проводниками, расположенными друг напротив друга. Распределение плотности тока по сечению проводников в системе трубок электрододержателя имеет сложную конфигурацию, не рассчитываемую аналитически.

В предлагаемой методике расчета коэффициенты близости определяются по величине общего перпендикуляра к i -му и j -му отрезкам, только если они параллельны или перекрещиваются под углом не более 30° . Следует признать, что это достаточно грубое допущение, однако только таким образом удастся получить возможность аналитического расчета активного сопротивления.

Неравномерность распределения тока по отдельным трубкам учитывается итерационным расчетом. На начальной итерации токи в проводниках принимаются одинаковыми. При этом коэффициент взаимоиנדуктивности в (2) будет определяться только сдвигом фаз токов. Если i -й и j -й участки проводников несут токи одной фазы, то $a_{ij} = 1$, если противоположных фаз, то $a_{ij} = -1$. На последующих итерациях по результатам расчета сопротивлений проводников корректируются амплитуда и фаза токов в проводниках. Данная методика реализована в программной среде. Численные эксперименты

в разработанной программной среде показали, что итеративный метод дает сходящиеся результаты.

Результаты апробации методики. Разработанная методика была апробирована при расчете электрических параметров короткой сети проектируемой РТП мощностью 60 МВА. Расчеты выполнялись в рамках комплексного расчета параметров короткой сети данной установки. Расхождение результатов расчета индуктивного сопротивления по предлагаемой методике с результатами численного

решения, полученного посредством 3D модели в среде ANSYS [12], составляет не более 10%. Для активного сопротивления это расхождение достигает 25% вследствие достаточно грубых допущений при расчете коэффициентов близости. Однако, поскольку активное сопротивление этого участка почти на порядок меньше индуктивного, такая погрешность не повлияет на согласование источника питания и установки и на выбор оптимального электрического режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральные электрические параметры расхищенного жесткого токопровода руднотермической электропечи / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева и др. // Электротехника. 2011. № 6. С. 30-35.

2. Исследование электрических параметров жесткого токопровода руднотермических печей / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева и др. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Томск: Изд-во ТУСУР, 2012. № 1 (25). Ч. 1. С. 183-187.

3. Исследование интегральных электрических систем токопроводов электротехнологических установок / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Д.С. Власов и др. // Доклады АН ВШ РФ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. № 4. С. 37-44.

4. Моделирование электромагнитных полей шихтованных пакетов электротехнологических установок / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева, А.Ю. Игнатенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 6. С. 45-47.

5. Метод расчета параметров шихтованных пакетов руднотермических печей / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева, А.Ю. Игнатенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 6. С. 41-44.

6. ЗАО «Электротерм». Руднотермические печи от проекта до пуска [Электрон-

ный ресурс]. Режим доступа: <http://www.elektroterm.ru>, свободный (03.09.2016).

7. **Данцис Я.Б.** Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: справ. / Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов и др. М.: Металлургия, 1987. 320 с.

8. **Калантаров П.Л.** Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 488 с.

9. Программный комплекс для расчета индуктивных сопротивлений вторичных токопроводов электротехнологических установок / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Д.С. Власов и др. // Электротехника. 2010. № 5. С. 33-37.

10. Влияние рукавов электрододержателей на электрические параметры трубошинного участка токопровода дуговой сталеплавильной печи / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Д.С. Власов и др. // Электротехника. 2017. № 1. С. 66-70.

11. **Власов Д.С.** Потери активной мощности в кольцах гидроприжима контактных щек руднотермической печи / Д.С. Власов, В.А. Сериков, Л.П. Горева // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. I Междунар. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Ч. 1. С. 67-70.

12. ANSYS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ansys.com>, свободный (12.02.2016).

Алиферов Александр Иванович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки» Новосибирского государственного технического университета

Alexander I. Aliferov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Automatic Electrotechnological Systems, Novosibirsk State Technical University

Бикеев Роман Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки» Новосибирского государственного технического университета

Roman A. Bikeev – PhD, Associate Professor Department of Automatic Electrotechnological Systems, Novosibirsk State Technical University

Горева Людмила Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки» Новосибирского государственного технического университета

Lyudmila P. Goreva – PhD, Associate Professor Department of Automatic Electrotechnological Systems, Novosibirsk State Technical University

Статья поступила в редакцию 10.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

УДК 537.533.3

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА АВТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА АЛМАЗОГРАФИТОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

Р.К. Яфаров, С.Ю. Суздальцев, В.Я. Шаныгин

EFFECT OF ION IMPLANTATION DOPING ON FIELD-EMISSION PROPERTIES OF DIAMOND AND RELATED CARBON FILMS

R.K. Yafarov, S.Yu. Suzdaltsev, V.Ya. Shanygin

Изучены закономерности изменения морфологических и автоэмиссионных характеристик нанокompозитных алмазографитовых пленочных структур, полученных в микроволновой плазме паров этанола, в зависимости от дозы облучения ионами азота с энергией 20 кэВ. Установлено, что при малых дозах облучения морфологические параметры алмазографитовых структур практически не отличаются от параметров необлученных образцов, тогда как автоэмиссионные свойства претерпевают существенные изменения, причем по-

The article studies the patterns in the change of morphological and field emission characteristics of diamond like carbon nanocomposite films received in the microwave plasma of ethanol vapors depending on the dose of radiation by nitrogen ions at 20 keV. It is established that at small radiation doses the morphological parameters the diamond-like carbon structures are practically similar to the parameters of non-exposed samples. Meanwhile, the field emission properties undergo significant changes, and the increase in the maximum density of field emission currents is

вышение максимальных плотностей автоэмиссионных токов достигается при повышении порогов возбуждения автоэмиссии. Обнаружены оптимальные дозы ионной имплантации азота, при которых максимальные плотности автоэмиссионных токов возрастают по сравнению с необлученными структурами более, чем в 5 раз и достигают 78,6 мА/см². Исследованы закономерности изменения фазового состава, рассмотрены возможные механизмы, ответственные за модификацию поверхностных и приповерхностных свойств алмазграфитовых структур в зависимости от дозы ионного облучения.

Ключевые слова: алмазграфитовый наноккомпозит, автоэмиссия, имплантация, морфология, фазовый состав

Анализ литературных данных свидетельствует, что для создания сильноточных автокатодов, которые могут быть использованы взамен термокатодов в мощных СВЧ ЭВП, наиболее перспективными в настоящее время считаются металлические острия и(или) матрицы острий, а также различные наноуглеродные структуры [1, 2]. Перспективность металлических автокатодов обусловлена характерным свойством автоэлектронной эмиссии из металлов, имеющих наиболее высокие предельные плотности токов. Туннельные токи из металлов хорошо описываются законом Фаулера – Нордгейма и, согласно расчетам, могут достигать 10^8 - 10^{10} А/см². Перспективность наноуглеродных материалов обусловлена их устойчивостью к бомбардировке ионами остаточных газов, имеющих место в приборах, работающих в условиях технического вакуума и высоковольтного питания. Кроме того, наноуглеродные материалы при определенных структурных модификациях, характерных для алмазного типа гибридизации связей валентных электронов или углеродных нанотрубок с графитовым типом структуры, имеют более низкую работу выхода электронов [3]. Это уменьшает энергетическую нагрузку на материал автокатодов и позволяет получать высокие плотности автоэмиссионных токов. Так, в работах

achieved under the increase in the excitation thresholds of the field emission. We found the optimum doses of ionic implantation of nitrogen, where the maximum density of field emission currents increases compared with nonexposed structures by more than 5 times and is up to 78,6 mA/cm². The conducted analysis refers the regularities in the changes of phase structure, the potential mechanisms responsible for modification of superficial and near-surface properties of diamond like carbon structures depending on the dose of ionic radiation.

Keywords: diamond like carbon nanocomposites, field emission, implantation, morphology, phase structure

Аргонской национальной лаборатории (США) показано, что нанокристаллические алмазные покрытия наноострий и пленки, полученные с использованием неравновесной микроволновой плазмы, способны обеспечивать чрезвычайно высокую плотность тока (до 60-100 мкА на острие) и стабильность.

Однако на пути практического использования сильноточных автокатодов имеется ряд принципиальных трудностей. Они связаны с тем, что управление прозрачностью потенциальных барьеров, определяющих порог начала и плотности токов автоэмиссии электронов из твердого тела в вакуум, осуществляется в основном за счет высоких напряженностей внешних электрических полей $\sim 10^{6-7}$ В/см. Эти напряженности весьма близки к значениям электрической прочности большинства известных в природе материалов (напряженность поля лавинного пробоя кристаллического кремния составляет, например, всего $3 \cdot 10^5$ В/см). Другими важными факторами являются статистическая неоднородность рельефа поверхности, с которой происходит основная эмиссия, и ее малая площадь (порядка одного процента). Все это приводит к высокой неоднородности автоэмиссии по поверхности катодов, которая вызывает в условиях больших локальных джоулевых

перегрева эмиссионных центров неоднородную деструкцию поверхности и их ускоренное разрушение. Поэтому проблема стабильности и долговечности сильноточных автокатодов, несмотря на интенсивные исследования ученых всего мира, остается одной из важнейших для эмиссионной электроники.

Цель настоящей работы – исследование возможности увеличения предельных плотностей автоэмиссионных токов для увеличения ресурса эксплуатации полевых источников электронов на основе наноконпозиционных алмазографитовых структур.

Методика и результаты экспериментов. Получение наноконпозиционных алмазографитовых структур на подложках осуществлялось с использованием микро-волнового газового разряда паров этанола на частоте 2,45 ГГц [4]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли 250 Вт и 875 Гс. Процесс осуществлялся в условиях малой адсорбции при температуре подложки 350°C и давлении паров этанола около 0,05 Па. Потенциал смещения $U_{см}$ на подложкодержателях в процессах осаждения углеродных покрытий составлял –300 В. Полученные наноалмазографитовые покрытия толщиной 0,1–0,2 мкм подвергались облучению ионами азота с энергией 20 кэВ на установке ИЛУ-3 при комнатной температуре. Облучение образцов проведено при четырех значениях дозы ионов: $1 \cdot 10^{14}$; $3 \cdot 10^{15}$; $3 \cdot 10^{16}$; $3 \cdot 10^{17}$ ат/см². Плотность ионного тока составляла 0,5 мкА/см² для минимальной дозы и 3 мкА/см² для всех остальных доз. Для анализа морфологии и фазового состава ионно-имплантированных алмазографитовых наноконпозитов были использованы методы атомно-силовой и конфокальной рамановской микроскопии/спектроскопии. Рамановская спектроскопия благодаря наличию в спектре рамановского рассеяния характерных линий, соответствующих полосам G при 1585 см^{-1} и D при 1350 см^{-1} рассеяния на sp^2 - и sp^3 -связях углерода, позволила определить закономерности структурно-фазовых превращений в углеродных материалах в зависимости от ре-

жимов их получения и ионно-лучевой обработки. Наноморфология поверхностей изучалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) P4-SPM-MDT. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0,1 Н/м. Поле сканирования составляло 3×3 мкм.

Исследования автоэмиссионных свойств осуществлялись в условиях высокого вакуума (10^{-5} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм. Диаметр рабочей поверхности анода, изготовленного из углеродного материала МПГ-6, составлял 3 мм.

На рис. 1 представлены АСМ-изображения поверхностей алмазографитовых пленочных структур, полученных в микро-волновой плазме паров этанола при смещении на подложкодержателе –300 В и различных дозах облучения ионами азота.

На рис. 2, 3 приведены зависимости от дозы имплантации морфологических и автоэмиссионных характеристик полученных пленочных структур.

Из рис. 2 видно, что при малых дозах ионного облучения морфологические параметры пленочной структуры (высоты выступов и их поверхностные плотности) практически не изменяются по сравнению с необлученными образцами. В то же время автоэмиссионные характеристики претерпевают существенные изменения (рис. 3). Порог возбуждения автоэмиссии увеличивается от 19,5 до 35 В/мкм, а максимальные плотности токов от 14,3 до 22,9 мА/см². В интервале средних ($3 \cdot 10^{15}$ – $3 \cdot 10^{16}$ ат/см²) и больших ($3 \cdot 10^{17}$ ат/см²) доз облучения высоты выступов по сравнению с необлученными образцами и облученными с малыми дозами уменьшаются в два раза, а поверхностные плотности увеличиваются во столько же раз и от дозы облучения практически не зависят.

Пороги возбуждения автоэмиссии по сравнению с малой дозой облучения уменьшаются до 22 В/мкм. Плотности автоэмиссионных токов сначала уменьшаются при дозе

$3 \cdot 10^{15}$ ат/см² до уровня необлученных покрытий, а затем при дозе $3 \cdot 10^{16}$ ат/см² увеличиваются по сравнению с ними более, чем в 5 раз: с 14,3 до 78,6 мА/см². При высоких дозах облучения ($3 \cdot 10^{17}$ ат/см²) происходит относительно небольшое уменьшение высот выступов

и порогов возбуждения автоэмиссии при практически неизменной по сравнению со средними дозами поверхностной плотности. Однако максимальные плотности автоэмиссионных токов уменьшаются при этом больше, чем на порядок (до 7,1 мА/см²).

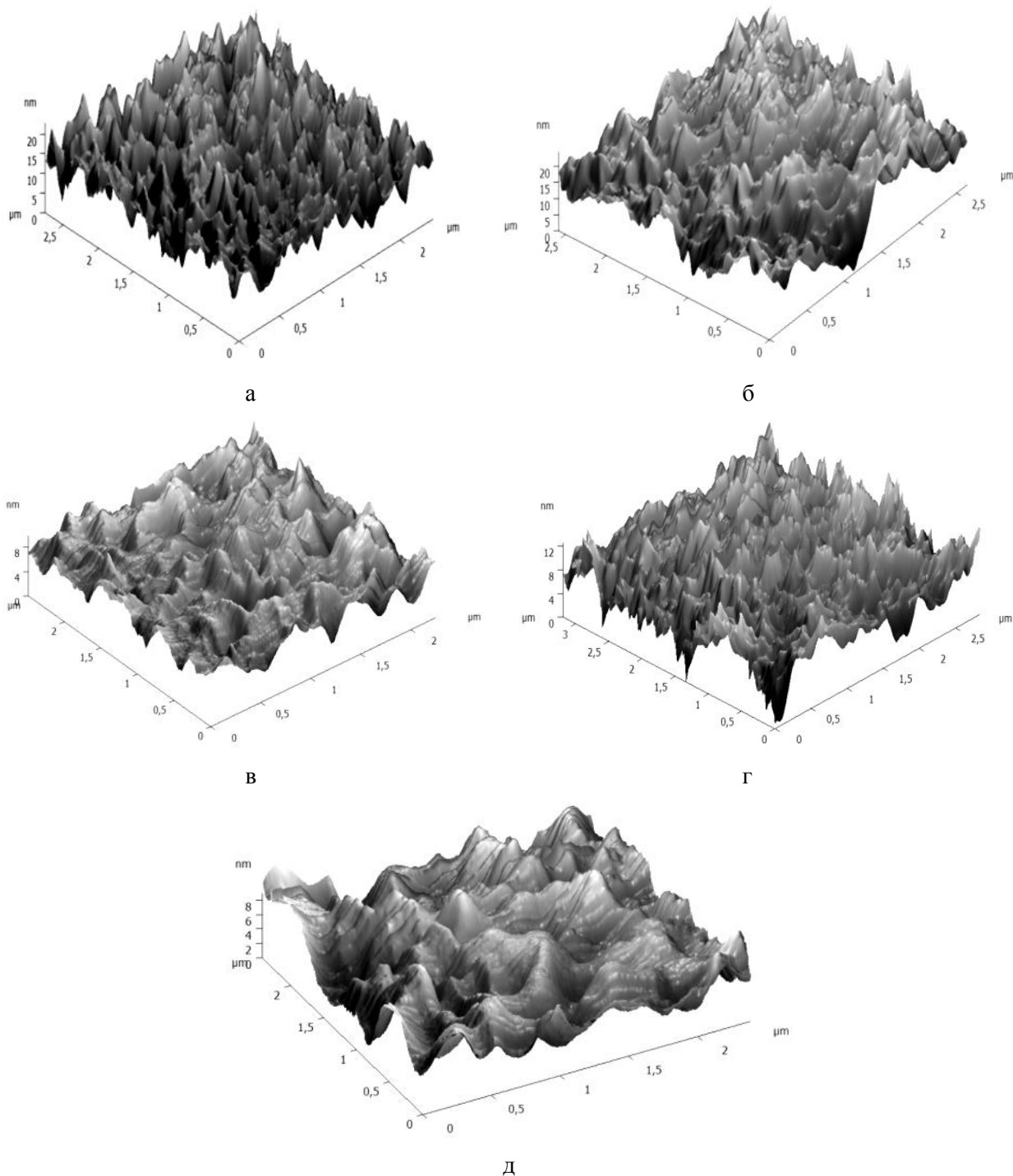


Рис. 1. АСМ-изображения поверхностей алмазографитовых пленочных структур, полученных в микроволновой плазме паров этанола при $U_{см} = -300$ В и различных дозах облучения ионами азота: а – 0; б – $1 \cdot 10^{14}$; в – $3 \cdot 10^{15}$; г – $3 \cdot 10^{16}$; д – $3 \cdot 10^{17}$ ат/см²

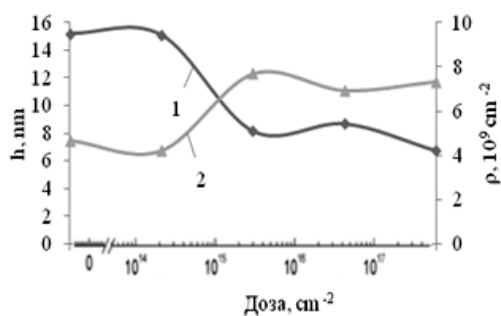


Рис. 2. Зависимости высот (1) и поверхностных плотностей (2) выступов на алмазграфитовой пленке от дозы имплантированного азота

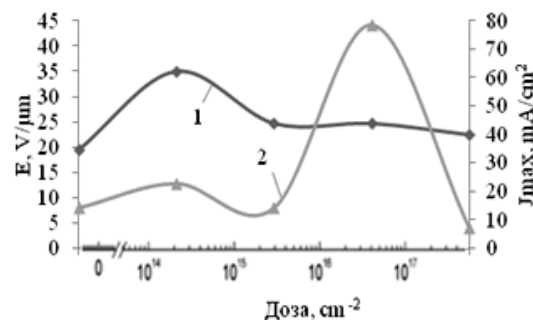
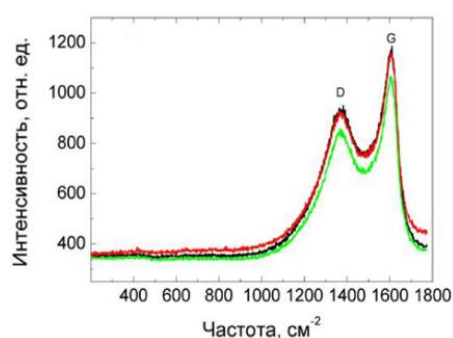
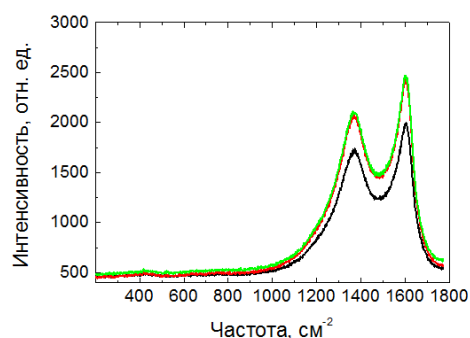


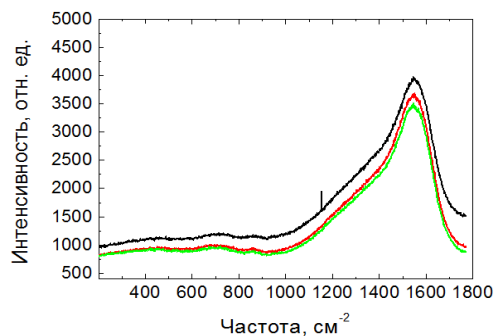
Рис. 3. Зависимости порогов возбуждения (1) и максимальных плотностей токов автоэмиссии (2) алмазграфитовой пленки от дозы имплантированного азота



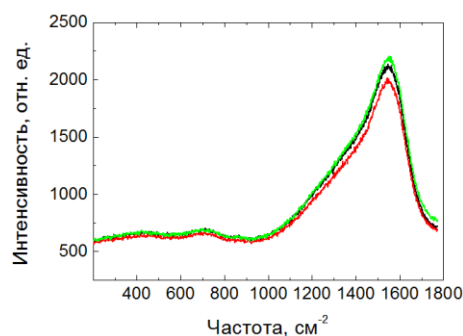
а



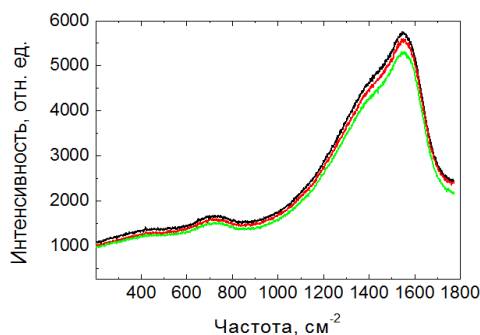
б



в



г



д

Рис. 4. Спектры рамановского рассеяния алмазграфитовых пленочных структур, полученных до (а) и после облучения ионами N^+ с различными дозами: $1 \cdot 10^{14}$ (б), $3 \cdot 10^{15}$ (в), $3 \cdot 10^{16}$ (г) и $3 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ (д). (Разные кривые на рисунках соответствуют различным точкам поверхности)

На рис. 4 приведены спектры рамановского рассеяния алмазографитовых пленочных структур, полученных с использованием конфокальной рамановской микроскопии/спектроскопии до и после облучения ионами N^+ с различными дозами. На спектрах исходных пленок и облученных с малыми дозами (рис. 4 а, б) хорошо различимы пики G и D, связанные с sp^2 - и sp^3 -типами гибридизации соответственно. Облучение с более высокими дозами приводит к уширению этих пиков за счет разупорядочения микроструктуры и их слиянию, но разложение на гауссовы кривые позволяет во всех случаях определять соотношение между интегральными концентрациями алмазоподобной и графитовой фаз по отношению площади под гауссианой для sp^3 к суммарной площади обеих гауссиан.

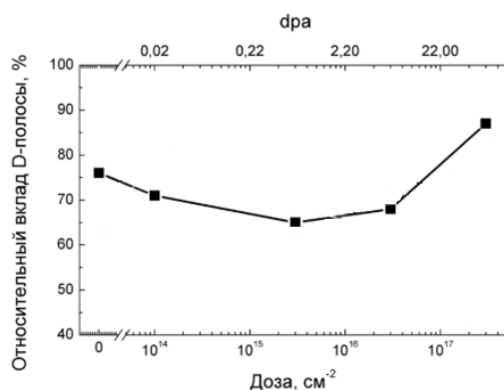


Рис. 5. Зависимость относительной доли D-полосы от дозы облучения ионами N^+ алмазографитовых пленочных структур, полученных при смещении -300 В

На рис. 5 по данным спектров рамановского рассеяния, приведенных на рис. 4, построена зависимость доли алмазоподобной фазы в нанокompозитных алмазографитовых структурах, полученных путем разложения на гауссианы, от дозы внедренных ионов азота (количества смещенных атомов). Видно, что влияние облучения на дозовую зависимость доли sp^3 -связей в пленках имеет довольно сложный характер: при малых и средних дозах облучения доля алмазной фазы по сравнению с необлученными образцами пленки уменьшается. Однако при максимальной дозе облучения ее доля увеличивается до 87%.

Обсуждение результатов. Фазовые превращения в алмазографитовых структурах при ионной имплантации азота. Использование ионной имплантации азота в углеродные пленки для создания стабильных автоэмиссионных микрокатодов обусловлено потенциальной возможностью регулировать эмиссионные свойства поверхности образца, радиационную стойкость структуры, а также проводимость материала пленки, которая должна быть достаточно высокой для обеспечения распределения электрического поля, требуемого для эффективной электронной автоэмиссии. Эмиссионные свойства поверхности зависят от типа химических связей (определяющего работу выхода электронов) и рельефа поверхности (концентраторов поля). Стабильность вакуумных катодов (эмиттеров) в процессе их эксплуатации связана с постепенным распылением поверхности катода ионами при ионизации остаточного газа. Коэффициент распыления в общем случае зависит от типа связи, и для sp^2 связей, как показывают эксперименты по ионному распылению, он выше, чем для более прочных sp^3 связей. Поэтому с точки зрения эмиссионных свойств поверхности и стабильности при эксплуатации преобладание в пленке sp^3 связей является предпочтительным, тогда как с точки зрения проводимости может иметь место обратная ситуация [5].

При ионном облучении структурно-фазовые превращения (от которых зависит соотношение вклада связей sp^3 и sp^2) происходят за счет атомных смещений (если не учитывать химическое влияние имплантированных атомов). С ростом массы иона число смещений на единицу пути растет, так что превращения происходят при тем меньшей дозе, чем тяжелее ион. С другой стороны, с ростом массы иона растет коэффициент распыления материала мишени. Следовательно, сильнее будут меняться толщина пленки и рельеф поверхности. Поэтому, чтобы минимизировать влияние этого фактора при изучении структурно-фазовых превращений, предпочтительно использовать

легкие ионы. Исходя из этих аргументов, оптимальным представляется выбор ионов азота. Ионы азота и углерода имеют близкие значения масс. Коэффициент аккомодации, характеризующий передачу энергии и импульса атомам углерода от имплантируемых ионов азота, в этом случае близок к единице. Благодаря этому точнее могут быть описаны механизмы структурно-фазовых превращений, которые происходят при ионной имплантации примеси в матрицу алмазографитовой структуры пленки. Кроме того, азот как химически активный элемент дает дополнительную потенциальную возможность влияния на свойства материала при больших концентрациях этого элемента в матрице с точки зрения как образования новых химических соединений, так и возможного электронного легирования нанокристаллитов алмаза.

Энергия ионов при облучении выбиралась таким образом, чтобы толщина ионномодифицированного слоя не превышала заданной толщины пленки. При малых дозах, когда можно пренебречь ионным распылением, распределение имплантированных ионов по глубине рассчитывается по программе SRIM [6]. Как видно из рис. 6 а, при толщине пленки 100 нм и энергии ионов N^+ , равной 20 кэВ, толщина модифицированного слоя без учета распыления несколько меньше, чем толщина пленки. Что касается распределения радиационных дефектов (рис. 6 б), то обеднение дефектами прилегающей к поверхности области выражено от-

носительно слабо. При малых дозах именно дефекты, а не внедренная примесь служат основным фактором, определяющим свойства имплантированного слоя. С ростом энергии пробеги ионов возрастают, и глубина модифицированного слоя при малых дозах приближается к толщине пленки, но при этом возрастает «завал» концентрации дефектов у поверхности, что является нежелательным фактором.

При больших дозах на профиль имплантированной примеси и дефектов существенное влияние может оказывать распыление, приводящее при коэффициенте распыления, большем единицы, к продвижению профилей распределения в глубь образца и сглаживанию «завала» у поверхности. Исходя из значения аккомодации, близкого к единице, для приближенных оценок можно принять значение коэффициента распыления атомов углерода при облучении ионами азота $S = 1-2$ ат/ион. Тогда при дозе $\sim 10^{17} \text{ см}^{-2}$ сдвиг профиля составит 20-40 нм. Такой сдвиг приведет к устранению обедненного дефектами слоя в глубокой части пленки (и к существенному утоньшению пленки). Исходя из этого, энергию ионов $N^+ E = 20$ кэВ (для исходной толщины пленки 100 нм) можно считать близкой к оптимальной: при меньших E , чем 20 кэВ, будет сильнее выражено обеднение в глубокой части пленки для малых доз, а при $E > 20$ кэВ возрастет толщина области «завала» профиля дефектов вблизи поверхности.

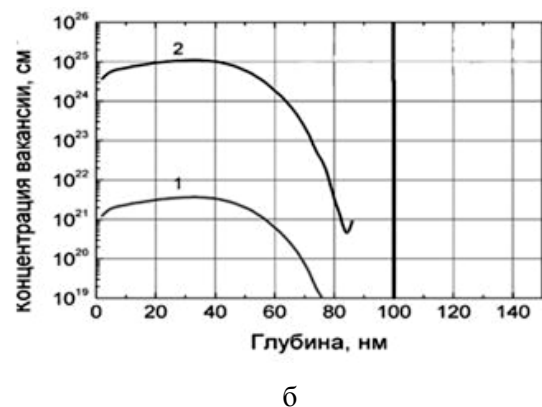
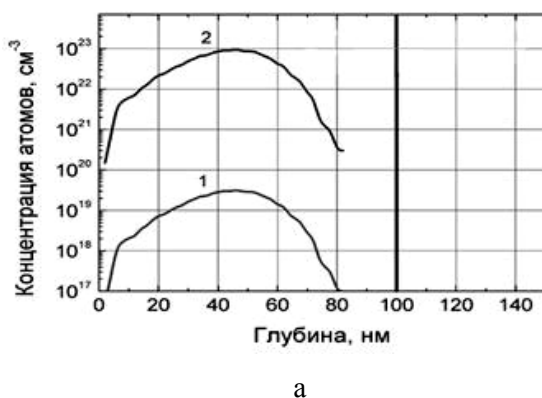


Рис. 6. Расчетные распределения в углероде ионов N^+ (а) и смещенных атомов (вакансий) (б) при различных дозах облучения: 1 — $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 2 — $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Вертикальной линией показана толщина пленки 100 нм

Выбор интервала доз легирования осуществляется из следующих соображений. Известно, что существенная модификация свойств мишени достигается, как правило, при концентрации внесенных радиационных дефектов, которая должна быть, по крайней мере, порядка одного дефекта на несколько структурных «кирпичей», из которых построены решетки входящих в состав пленки фаз. В решетке алмаза (sp^3 -связи) таким «кирпичом» является тетраэдр (C-C4), а в решетке графита – шестиугольник C6. Таким образом, если принять, что один дефект приходится на фрагмент из трех «кирпичей», получаем, что минимальная доза ионов не должна быть выше той, которая дает среднюю концентрацию смещенных атомов порядка 7% от числа атомов углерода в единице объема. Максимальная же доза с учетом возможного химического влияния имплантированного азота должна быть не ниже дозы, при которой концентрация этого элемента (без учета распыления) будет порядка числа атомов углерода в единице объема. Из рис. 6 следует, что выбранный интервал доз $1 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ отвечает указанным условиям.

С учетом описанных предположений наблюдаемую зависимость относительной доли D-полосы от дозы облучения ионами N^+ алмазографитовых пленочных структур, полученных при смещении –300 В (рис. 5), можно интерпретировать как результат влияния высоких температур и давления в термических пиках при облучении ионами азота, которые способствуют переходу графитоподобной модификации в алмазоподобную и обратно. В пользу этого свидетельствует то, что формирование алмазной модификации углерода как в природных условиях, так и при искусственном синтезе, осуществляется при высоких давлениях и температурах [7]. Аналогичный эффект ионностимулированного перехода $sp^2 \rightarrow sp^3$, но при меньших дозах и меньшей доле sp^3 -связей в исходных пленках, описан в работе [8] в случае облучения алмазоподобных пленок ионами фосфора.

При относительно малых дозах наряду с тенденцией перехода $sp^2 \rightarrow sp^3$ имеет место

обратный процесс – графитизация за счет накопления дефектов [9] и высокой теплопроводности алмазной модификации в нанокompозитной алмазографитовой исходной пленки, которая препятствует быстрому повышению температуры в термических пиках. При увеличении дозы растет концентрация дефектов и связей C-N [10, 11], рассеивающих фононы и тем самым снижающих теплопроводность. В результате растет температура (и связанное с этим давление) в тепловых пиках внедренных ионов и возрастает интенсивность процесса $sp^2 \rightarrow sp^3$. Наибольшее содержание доли алмазоподобной фазы достигается при высоких дозах облучения ($3 \cdot 10^{17} \text{ ат/см}^2$), когда концентрация внедренных атомов азота становится сравнимой с концентрацией атомов углерода в алмазе и графите (в алмазе концентрация атомов углерода равна $1,76 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$, в графите – $1,13 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$).

Корреляция фазовых превращений и автоэмиссионных свойств в алмазографитовых структурах. Как известно, свойства поверхности полупроводниковых и диэлектрических материалов весьма сильно зависят от условий обработки и, в частности, режимов плазмохимического травления или осаждения [4]. Обработка приводит к появлению локализованных на поверхности состояний, которые в зависимости от степени сродства к электрону и дырке, положения уровня Ферми на поверхности могут проявлять себя как донорные или акцепторные ловушки захвата или рекомбинационные ловушки электронно-дырочных пар. При микроволновом плазмохимическом осаждении алмазографитовых пленочных структур с достаточно высоким отрицательным смещением на подложкодержателе (–300 В) конденсация осуществляется в результате преимущественной бомбардировки поверхности роста положительными ионами. Образующаяся пленочная структура при этом испытывает недостаток в нейтрализующих заряд ионов электронов и находится в термодинамически неравновесном состоянии. Возникающие дефекты и связанные с ними поверхностные состояния приобретают пре-

имущественно акцепторный характер. В связи с недостатком электронов в процессе роста большая их часть не заполнена электронами и они нейтральны.

При малых дозах облучения ионами азота ($1 \cdot 10^{14}$ ат/см²) распылением поверхностных атомов алмазографитовой структуры, как показывают экспериментальные результаты (рис. 2), можно пренебречь. Обоеднение радиационными дефектами прилегающей к поверхности области выражено относительно слабо (рис. 6 б). Так как при малых дозах именно дефекты служат основным фактором, определяющим свойства имплантированного слоя, изменение автоэмиссионных свойств в полученных структурах по сравнению с неимплантированными можно связать только с повышенной дефектностью приповерхностного слоя. Образующиеся при имплантации дефекты структуры в виде смещенных атомов и вакансий увеличивают плотность электронных состояний и вместе с этим вероятность туннельных переходов электронов из приповерхностной области на поверхностные уровни. Повышение электропроводности приповерхностных слоев алмазографитовой структуры обусловлено появлением в щели подвижности и на поверхности дополнительных разрешенных уровней энергий, которые связаны с ненасыщенными валентностями смещенных из узлов решетки атомов углерода и по которым осуществляется прыжковая проводимость носителей заряда. Благодаря увеличению нормальной к поверхности электронной проводимости увеличивается максимальная плотность автоэмиссионного тока (рис. 3). Вместе с этим акцепторные уровни на поверхности пленочной структуры, являющиеся центрами захвата электронов, по мере их заполнения увеличивают ее отрицательный заряд и, как следствие, работу выхода и потенциальный барьер при автоэмиссии.

При средних и высоких дозах облучения ($3 \cdot 10^{15}$ - $3 \cdot 10^{17}$ ат/см²) необходимо учитывать распыление ионами азота поверхностных атомов алмазографитовой мишени и перестройку морфологии поверхности (рис. 2) (как известно, измененная морфология опре-

деляется не только видом и энергией ионов, но и длительностью облучения, которая зависит от требуемой величины дозы облучения). При ионной бомбардировке алмазографитовой структуры при наборе средних доз ($3 \cdot 10^{15}$ - $3 \cdot 10^{16}$ ат/см²) такая перестройка сопровождается уменьшением высот выступов и повышением их поверхностной плотности (рис. 2). Перестройка поверхности сопровождается распылением термодинамически неравновесного поверхностного слоя алмазографитовой структуры, полученного в результате плазмохимического осаждения в микроволновой плазме паров этанола. Кроме того, увеличение концентрации внедренных ионов азота способствует нейтрализации акцепторных уровней поверхности пленки. Результатом этого является уменьшение величины отрицательного заряда на поверхности алмазографитовой структуры и порогов возбуждения автоэмиссии до уровней, незначительно отличающихся от характеристик алмазографитовых структур с неимплантированным азотом (рис. 3). Максимальные плотности токов при дозе $3 \cdot 10^{15}$ ат/см² также уменьшаются до значений, которые наблюдаются для нелегированных образцов и образцов с низкими дозами и плотностями токов при облучении.

Резкое увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов при дозе облучения $3 \cdot 10^{16}$ ат/см², вероятнее всего, обусловлено легированием алмазных нанокристаллитов донорной при-месью азота. Локальные термические пики, возникающие при торможении внедренных ионов, приводят в результате микроотжигов к уменьшению количества дефектов кристаллической решетки ультрадисперсных алмазов, электрической активации внедренных между узлами ионов азота и увеличению электропроводности приповерхностного слоя алмазографитовой структуры. Следствием этого являются уменьшение мощностей джоулевых тепловыделений в эмиссионных центрах и увеличение максимальных плотностей автоэмиссионных токов.

При высоких дозах облучения ($3 \cdot 10^{17}$ ат/см²) увеличение содержания алмазной фазы внутри объема алмазографи-

товой структуры резко уменьшает ее электропроводность (алмаз, в котором имеют место sp^3 -связи, обладает на много порядков более высоким удельным сопротивлением по сравнению с графитом (sp^2 -связи)). Высокое удельное сопротивление затрудняет доступ электронов к поверхности пленки, что требуется для осуществления эффективной электронной эмиссии. Увеличение напряженности внешнего электрического поля для увеличения плотностей автоэмиссионных токов приводит к повышенному локальному джоулеву тепловыделению в эмиссионных центрах (выступах). Результатом этого является быстрая деградация морфологии поверхности и снижение максимальных плотностей автоэмиссионных токов.

Итак, радиационная обработка наноконструктивных алмазографитовых пленочных структур представляется одним из перспективных методов улучшения их автоэмиссионных свойств. Ее преимуществом

является возможность относительно независимого управления фазовым составом материала, от которого зависит электронная структура поверхности эмиттера, и последовательного сопротивления системы, зависящего от объемных свойств покрытия. Облучение ионами с энергиями, при которых пробеги ионов позволяют модифицировать свойства покрытия на разных глубинах, дает возможность более гибко управлять этими свойствами путем выбора вида иона и дозы облучения. Кроме того, выбор надлежащего вида ионов позволяет использовать дополнительный результат модификации, связанный с химическим взаимодействием между внедряемыми ионами и материалом эмиттера, а также донорными и акцепторными свойствами примесных атомов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур / Ю.В. Гуляев, Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель и др. // ПЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 11. С. 63-70.
2. **Усанов Д.А.** Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода / Д.А. Усанов, Р.К. Яфаров. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2011. 126 с.
3. Наноалмазографитовые автоэммиттеры для интегральных автоэмиссионных элементов / Н. Зайцев, Е. Горнев, С. Орлов и др. // Наноиндустрия. 2011. № 5. С. 36-39.
4. **Яфаров Р.К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
5. **Яфаров Р.К.** Получение наноалмазных композиционных материалов в плазме микроволнового газового разряда низкого давления / Р.К. Яфаров // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 1. С. 42-48.
6. **Ziegler J.F.** The Stopping and Range of Ions in Matter / J.F. Ziegler. Режим доступа: <http://www.srim.org>, свободный.
7. Алмазы в электронной технике: сб. ст. / под ред. В.Б. Кваскова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
8. Влияние ионной бомбардировки на фазовый состав и механические свойства алмазоподобных пленок / П.А. Карасев, О.А. Подсвиров, А.И. Титов и др. // Поверхность. 2014. № 1. С. 49-53.
9. On structural transmission in ion implanted diamond / V.S. Vavilov et al. // Rad. Eff. 1994. Vol. 22. № 2. P. 141-143.
10. Low-energy ^{15}N implantation in carbon for the synthesis of carbon nitride layers / F. Link, H. Baumann, A. Markwitz et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 1996. Vol. 113. P. 235-238.
11. Formation of buried carbon nitride by high dose nitrogen implantation into carbon thin film / H. Xin, Ch. Lin, Sh. Zhu, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 1995. Vol. 103. P. 309-312.

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Суздальцев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Шаныгин Виталий Яковлевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ravil K. Jafarov – Dr.Sc., Head of Laboratory of Submicron Electron Ion Technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

Sergey Yu. Suzdaltsev – PhD, Senior Research Fellow, Laboratory of Submicron Electron Ion Technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

Vitaliy Ya. Shanygin – PhD, Research Fellow, Laboratory of Submicron Electron Ion Technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

Статья поступила в редакцию 15.05.17, принята к опубликованию 20.06.17

УДК 539.234

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОУГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ PECVD ДЛЯ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

А.А. Дмитриев, С.Ю. Суздальцев, Д.В. Нефедов

USING THE PECVD METHOD TO SYNTHESIZE NANOCARBON MATERIALS FOR AUTOELECTRONIC EMISSION

A.A. Dmitriev, S.Yu. Suzdaltsev, D.V. Nefedov

Приведены технологические параметры для синтеза наноуглеродного материала с развитой морфологией поверхности. Проведено исследование одной из полученных пленок методом рамановской спектроскопии.

Ключевые слова: наноуглеродный материал, графен, PECVD, рамановская спектроскопия

Практически для всех наноуглеродных материалов порог возбуждения автоэлек-

The article presents the technological properties required in the synthesis of nanocarbon materials characterized for the developed surface morphology. A research has been made into one of obtained films using the Raman spectroscopy method.

Keywords: nanocarbon materials, graphene, PECVD, Raman spectroscopy

тронной эмиссии существенно ниже, чем у металлов и полупроводников [1], а у графе-

на порог автоэмиссии лежит в диапазоне 0,6-5 В/мкм [2-9]. Кроме того, углерод устойчив к бомбардировке ионами остаточных газов, имеющих место в приборах, работающих в условиях технического вакуума [10]. В нашей работе мы подбираем условия получения материала, содержащего очень тонкие слои углерода, формирующие лезвийную структуру, пригодную для дальнейшего использования в качестве автоэлектронного катода.

Наиболее тонким слоем углерода является его монослой – графен. Для изготовления графена в качестве подложек часто используют металлы, характеризующиеся низкой растворимостью углерода. К таким металлам относятся Cu, Ni, Co, Fe, Ir, Ru и др. Медь сочетает в себе низкую растворимость углерода ($< 0,001\%$) и относительно слабое каталитическое воздействие на углеродсодержащий газ, обеспечивая тем самым низкую концентрацию атомов углерода на поверхности и, соответственно, тонкий растущий слой [11]. В большинстве случаев процесс осаждения графена состоит в насыщении металла подложки углеродом из газовой фазы при высокой температуре и выделении углерода на поверхности при охлаждении подложки причем на этапе насыщения металла углеродной пленки на поверхности быть не должно. Однако в нашем случае нет необходимости получать протяженные листы графена, расположенные в плоскости подложки. Напротив, эффективные эмиссионные структуры должны быть созданы таким образом, чтобы приложенное электрическое поле концентрировалось на складках и разрывах графеновых листов (рис. 1), поскольку было показано, что увеличение числа таких структурных элементов существенно улучшает эмиссионные свойства [3, 4].

Мы полагаем, что для формирования складок и разрывов графеновых листов необходимо, чтобы поверхность металла-катализатора была зернистой, а сам металл при осаждении был сильно насыщен углеродом, причем неравномерно. Для этого в своих экспериментах мы применили островковые неоднородные пленки меди с

расчетной толщиной 50-70 нм, нанесенные термовакuumным методом на холодные подложки, изготовленные из полированного монокристаллического кремния. После нанесения подложки с пленками отжигались в вакууме при 1100°C .

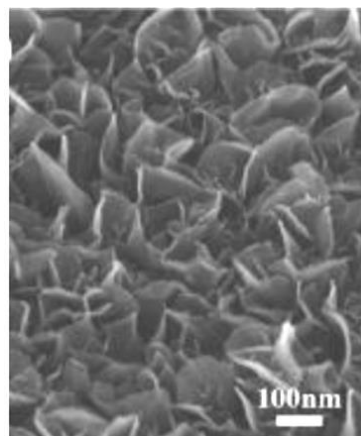


Рис. 1. Типичное изображение поверхности образца полевого катода на основе графена [3]

Нанесение углерода на подготовленные подложки осуществлялось методом PECVD при разложении паров углеродсодержащего вещества ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) в микроволновой плазме [12]. Продолжительность осаждения углерода 10 минут при температурах нагрева подложки от 1030 до 1170°C . Диапазон температур для синтеза графена в пределах 1000 - 1100°C выбирался в соответствии с рекомендацией в работе [11].

Топология поверхности пленок изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) AURIGA – Carl Zeiss (ОНИЛ СГУ-ИРЭ). На рис. 2 приведены изображения поверхностей полученных пленок. Замечено, что пленки, полученные при более высокой температуре подложки, позволяют получать более контрастные изображения поверхности (рис. 2 в). Мы полагаем, что снижение температуры при осаждении приводит к образованию на образцах рыхлого слоя графитовых чешуек (рис. 2 а), расположенных под углами к поверхности подложки. Этот слой размывает изображение, получаемое на СЭМ. К сожалению, предельного разрешения микроскопа оказалось не достаточно для более подробного исследования структуры поверхности.

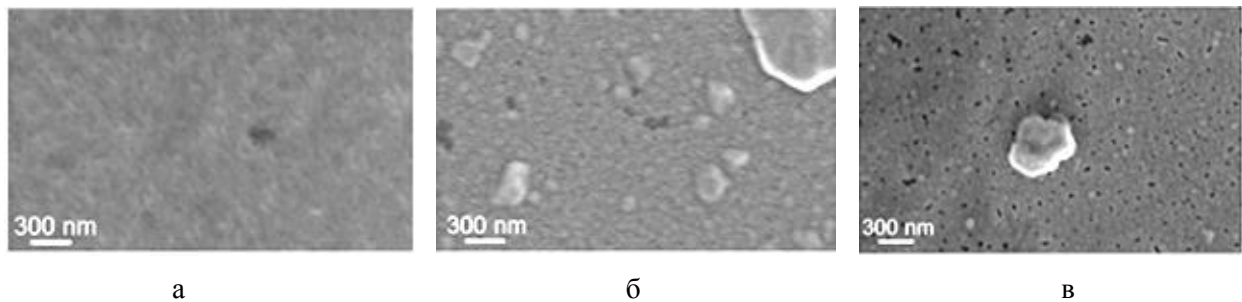


Рис. 2. Изображение поверхностей пленок, полученных с помощью СЭМ: а – при $T = 1030-1050^{\circ}\text{C}$; б – при $T = 1080-1100^{\circ}\text{C}$; в – при $T = 1150-1170^{\circ}\text{C}$

С образца, полученного при температуре $1150-1170^{\circ}\text{C}$, с помощью рамановского микроскопа РамМикс М532 производства ООО «ИнСпектр», снят спектр комбинационного рассеяния света (КРС) при использовании лазера с длиной волны 532 нм . За-светка производилась по нормали к поверхности подложки. Такая спектроскопия в графитовых структурах чувствительна к количеству углеродных листов, границам структур, разориентации графитовых слоев и количеству примесей.

На рис. 3 показаны результаты картирования поверхности образца с углеродным слоем, расположенным на кремниевой под-

ложке с медным подслоем. В левой части рисунка изображен спектр КРС точки диаметром 5 мкм в диапазоне $100-3600\text{ см}^{-1}$. Внимание уделено двум спектральным линиям. Во-первых, $D (1335\text{ см}^{-1})$ – «алмазный» пик, при исследованиях графена указывает на деформации, разупорядоченности и дефекты в кристаллической структуре. Значительная интенсивность D пика говорит о малом размере и низком качестве графена. Во-вторых, $G (1580\text{ см}^{-1})$ – «графитовый» пик, увеличение относительной интенсивности G пика указывает на рост числа слоев графена [13].

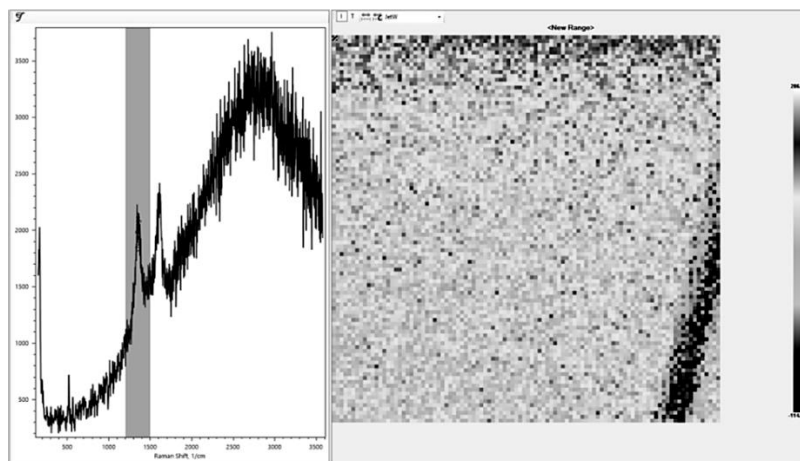


Рис. 3. Результат исследования поверхности методом рамановской спектроскопии

В правом нижнем углу спектральной карты отчетливо виден присутствующий на образце дефект в виде царапины. Как показывает карта, в этой царапине практически нет углерода, однако просматривается острый пик монокристаллического кремния 520 см^{-1} , материала, из которого изготовлена подложка. Этот пик, пусть существенно слабее, но присутствует во

всей области картирования. Это свидетельствует о крайне малой толщине и относительной прозрачности исследованного углеродного слоя. Исходя из данных КРС, можно сделать вывод, что исследованная пленка представляет собой очень тонкий, состоящий всего из нескольких слоёв углеродный материал без существенного содержания одно-

или двухслойного графена, расположенного параллельно подложки.

В результате проведенных исследований показано, что методом PECVD паров этанола можно осаждать углеродный материал с развитой поверхностью, содержащий очень тонкие углеродные слои, расположенные под углами к подложке. Повышение температуры подложки от 1030 до 1170°C снижает содержание таких слоёв. Полученный материал перспективен для эффективного снижения

пороговых значений электрического поля в приборах, использующих катоды с автоэлектронной эмиссией.

Следующим этапом работы должно быть избавление от медного подслоя, на который нанесена углеродная пленка, и исследование автоэмиссионных характеристик полученного материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fursey G.N.** Field emission in vacuum microelectronics / G.N. Fursey. NY: Kluwer Academic-Plenum Publishers. 2005. 205 p.
2. Correlation between carbon-oxygen atomic ratio and field emission performance of few-layer reduced graphite oxide / Y. Huang, W. Wang, J. She et al. // *Carbon*. 2012. Vol. 50. P. 2657-2665.
3. Field emission of single-layer graphene films prepared by electrophoretic deposition / Z.-S. Wu, S. Pei, W. Ren et al. // *Adv. Mater.* 2009. Vol. 21. № 17. P. 1756-1760.
4. Improved field emission property of graphene paper by plasma treatment / J. Liu, B. Zeng, Z. Wu et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. № 3. P. 033109.
5. A plasma treatment on few layer graphene sheets for enhancing their field emission properties / J.L. Qi, X. Wang, W.T. Zheng et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. Vol. 43. № 5. P. 055302.
6. Improved electron field emission from morphologically disordered monolayer graphene / S. Pandey, P. Rai, S. Patole et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100. № 4. P. 043104.
7. Field emission from vertically aligned few-layer graphene / A. Malesevic, R. Kamps, A. Vanhulsel et al. // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 104. № 8. P. 084301.
8. Remarkably low turn-on field emission in undoped, nitrogen-doped, and boron-doped graphene / U.A. Palnitkar, R.V. Kashid, M.A. More et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. № 6. P. 063102.
9. Ultra low field electron emission of graphene exfoliated from carbon cloth / J. Liu, B. Zeng, X. Wang et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. № 15. P. 153104.
10. **Усанов Д.А.** Исследование автоэлектронной эмиссии из наноуглеродных материалов / Д.А. Усанов, Р.К. Яфаров. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2006. 23 с.
11. **Антонова И.В.** Современные тенденции развития технологий выращивания графена методом химического осаждения паров на медных подложках / И.В. Антонова // *Успехи физических наук*. 2013. № 10. С. 1115-1122.
12. **Алехин А.А.** Тонкая структура углеродных пленок, полученных в плазме микроволнового газового разряда низкого давления / А.А. Алехин, С.Ю. Суздальцев, Р.К. Яфаров // *Письма в ЖТФ*. 2003. Т. 29. № 15. С. 73-79.
13. **Волкова Я.Б.** Методы получения и результаты исследования свойств графена / Я.Б. Волкова, Е.В. Резчикова, В.А. Шахнов // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Т. 18. № 6. 11 с.

Дмитриев Александр Александрович – магистрант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander A. Dmitriev – Master Student, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Суздальцев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Нефедов Денис Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Sergey Yu. Suzdaltsev – PhD, Senior Research Fellow, Laboratory of Submicron Electron Ion Technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

Denis V. Nefedov – PhD, Research Fellow, Laboratory of Submicron Electron Ion Technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

Статья поступила в редакцию 01.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

УДК 621.365.5

БАРАБАННЫЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

DRUM MICROWAVE ELECTROTHERMAL UNITS

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelskiy

Приведены варианты компоновки барабанных СВЧ электротермических установок. Определены области их применения, достоинства и недостатки. Рассмотрены вопросы проектирования таких установок.

Ключевые слова: барабанные СВЧ электротермические установки, компоновка, барабан, транспортная система, электропривод, применение, расчет

Известны барабанные среднетемпературные печи сопротивления, работающие в методическом режиме, предназначенные для термообработки мелких однородных деталей (например, мелких колец, гильз и т.п.) [1]. В камере такой печи установлен жароупорный барабан, приводимый во вращение вокруг своей оси с помощью электропривода. Внутри барабана имеется спиральный выступ, благодаря которому загруженные в барабан детали при его

The article provides the versions for packaging microwave-powered electric drum heaters, and determines the areas for their application, advantages and disadvantages. The authors consider the issues relating design characteristics of the given units.

Keywords: drum microwave electrothermal installations, assembly, drum, transport system, electric drive, application, calculation

вращении перемещаются к разгрузочному концу.

О применении барабанов в СВЧ электротехнологии говорится разве что в работе [2], в которой предложена классификация транспортных систем СВЧ электротермических установок.

В отличие от барабанных печей сопротивления барабанные СВЧ электротермические установки предназначены для термообработки, разумеется, диэлектриков

(сыпучих материалов, мелких диэлектрических компонентов, деталей и т.п.).

Основные требования к барабанным СВЧ электротермическим установкам сводятся к следующему:

- барабан должен быть выполнен из радиопрозрачного диэлектрика (керамики, пластика, фторопласта), не рекомендуется применять хрупкие диэлектрики и, в первую очередь, стекло;

- для облегчения транспорта обрабатываемого диэлектрика на внутренней поверхности барабана целесообразно иметь диэлектрический спиральный выступ;

- элементы электропривода, приводящего барабан во вращение, должны размещаться вне рабочей камеры установки, из-за чего концы барабана должны быть вне рабочей камеры;

- для предотвращения недопустимого уровня СВЧ излучения из рабочей камеры концы барабана должны выходить из рабочей камеры через специальные цилиндрические трубы (шлюзы) определяемой обычно экспериментально длины, на внутренних поверхностях которых должны быть расположены поглощающие прошедшую в шлюз СВЧ мощность пленки или слои поглощающего материала;

- для получения максимального КПД установки по использованию СВЧ энергии отражения электромагнитной волны от входа в рабочую камеру должны быть минимальными;

- для обеспечения заданного качества обработки в рабочей камере габариты барабана и скорость его вращения должны быть оптимизированы;

- элементы установки и вся установка в целом должны иметь как можно больший срок службы;

- установка должна быть доступной для потребителя этого технологического оборудования по цене.

В СВЧ электротермических установках на базе камер со стоячей волной (КСВ) входной и выходной шлюзы существенно снижают добротность, а следовательно и поглощение СВЧ энергии в транспортируемом диэлектрике, и потому применение

барабанной транспортной системы в КСВ, на наш взгляд, нецелесообразно.

Варианты компоновки барабанных СВЧ электротермических установки на базе камер с бегущей волной (КБВ) и камер лучевого типа (КЛТ) наказаны на рис. 1, 2.

Для построения барабанной СВЧ электротермической установки наиболее подходит КБВ на круглом волноводе (рис. 1 *а*). Несколько таких рабочих камер могут иметь общий барабан и разные компоновки источников энергии (рис. 1 *б-г*).

Если в КБВ на прямоугольном волноводе барабан пронизывает рабочую камеру перпендикулярно широкой стенке волновода, то величина отраженной от входа в КБВ СВЧ энергии может быть опасной для СВЧ генератора, так что в таких рабочих камерах, как и в оконечной калориметрической нагрузке с цилиндрической трубкой, по которой протекает вода, барабан должен проходить в волноводе под углом к широкой стенке не более 20-30° (рис. 1 *д, е*). Если при этом перемещающийся по барабану диэлектрик не поглощает всю СВЧ мощность, поступившую от СВЧ генератора в КБВ, то волновод должен иметь на своем конце оконечную калориметрическую нагрузку (рис. 1 *е*).

В барабанной СВЧ электротермической установке на КЛТ из-за круглого сечения барабана, на наш взгляд, не стоит рекомендовать традиционные рупорные излучатели [3], а можно использовать свернутый в спираль прямоугольный короткозамкнутый волновод с излучающими щелями в одной из широких стенок волновода (рис. 2).

Барабанные СВЧ электротермические установки имеют как достоинства, так и недостатки. Так, вращение барабана устраняет опасность образования пробок при транспортировке сыпучих материалов на входе. С другой стороны, такие установки имеют более сложную конструкцию и поэтому дороже.

Транспортная система барабанного типа представляет собой барабан, который может быть расположен вертикально (рис. 1 *а*), горизонтально (рис. 1 *б-г*) или наклонено (рис. 1 *д, е*) к горизонту. Барабан опирается на ролики бандажми. Чтобы барабан

не смещался в осевом направлении, ролики имеют реборды. Электропривод вращения барабана включает электродвигатель, редук-

тор, муфту, зубчатую пару и ролики. Вращение от роликов к бандажам барабана осуществляется за счет трения.

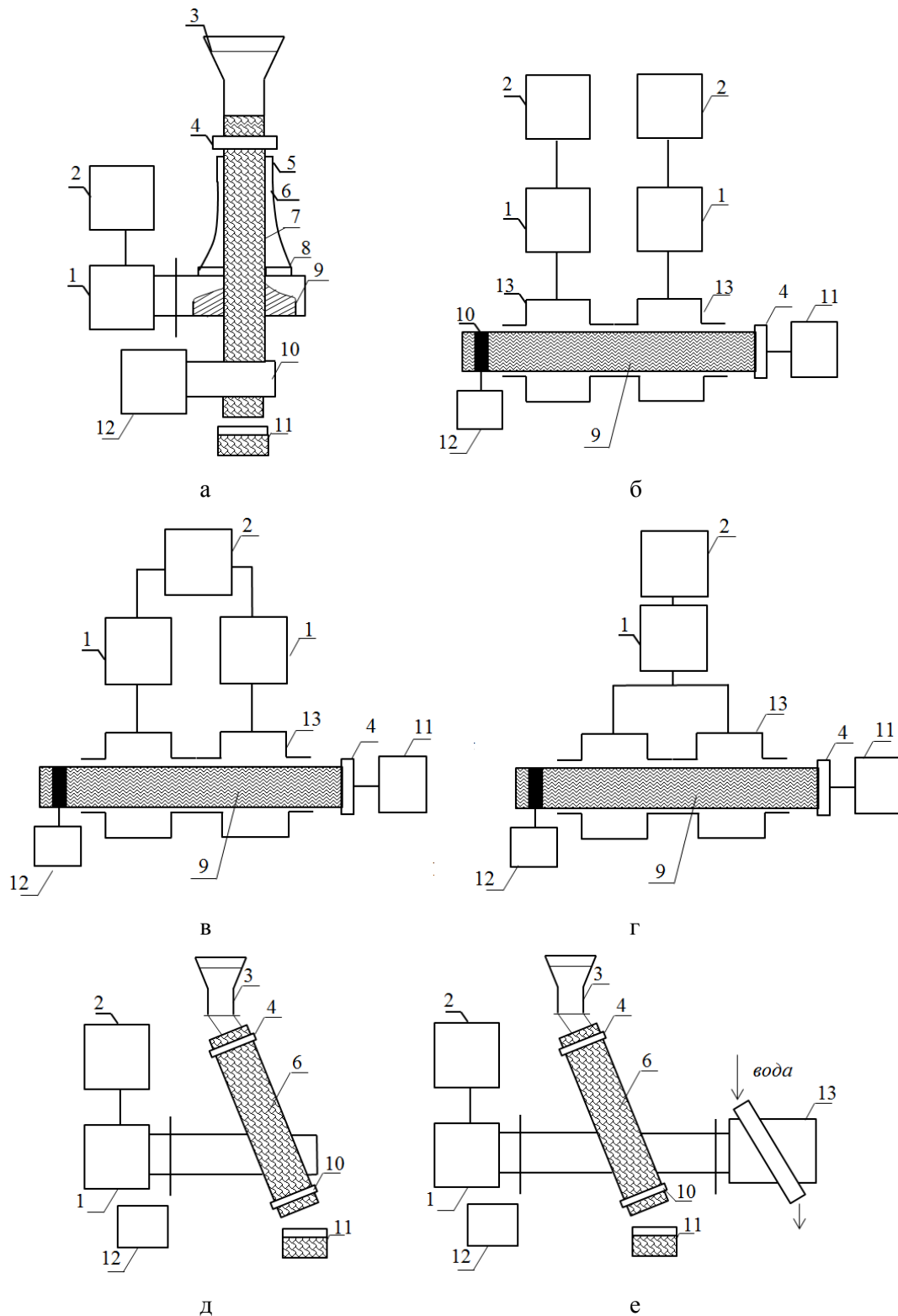


Рис. 1. Барабанные СВЧ установки на КБВ: 1 – СВЧ генератор; 2 – источник питания; 3 – загрузочный бункер; 4 – элемент электропривода; 5 – шлюз входной; 6 – барабан; 7 – обрабатываемый диэлектрик; 8 – волновод; 9 – согласующий элемент; 10 – элемент электропривода; 11 – приемный бункер; 12 – электродвигатель электропривода; 13 – согласованная калориметрическая нагрузка

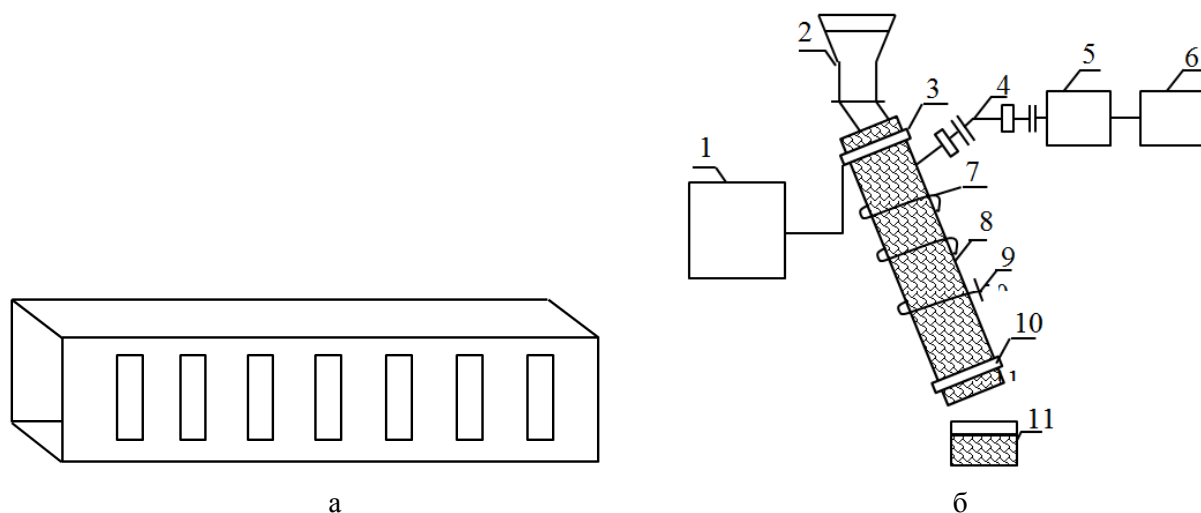


Рис. 2. Барабанная СВЧ электротермическая установка на КЛТ: 1 – электропривод; 2 – загрузочный бункер; 3 – элемент электропривода; 4 – волноводный поворот; 5 – СВЧ генератор; 6 – источник питания; 7 – прямоугольный волновод; 8 – барабан; 9 – волновода; 10 – элемент электропривода; 11 – приемный рупор

Что касается проектирования барабанных СВЧ электротермических установок, то в первую очередь рассчитывается рабочая камера, электропривод и проводится математическое моделирование технологического процесса.

Расчет КБВ на круглом волноводе при полном заполнении барабана обрабатываемыми объектами может быть выполнен в соответствии с рекомендациями, данными в работах [4, 5]. Если диэлектрик заполняет барабан по его сечению частично, то для расчета КБВ придется делать уменьшающие точность расчёта допущения, так что при разработке КБВ увеличивается объем экспериментальной работы. Разработку КБВ на прямоугольном волноводе (рис. 1 д, е) можно провести на базе эксперимента.

Рассмотрим порядок расчета КЛТ с барабанной транспортной системой. Требуемую мощность электродвигателя можно найти по соотношению

$$P_{эд} = \frac{F_{тяг} v}{\eta},$$

где $F_{тяг}$ – тяговое усилие на электродвигателе; v – окружная скорость вращения барабана; η – КПД приводящего механизма.

Тяговое усилие $F_{тяг}$ включает окружную силу на барабане и радиальную силу:

$$F_{тяг} = m_{б} g + m_{сп} g,$$

где $m_{б}$ – масса барабана; g – ускорение свободного падения; $m_{сп}$ – максимальная масса обрабатываемых материалов.

Если барабан расположен под углом к горизонту, то тяговое усилие можно найти по соотношению

$$F_{тяг} = (m_{б} g + m_{сп} g) \cdot \cos \alpha,$$

где α – угол подъема барабана над горизонтом.

КПД приводящего механизма равен

$$\eta = \eta_{зп} \eta_{рем} \eta_n \eta_p,$$

где $\eta_{зп}$ – КПД открытой зубчатой пары; $\eta_{рем}$ – КПД ременной передачи; η_n – КПД подшипников; η_p – КПД редуктора.

Математическое моделирование процесса термообработки диэлектрика в барабанной СВЧ электротермической установке может быть проведено аналогично тому, как это предложено в работе [6].

Таким образом, рассмотрены вопросы проектирования барабанных СВЧ электротермических установок: указаны возможные варианты компоновки этих установок, области их применения, достоинства и недостатки, возможные подходы к расчету рабочих камер, расчет электропривода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Свенчанский А.Д.** Электрические печи сопротивления / А.Д. Свенчанский. М.: Энергия, 1975. 384 с.

2. **Юдина В.О.** Транспортные системы СВЧ электротермических установок, работающих в методическом режиме / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 10-12.

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

4. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.

5. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

6. **Архангельский Ю.С.** Согласованные задачи в проектировании методических СВЧ электротермических установок / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 10-14.

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

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

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

Yuri S. Arkhangelskiy – 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 15.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

УДК 621.37, 621.365

КАМЕРА С БЕГУЩИМИ ВОЛНАМИ НА ВОЛНОВОДЕ, СВЕРНУТОМ В КОЛЬЦО

Д.Б. Сивяков

A FOLDED WAVEGUIDE TRAVELLING WAVE TUBE

D.B. Sivyakov

Предлагается камера с бегущими волнами на волновом, свернутом в кольцо. В камерах такого типа сочетаются преимущества камер с бегущей волной (боль-

The article presents the folded waveguide travelling wave tube. This type of tubes combine the advantages of the travelling wave tubes (including long range of the line and

шая протяженность линии и простая организация конвейерной обработки материала) и камер со стоячей волной (высокая напряженность электромагнитного поля, возможность обработки диэлектрических изделий разной формы с различными электрофизическими параметрами). Проведено математическое моделирование методом эквивалентной длинной линии процессов в камере для случая двух генераторов, возбуждающих камеру на расстоянии друг от друга в четверть длины волны. В камере от каждого генератора возбуждаются две распространяющиеся навстречу друг другу бегущие волны. Исследованы переходные процессы при прерывистом и непрерывном возбуждении, изменение действующего напряжения вдоль камеры, влияние потерь на амплитуду установившегося напряжения. Показано, что в этом случае в камере действующее значение напряжения вдоль камеры практически постоянно.

Ключевые слова: камера с бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо, математическое моделирование, метод эквивалентной длинной линии, возбуждение двумя генераторами, переходные процессы, действующее напряжение

В СВЧ электротермическом оборудовании применяются камеры со стоячей волной (КСВ) на прямоугольном, круглом, коаксиальном резонаторах, резонаторах сложной формы, а также на короткозамкнутых прямоугольном, круглом, коаксиальном волноводах, волноводах сложной формы [1]. Выбор конструкции камеры зависит от обрабатываемого материала.

В патенте [2] предложен новый класс СВЧ камер электротехнологического оборудования на волноводах, свернутых в кольцо.

В камерах такого типа сочетаются преимущества камер с бегущей волной (большая протяженность линии, простая организация конвейерной обработки материала) и камер со стоячей волной (высокая напряженность электромагнитного поля, возможность обработки диэлектрических изделий разной формы с различными электрофизическими параметрами).

simple arrangement of pipelined processing) and standing wave tubes (including high intensity of the electromagnetic field, and possibility for processing of the dielectric products of various shapes and various physical parameters). The mathematical modeling was conducted using the method of equivalent long line of processes in the tube containing two generators producing excitation within the tube at a distance of $\frac{1}{4}$ of the wave length. Each generator is used for the excitation of two travelling waves propagating towards each other. A research is made into the transient processes under the intermittent or constant propagation, the changes in the voltage acting along the tube, and the impact of losses on the amplitude of the steady-state voltage. It is shown that in this case, the effective value of voltage acting along the tube is basically constant.

Keywords: a folded waveguide travelling wave tube, mathematical simulation, the method of the equivalent long line, excitation using two generators, transient processes, effective voltage

На рис. 1 приведена конструкция такой камеры на волноводе прямоугольного сечения [2].

Рабочей камерой является волновод прямоугольного сечения 1, свернутый в кольцо или в другую замкнутую конфигурацию. СВЧ энергия поступает в камеру от генераторов 2. Внутри камеры находится вращающийся транспортер 3 для обрабатываемых материалов (карусель). В середине широкой стенки волновода сделана неизлучающая щель 4 для свободного вращения транспортера. Загрузка и выгрузка материала 5 осуществляется с помощью специального конвейера 6 внутри неизлучающего четвертьволнового отрезка волновода. Для обработки жидких материалов, эмульсий или суспензий можно разместить внутри кольца диэлектрическую трубку, по которой будет циркулировать материал.

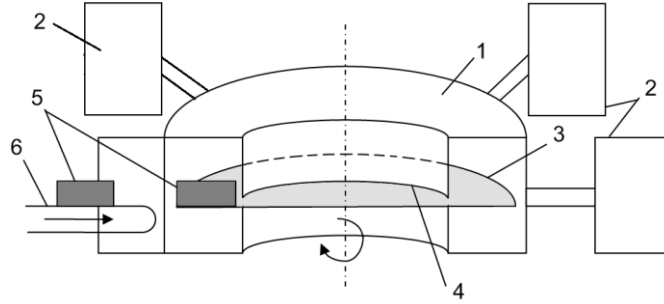


Рис. 1. Конструкция камеры на волноводе прямоугольного сечения, свернутом в кольцо: 1 – камера; 2 – СВЧ генераторы; 3 – вращающийся транспортер; 4 – щель; 5 – обрабатываемые объекты; 6 – система загрузки-выгрузки

Теория процессов в камере рассмотрена в работах [3, 4], где сформулированы математические модели, базирующиеся на эквивалентном представлении волновода длинной линией.

В камере от каждого из генераторов возбуждаются две волны, распространяющиеся в противоположных направлениях от ввода СВЧ энергии. Средняя длина кольца L должна составлять целое число длин волн λ в рассматриваемой линии. При этом будет наблюдаться резкое увеличение напряженностей электрического и магнитного полей (явление резонанса). Резонансная

длина волны кольцевого резонатора будет определяться условием [5]:

$$L = m\lambda, \quad (1)$$

где L – периметр кольцевой камеры по средней линии, м; m – число длин волн в камере, $m = (1, 2, 3 \dots)$; λ – резонансная длина волны кольцевого резонатора, м.

Суммарная стоячая волна $U_{\Sigma}(k, n, \psi', n_t)$ от двух бегущих навстречу друг другу волн в случае возбуждения к синхронизированными генераторами будет определяться выражением, приведенным в [3, 4]:

$$U_{\Sigma}(k, n, \psi', n_t) = \sum_{n=0}^{n_t} \left\{ \sum_{k=1}^K U_{m_k}^+(t_0^+) \cdot e^{-\alpha \cdot (2 \cdot \pi \cdot n + |\psi' - \psi_k|) R} \cdot \sin[\beta \cdot R \cdot (2 \cdot \pi \cdot (n_t - n) - |\psi' - \psi_k|) + \varphi_{0k}^+] + \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^K U_{m_k}^-(t_0^-) \cdot e^{-\alpha \cdot [2 \cdot \pi \cdot (n+1) - |\psi' - \psi_k|] R} \cdot \sin[\beta \cdot R \cdot (2 \cdot \pi \cdot (n_t - (n+1)) + |\psi' - \psi_k|) + \varphi_{0k}^-] \right\}, \quad (18)$$

где n_t – время, задаваемое дискретно как время, необходимое прямой волне на совершение n оборотов; $U_{m_k}^{\pm}(t_0^{\pm})$ – напряжения прямой и встречной волн в начальный момент времени, В; $|\psi' - \psi_k|$ – угловое расстояние, отсчитываемое от места расположения k -го генератора, рад; R – радиус средней линии кольца камеры, м; β – фазовая постоянная распространяющейся в кольце бегущей волны, рад/м; α – постоянная затухания в волноводе с обрабатываемым материалом, 1/м; $\varphi_{0k}^{\pm}$ – начальная фаза для прямой и встречной волн от k -го генератора при $t = 0$ (при синфазном возбуждении волн $\varphi_{0k}^+ = \varphi_{0k}^- = \varphi_{0k}$, при противофазном $\varphi_{0k}^- = \varphi_{0k}^+ + \pi$, рад).

В установках СВЧ обработки материалов обычно используются генераторы, обладающие технически отличающимися частотами (несинхронизированные). В этом случае в каждой точке пространства камеры тепловой эффект от суммарного действия полей, создаваемых каждым из отдельных генераторов, будет характеризоваться действующим значением суммы напряжений, создаваемых каждым генератором:

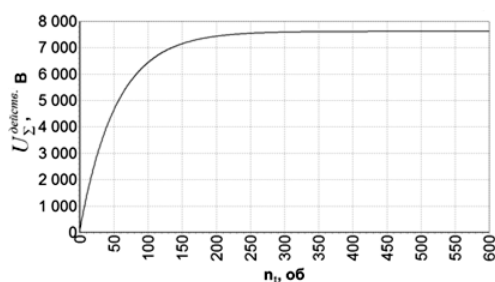
$$U_{\Sigma}^{действ.}(k, n, \psi', n_t) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^K (U_k(n, \psi', n_t))^2}, \quad (19)$$

где k – количество генераторов.

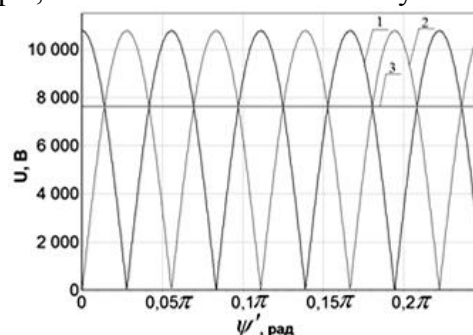
Проведем моделирование переходного процесса при возбуждении камеры в пре-

рывистом режиме работы прямоугольным СВЧ импульсом при подаче энергии от двух генераторов, расположенных в точках с угловыми координатами $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 5^\circ$ (на расстоянии четверти длины волны) в среде DELPHI [6]. Это наиболее общий случай, поскольку, задавая длительность импульса больше длительности переходного процесса, имеем результаты для случая непрерывного возбуждения.

Волновод имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами $a \times b = 45 \times 90$ мм, выполнен из меди с удельной проводимостью $\sigma_{cm} = 5,8 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Он возбуждается на волне типа H_{10} при частоте 2,45 ГГц, радиус кольца $R = 50$ см, амплитуда напряжения каждого генератора $U_{m1,2}^\pm = 100$ В,



а



б

Рис. 2. Переходный процесс (а) в камере и графики стоячих волн и действующего напряжения (б) вдоль кольца: 1 – стоячая волна от первого генератора; 2 – стоячая волна от второго генератора; 3 – действующее значение в камере

На рис. 3 приведены графики переходного процесса в камере при изменении потерь (при помещении в камеру материала для обработки) в сечении камеры с угловой координатой $\psi' = \pi$. Как видно из графика, уровень напряжения в камере падает. При отсутствии обрабатываемого материала (рис. 3, кривая 1) при $\alpha_0 = 0,00591 \text{ 1/м}$ $U_{\Sigma}^{\text{действ.}} = 7,62 \text{ кВ}$ ($U_m = 10,77 \text{ кВ}$). При потерях $\alpha = 10 \alpha_0$ $U_{\Sigma}^{\text{действ.}} = 760 \text{ В}$ ($U_m = 1,08 \text{ кВ}$) (рис. 3, кривая 2). При потерях $\alpha = 100 \alpha_0$ $U_{\Sigma}^{\text{действ.}} = 66,2 \text{ В}$ ($U_m = 93,7 \text{ кВ}$) (рис. 3, кривая 3).

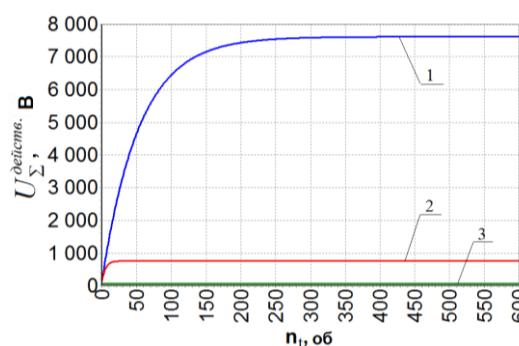


Рис. 3. Переходный процесс в камере при различных потерях: 1 – $\alpha = \alpha_0$; 2 – $\alpha = 10\alpha_0$; 3 – $\alpha = 100\alpha_0$

На рис. 4 приведен график зависимости амплитуды напряжения в рассматриваемой камере от потерь в установившемся (непрерывном) режиме.

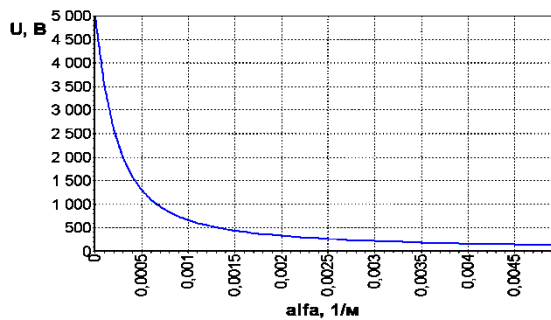


Рис. 4. Зависимость амплитуды установившегося напряжения в камере от потерь

При нетепловой модификации материалов важным фактором является напряженность электрического поля в камере, которая пропорциональна напряжению. Предлагаемые камеры с бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо, могут быть использованы и для такой обработки материалов.

Для уменьшения собственных потерь в камере и расширения ее поперечных разме-

ров целесообразно использовать волновод круглого сечения на волне H_{01} , обладающий наименьшими потерями среди линий передачи. Кольцевая (замкнутая) камера не обязательно должна быть в виде окружности. Она может состоять, например, из линейных отрезков линии передачи и иметь прямоугольную форму.

Итак, проведен анализ процессов в камере с бегущими волнами на прямоугольном волноводе, свернутом в кольцо, для случая двух генераторов, возбуждающих камеру на расстоянии друг от друга в четверть длины волны. Исследован переходный процесс при прерывистом и непрерывном возбуждении камеры, картина стоячей волны и изменения действующего напряжения вдоль камеры, влияние потерь на амплитуду установившегося напряжения. Показана эффективность применения подобных камер для обработки материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. СВЧ установка для обработки диэлектрических материалов / Б.К. Сивяков, Ю.П. Слаповская // Патент РФ № 2416891. 2012. Бюл. № 11.
3. **Слаповская Ю.П.** Разработка методов математического моделирования переходных волновых процессов в протяженных кольцевых резонаторах СВЧ устройств / Ю.П. Слаповская, Б.К. Сивяков // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2010): материалы конференции Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. С. 423-428.

4. **Слаповская Ю.П.** Математическое моделирование сверхвысокочастотных кольцевых резонаторов электротехнологических установок / Ю.П. Слаповская, Б.К. Сивяков // Вестник СГТУ. 2010. № 3 (45). С. 162-170.
5. **Лебедев И.В.** Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев. М.: Высш. шк., 1970. Т. 1. 440 с.
6. **Слаповская Ю.П.** Программа математического моделирования переходных процессов в кольцевом резонаторе СВЧ резонансного гироскопа / Ю.П. Слаповская, Б.К. Сивяков // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 20102010615567 от 30.08.2010 г.

Сивяков Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry B. Sivyakov – PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University

Статья поступила в редакцию 13.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL MULTIPHYSICS

С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, В.В. Захаров

NUMERICAL MODELING OF ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES USING THE COMSOL MULTIPHYSICS SOFTWARE PACKAGE

S.G. Kalganova, Yu.S. Arkhangelskiy, S.V. Trigorly, V.V. Zakharov

Рассмотрено применение программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования электротехнологических процессов. Приведен обзор математических моделей индукционного нагрева, СВЧ термообработки, электроплазменного нагрева. Показаны возможности моделирования связанных физических процессов.

Ключевые слова: математическое моделирование, электротехнология, индукционный и СВЧ нагрев, плазма, уравнение теплопроводности, температурное поле, уравнения Максвелла

Математическое моделирование электротехнологических процессов при термообработке различных материалов позволяет сократить дорогостоящие физические эксперименты и длительные циклы разработки энергоемких электротехнологических установок, включая их проектирование, изготовление и испытания. В последние годы для моделирования различных физических процессов используются различные пакеты программ, основанные на использовании различных численных методов.

В частности, для моделирования тепловых, электродинамических, электромеханических и других физических процессов используется программный пакет COMSOL Multiphysics [1-4].

Достоинством данного программного продукта является интерактивная среда для моделирования с использованием метода конечных элементов, с помощью которого

The article considers creating simulations of electrotechnological processes with the COMSOL Multiphysics software platform. The authors present a survey of mathematical models for induction heating, microwave heat treatment, laser heating, and electroplasma heating, and show the possibilities for modeling coupled physical processes.

Keywords: mathematical modeling, COMSOL Multiphysics, electrotechnology, induction and microwave heating, plasma, laser heating, heat equation, temperature field, Maxwell equations

решается большинство научных и инженерных задач, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. COMSOL Multiphysics позволяет решать как одно дифференциальное уравнение (прикладной режим), так и несколько взаимосвязанных дифференциальных уравнений, моделирующих связанные между собой физические процессы (мультифизичный режим – в терминологии разработчиков продукта). Кроме того, пакет позволяет учитывать изменение физических свойств в зависимости от времени, температуры и других факторов.

Данная работа посвящена анализу применения пакета COMSOL Multiphysics для моделирования различных электротехнологических процессов. Во многих электротехнологических процессах (при индукционном нагреве и плавлении металлов, СВЧ нагреве, сушке и спекании диэлектриков,

вакуумном дуговом переплаве, в процессах лазерной, электронно-лучевой, электроплазменной обработки материалов) имеют место сложные физические явления, для которых требуется моделирование взаимосвязанных процессов электродинамики, тепломассопереноса, термомеханики и решение соответствующих дифференциальных уравнений [1-3]. Нагрев различных ма-

териалов в электротермических установках приводит к изменению их физических свойств. В этой связи применение пакета COMSOL Multiphysics для моделирования взаимосвязанных физических процессов, происходящих в электротехнологических установках с учетом динамики изменения свойств материалов весьма актуально.



Рис. 1. Основные направления применения пакета COMSOL Multiphysics для моделирования электротехнологических процессов

На рис. 1 представлены основные направления применения пакета COMSOL Multiphysics для моделирования электротехнологических процессов. В данный программный пакет встроены модули (шаблоны) физических процессов, включая и электротехнологические процессы: индукционный нагрев; джоулев нагрев (за счет протекания токов в нагревательных элементах электрических печей сопротивления, в установках электрошлакового переплава); СВЧ нагрев; лазерный нагрев; плазменный нагрев [5]. В пакете имеется модуль решения задач тепломассопереноса, который используется для моделирования фазовых превращений в процессах как сушки, так и плавления в электротермических установках (ЭТУ). В COMSOL Multiphysics предусмотрена возможность моделирования ра-

диационного теплообмена в системе твердых тел, например, при теплообмене между нагреваемым объектом и внутренней поверхностью ЭТУ.

При термообработке различных твердых объектов в электротехнологических установках могут возникать большие температурные напряжения и деформации, приводящие к нарушению целостности конструкции. В ряде процессов, таких как сушка и обжиг строительных материалов, появление трещин в изделиях недопустимо. Поэтому для оценки теплонапряженного состояния объектов при термообработке в ЭТУ с успехом может применяться модуль механики пакета COMSOL Multiphysics (рис. 1).

Большое значение при создании систем охлаждения ЭТУ, а также при исследовании расплавов металлов играет моделиро-

вание конвективного и сопряженного теплообмена между жидкостью и твердым телом при ламинарном или турбулентном течении (см. рис. 1). Достоинством пакета COMSOL Multiphysics является возможность объединения модулей для выполнения связанного (мультифизического) моделирования одновременно протекающих связанных между собой физических процессов. Данный пакет содержит средства для геометрического построения моделей, генерации сетки разбиения рассматриваемых

областей на элементы, различные способы решения задач и инструменты визуализации результатов моделирования [3, 5].

Для оценки возможностей математического моделирования электротехнологических процессов с помощью пакета COMSOL Multiphysics рассмотрим некоторые примеры его применения, представленные в работах российских и зарубежных авторов. В работе [6] рассмотрено моделирование плавления меди в графитовом тигле вакуумной индукционной установки (рис. 2).

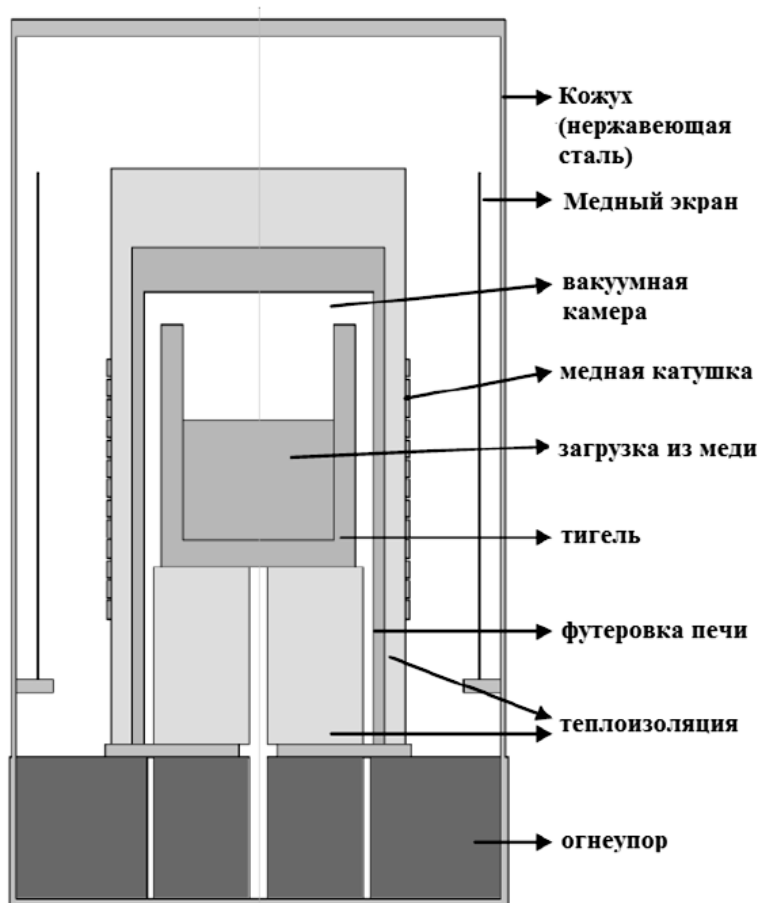


Рис. 2. Схема вакуумной индукционной установки

В основу математических моделей положены уравнения Максвелла (1) и теплопроводности (2)

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\mathbf{B}) = \mathbf{J}_e, \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{A}$ – вектор магнитного потенциала; $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции; ω – круговая частота; σ – электропроводность; ϵ_0, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость среды; μ_0, μ_r – магнитная проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость среды; $\mathbf{J}_e$ – вектор плотности тока; T – температура; t – время; c, ρ – удельная теплоемкость и

плотность среды; k – коэффициент теплопроводности; Q – мощность внутренних источников теплоты, обусловленная протеканием тока в среде.

Уравнения (1) и (2) решались в осесимметричной постановке при следующих условиях.

Уравнение (1) решалось для всей расчетной области, включая медную загрузку, индуктор, тигель, футеровку. Ток индуктора составлял 400 А при рабочей частоте 8 кГц. Уравнение теплопроводности (2)

решалось для твердых областей расчетной модели. Начальная температура всех областей составляла 30°C. Все внутренние поверхности модели участвовали в лучистом теплообмене (рис. 2). На внешней поверхности печи задавались граничные условия третьего рода.

Результаты моделирования полей температур после 2 часов нагрева приведены на рис. 3 [6]. Максимальная температура достигает 1500°C, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

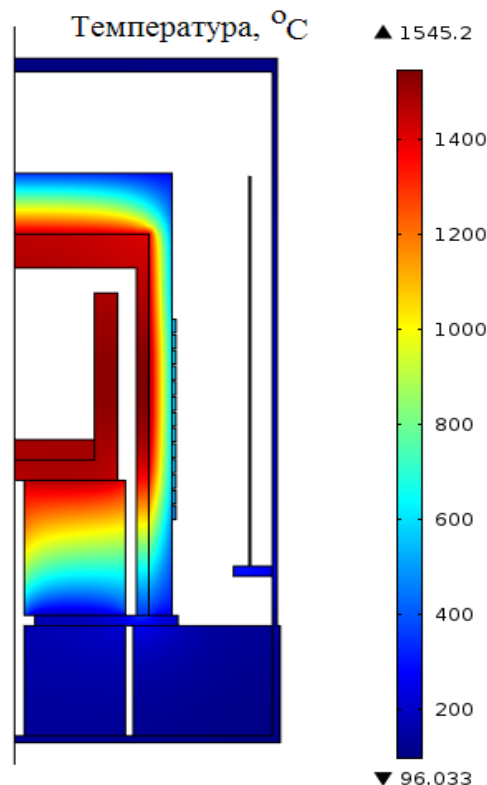


Рис. 3. Результаты моделирования поля температур через 2 ч нагрева

В зарубежных источниках имеются сведения об использовании пакета COMSOL Multiphysics для решения задач термообработки диэлектриков в СВЧ камерах резонаторного типа (со стоячей волной) [7] и в волноводах, частично заполненных обрабатываемым диэлектриком [8].

Рассмотрим моделирование термообработки в СВЧ печи резонаторного типа [7]. Данная установка представляет собой металлический короб, соединенный с источником СВЧ излучения частотой 2,45 ГГц с

помощью прямоугольного волновода (рис. 4), работающего в режиме волны типа TE_{10} . В нижней части печи имеется цилиндрическая стеклянная пластина со сферическим объектом нагрева (картофелем). Часть картофеля срезается для механической устойчивости. СВЧ мощность составляла 1 кВт. В силу симметрии СВЧ печи рассматривалась модель, состоящая из одной половины, при этом плоскость симметрии проходит вертикально через печь, волновод, картофель и стеклянную пластину (рис. 4).

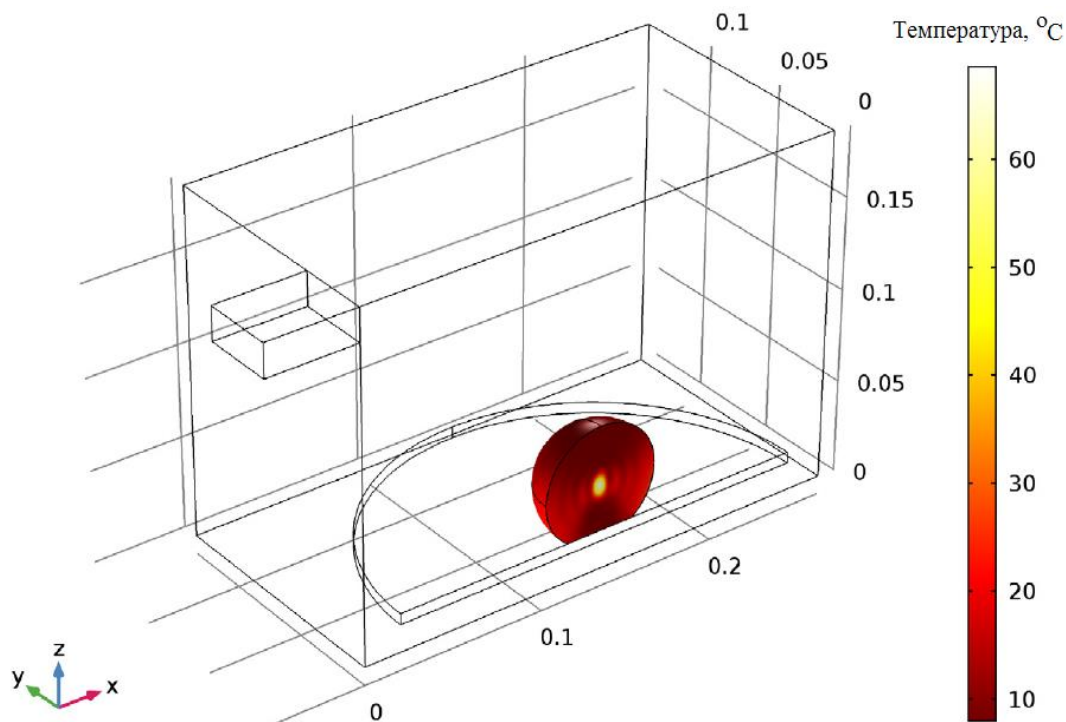


Рис. 4. Результаты моделирования нагрева объекта в СВЧ печи после 5 с термообработки

Для моделирования электромагнитного поля используется волновая форма уравнений Максвелла (уравнение Гельмгольца):

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 (\epsilon_r - j\epsilon'')\mathbf{E}, \quad (3)$$

где $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля; f – частота; c – скорость света; ϵ'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости (фактор потерь).

Граничные условия для электромагнитного поля задаются в виде

$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$ – в плоскости симметрии СВЧ печи, где $\mathbf{n}$ – единичный вектор, направленный по нормали от поверхности симметрии; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля.

Внутренняя поверхность печи рассматривалась как идеальный проводник, а на границах контакта между диэлектрическими средами задавались условия сопряжения [8].

Процесс нагрева описывается уравнением теплопроводности, аналогичным (2), в котором мощность тепловыделения за счет диэлектрических потерь определялась по соотношению

$$Q = 0,5\omega\epsilon_0\epsilon''|\mathbf{E}|^2. \quad (4)$$

Граничные условия на внешних границах материалов задаются в виде теплообмена по закону Ньютона – Рихмана.

В результате моделирования установлено, что мощность, поглощаемая в картофеле, составляет около 60% от входной СВЧ мощности. На рис. 4 показано распределение температур после первых 5 секунд нагрева. Из-за низкой теплопроводности картофеля нагрев происходит неравномерно по объему, и максимальная температура после 5 секунд термообработки наблюдается в центре объекта (рис. 4).

В работе [8] рассмотрено применение СВЧ в медицине для термообработки жидких проб, находящихся в радиопрозрачных объемах, помещаемых в СВЧ волновод. Проводилось математическое моделирование электродинамических процессов, теплопередачи и конвективного теплообмена (ламинарное течение жидкости) с помощью соответствующих модулей пакета COMSOL Multiphysics. Рассматривалось распространение волны типа TE_{10} на частоте 2,45 ГГц. Были определены напряженно-

сти электрического поля, распределения температуры и скорости движения жидкости.

Одним из направлений электротехнологии является применение электрофизических методов термообработки для получения новых материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами. К таким задачам относится применение лазерного воздействия для спекания порошковых ма-

териалов [3]. В данной работе проведено численное моделирование процессов тепломассопереноса при лазерном спекании порошков с учетом фазовых переходов. Моделирование с применением соответствующих модулей пакета COMSOL Multiphysics выполнено для сплава с химическим составом Fe-Ni. Результаты моделирования приведены на рис. 5 [3].

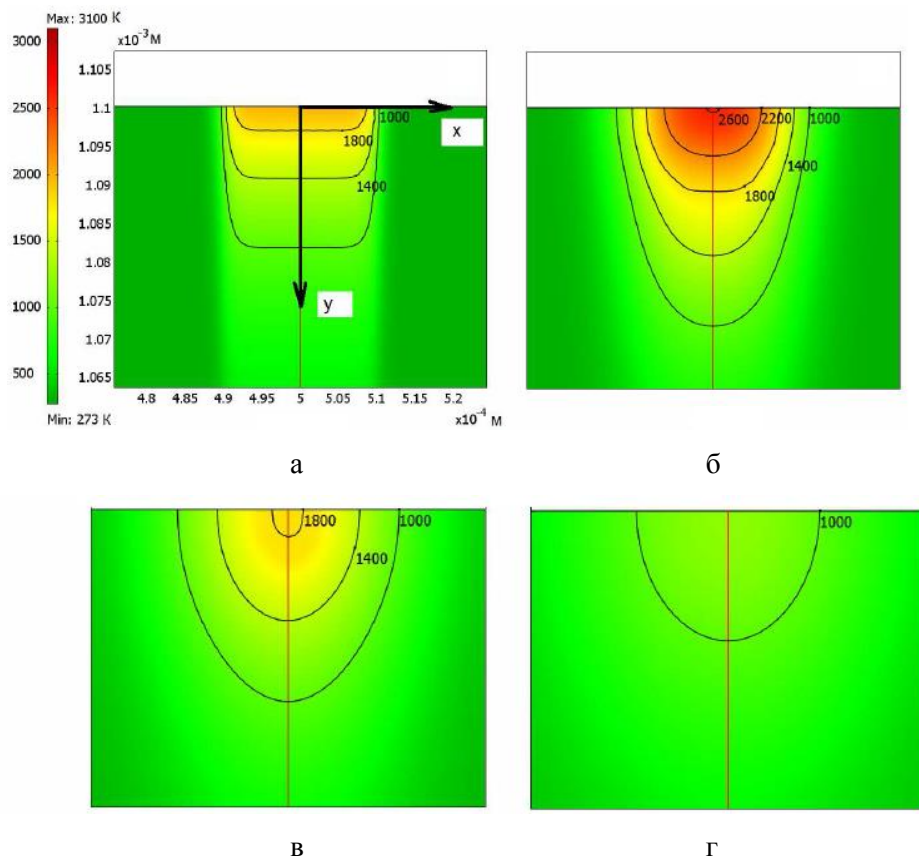


Рис. 5. Динамика изменения изотерм при облучении поверхности образца одиночным импульсом длительностью $\tau = 100$ нс при однородном распределении плотности в лазерном пучке для безразмерного времени, отнесенного к длительности импульса: а – при $t/\tau = 0,6$; б – при $t/\tau = 5$; в – при $t/\tau = 20$; г – при $t/\tau = 50$

Электродуговые плазмотроны используются при термообработке различных материалов, а также в энергетической отрасли для производства плазмы. В работе [9] проведено математическое моделирование физических процессов в дуговом плазмотроне постоянного тока (рис. 6).

Приведем математическое описание физических процессов в плазмотроне [9]. Для ламинарного движения слабо сжимаемого газа аргона, используемого в качестве плазмообразующего газа, уравнения движения Навье – Стокса в пакете COMSOL Multiphysics записываются в виде

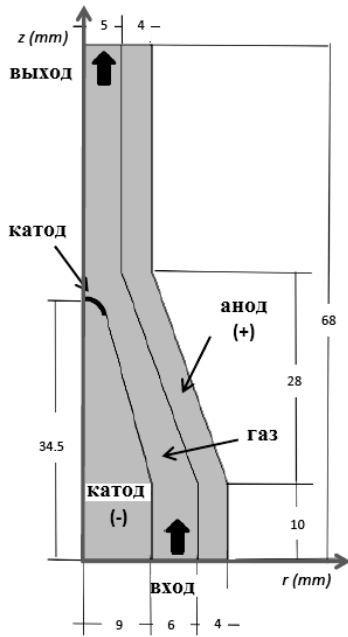


Рис. 6. Схема плазмотрона постоянного тока

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) + \nabla p = \mathbf{F}. \quad (6)$$

Здесь ρ и η – плотность и динамическая вязкость соответственно; $\mathbf{u}$ – вектор скорости; p – давление; $\mathbf{F}$ – вектор массовых сил, включая силы Лоренца.

Уравнение сохранения энергии с учетом уравнения Фурье и конвективного теплообмена имеет вид [9]:

$$\rho c_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla (k \nabla T) + Q, \quad (7)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; Q – объемный источник теплоты, обусловленный джоулевым нагревом за счет протекания электрического тока.

Для стационарных электромагнитных явлений в плазменном факеле используются соотношения для магнитного вектора $\mathbf{A}$ и скалярного электрического потенциала V :

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}, \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V. \quad (9)$$

Уравнения Максвелла для рассматриваемого случая имеют вид:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (10)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (11)$$

$$\nabla \times \mathbf{D} = 0, \quad (12)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0. \quad (13)$$

Уравнение, характеризующее сохранение заряда:

$$\nabla \times \mathbf{J} = 0. \quad (14)$$

В уравнениях Максвелла $\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$ – плотность тока;

$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ – вектор электрической индукции.

Для полного описания электромагнитных процессов, теплопередачи и конвективного теплообмена в плазменном факеле необходимо выразить массовые силы Лоренца и объемные источники теплоты через переменные $\mathbf{J}$, $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$:

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (15)$$

$$Q = \mathbf{J} \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (16)$$

Уравнения (5)-(16) с соответствующими граничными и начальными условиями представляют формулировку рассматриваемого физического процесса в дуговом плазмотроне. Результаты моделирования температурного поля в плазмотроне показаны на рис. 7 [9].

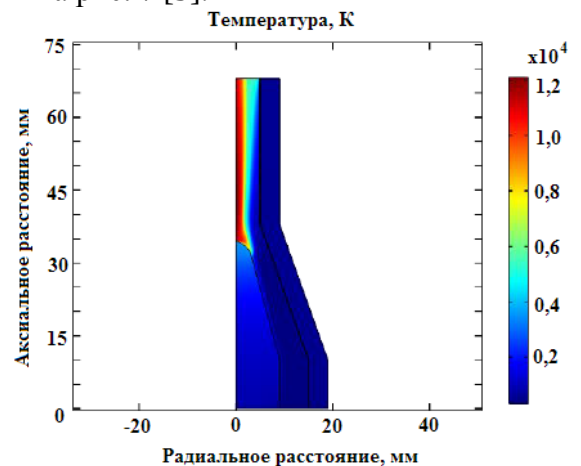


Рис. 7. Распределение температурного поля в плазмотроне

Таким образом, применение программного пакета COMSOL Multiphysics позволяет активно его использовать в научных разработках электротехнологических уста-

новок, а также для обучения студентов современным компьютерным средствам математического моделирования в разных областях науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Е.** Моделирование физических процессов с использованием пакета COMSOL Multiphysics: учеб. пособие / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.

2. **Прахт В.А.** Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. Программа COMSOL / В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, Ф.Н. Сарапулов. М.: Спутник+, 2011. 158 с.

3. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах / В.Е. Анкудинов и др. Ижевск: Ижевский университет, 2014. 108 с.

4. **Потапов Л.А.** COMSOL Multiphysics: Моделирование электромеханических устройств / Л.А. Потапов, И.Ю. Бутарев. Брянск: БГТУ, 2011. 112 с.

5. Введение в COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comsol.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysics_RU52a.pdf. 23.05.2017.

6. Thermal Analysis of Induction Furnace / A.A. Bhat, S. Agarwal, D. Sujish et al. // Fast Reactor Technology Group, Chem-

istry Group. Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam-603102, India. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comsol.com/paper/download/153025/bhat_presentation.pdf. 23.05.2017.

7. Microwave oven [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comsol.com/model/download/403571/models.rf.microwave_oven.pdf. 23.05.2017.

8. Modeling Microwave Heating During Batch Processing of Liquid Sample in a Single Mode Cavity / S. Curet, F. Bellincanta Begnini, O. Rouaud, L. Boillereaux // L'UNAM Université, ONIRIS, CNRS, GEPEA, UMR6144, Nantes, F-44322, FRANCE. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/paper/modeling-microwave-heating-during-batch-processing-of-a-liquid-sample-in-a-singl-25581>. 23.05.2017.

9. **Chinè B.** A 2D Model of a Plasma Torch / B. Chinè // School of Materials Science and Engineering, Costa Rica Institute of Technology, Cartago [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.comsol.com/paper/a-2d-model-of-a-dc-plasma-torch-38252>. 23.05.2017.

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Svetlana G. Kalganova – Dr.Sc., Head: Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Sergey V. Trigorly – PhD, 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.

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

Статья поступила в редакцию 04.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

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.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА СВЧ ЭНЕРГИЕЙ

В.С. Докучаев, В.Ю. Кожевников

ELECTROTECHNOLOGY FOR INTENSIFICATION OF FOAM GLASS FABRICATION USING THE MICROWAVE ENERGY

V.S. Dokuchaev, V.Yu. Kozhevnikov

Рассмотрены особенности получения пеностекла с помощью СВЧ электромагнитного поля и технико-экономические аспекты реализации данного технологического процесса.

Ключевые слова: пеностекло, нагрев, СВЧ излучение

Основной задачей современной СВЧ электротехнологии является широкое внедрение её достижений. Одной из отраслей для этого может быть стекольная промышленность, в значительной степени определяющая уровень развития многих отраслей хозяйства: промышленного и жилищного строительства, автомобильной, авиационной, электронной, пищевой промышленности, медицины, производства товаров народного потребления. При этом она является крупным потребителем сырьевых, топливно-энергетических и трудовых ресурсов [1].

Наиболее значимое направление в стекольной промышленности – создание и совершенствование энергосберегающих технологий. Создание перспективной технологии должно включать коренное совершенствование существующих и разработку принципиально новых стекловаренных агрегатов. При этом большое значение придается разработке и освоению способов активизации теплообменных процессов с учетом совершенствования способов непосредственной передачи энергии в расплав, составов стекол в целях снижения энергозатрат и улучшения технологических свойств стекла на всех стадиях производ-

The article presents the specific features of fabricating the foamed glass with using the microwave electromagnetic field, including the technical and economic aspects of the given process.

Keywords: foamed glass, heat, microwave radiation

ства, внедрению технологии активирования стекольной шихты. Все это позволит обеспечить сокращение удельных расходов топлива при варке стекла.

Сочетание высоких теплоизоляционных свойств при пожарной безопасности, долговечности и экологической чистоте ставит пеностекло практически вне конкуренции с другими теплоизоляционными материалами. Пеностекло – высокопористый ячеистый материал, получаемый спеканием тонкоизмельченного стеклянного порошка и газообразователя. В зависимости от технологии производства пеностекло обладает открытой или закрытой пористостью. Пористость различных видов пеностекла колеблется от 80 до 95%, размеры пор могут быть от 0,1 до 5 мм. Пеностекло выпускают в виде плит (блоков) длиной 200-500 мм, шириной 280-500 мм, толщиной 80, 100, 120 мм.

Изучим возможности переработки бытового и промышленного стеклобоя в высокоэффективные теплоизоляционные материалы без применения карбонатных и углеродсодержащих вспенивателей с использованием СВЧ энергии.

Методика процесса получения вспененного стекла по традиционной технологии

заклучается в следующем. Силикатное натрий-кальциевое стекло измельчается до размера частиц 80 мкм, смешивается с пенообразующей добавкой углеродного или карбонатного типа, помещается в формы из жаропрочной стали и подвергается термообработке. При температуре 750-850°C частицы стекла спекаются, и одновременно в системе происходит выделение газа, вспенивающего композицию, обладающую в этих условиях необходимой вязкостью и пластичностью. Вспененное стекло охлаждается, отжигается, и готовые блоки разрезаются на изделия требуемой формы.

Сырьевыми материалами для производства пеностекла являются стекло и газообразователь. Для производства пеностекла можно использовать отходы стекольного производства и гранулы стекла, навариваемого специально для вспенивания. Отходы стекольного производства пригодны в том случае, если они однородны по химическому составу и не загрязнены инородными включениями. Для обеспечения крупного производства пеностекла отходов, как правило, не хватает, и стекло наваривают в ваннах печах и затем гранулируют. Грануляцию стекла можно производить любым способом, однако предпочтительнее мокрая грануляция, так как после нее стекло легче поддается измельчению. Для производства теплоизоляционного пеностекла применяют углеродные газообразователи, тип и количество которых зависит от состава исходного стекла и от требований к готовой продукции. Кусковой газообразователь дробят в дробилке любого типа.

При установлении рецептуры шихты для варки стекла необходимо учитывать, что лучше всего вспенивать стекло, имеющее малую скорость затвердевания и не кристаллизующееся в температурном интервале вспенивания. Шихту готовят путем тонкого измельчения и тщательного смешивания стекла и газообразователя. При этом чем тоньше измельчен газообразователь и чем равномернее он распределен в стекле, тем мельче и равномернее поры и, следовательно, лучше физико-механические свойства материала. Помол

влияет также и на температуру вспенивания. Установлено, что чем тоньше помол, тем при прочих равных условиях ниже температура вспенивания.

Тщательное перемешивание достигается совместным помолом стекла и газообразователя в шаровых мельницах.

Недостатками этого процесса производства являются длительный (до 20 ч) производственный цикл и применение углеродных пенообразователей, в частности антрацита, содержащего в своем составе до 1,5 мас. % элементарной серы, снижающей экологическую безопасность материала и исключающей возможность применения такого материала для внутренней отделки жилых и служебных помещений. Кроме того, в результате процесса разрезания и формования блоков пеностекла заданной формы и размеров образуется большое количество отходов, доля которых доходит до 20% от объема готовой продукции.

Авторами работы [3] разработан упрощенный способ производства пеносиликатного материала из отходов (стеклобоя) при одновременном повышении его экологической безопасности за счет отказа от применения углеродных пенообразователей.

Процесс получения пеностекла из отходов заключается в приготовлении порошкообразной смеси стеклобоя и метасиликата натрия при следующем соотношении компонентов, мас. %: стеклобой 60-70, метасиликат натрия 30-40. Смесь стеклобоя и сухого метасиликата натрия (ТУ 6-09-5337-87) размалывают в шаровой мельнице, просеивают через сито с диаметром ячейки не более 100 мкм. После просева в состав вводят вспенивающую добавку, в нашем случае это алюминиевая пудра ПАН-1 (ГОСТ 5494-85), и перемешивают. После приобретения составом однородной цветовой гаммы в результате перемешивания полученную шихту засыпают в механическую мешалку и увлажняют дистиллированной водой до придания влажности смеси от 7 до 12%. По окончании перемешивания в мешалке шихту помещают в форму из радиопрозрачного материала – контейнер из фторопласта с крышкой [4]. Контейнер поме-

щается в СВЧ печь (мощность 700 Вт, частота излучения 2,47 ГГц). Опытным путем были определены наиболее благоприятные

технологические режимы обработки в СВЧ печи (рис. 1).

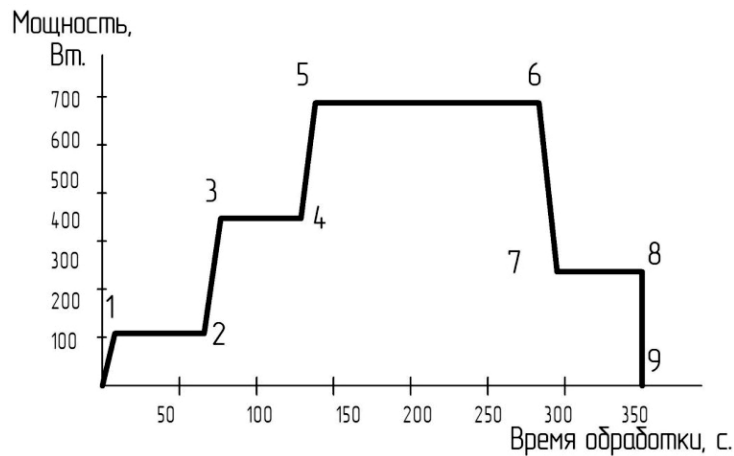


Рис. 1. Технологический режим обработки шихты в СВЧ печи

Согласно рис. 1 в технологическом режиме обработки шахты в СВЧ печи можно выделить следующие участки:

0-1 – начало воздействия СВЧ излучения на обрабатываемый материал, мощность излучения 120 Вт;

1-2 – участок предварительного нагрева шихты, выдержка при выходной мощности магнетрона 120 Вт в течение 70 с;

2-3 – переходной участок, увеличение выходной мощности до 480 Вт;

3-4 – участок начала процесса вспенивания, выходная мощность 480 Вт, продолжительность обработки 60 с;

4-5 – переходной участок, увеличение выходной мощности до 700 Вт;

5-6 – участок интенсивного вспенивания, в процессе обработки происходит интенсивное удаление влаги, увеличение объема и, как следствие, потеря массы. При обработке в этих условиях формируется вспененный блок стеклообразного материала, занимающий весь объем контейнера. Обработка на этом участке происходит на максимальной выходной мощности магнетрона 700 Вт, время выдержки 120 с;

6-7 – снижение выходной мощности до 300 Вт, переход на участок стабилизации;

7-8 – участок стабилизации, выходная мощность 300 Вт, продолжительность обработки 60 с. Этот участок способствует снятию внутренних напряжений и равно-

мерному просушиванию блока пеностекла от остатков влаги;

8-9 – выключение печи, остывание блока.

После обработки в СВЧ печи материал приобретает пористую структуру, представленную на рис. 2 и 3, причем увеличение объема составляет 170-230%, потери по массе находятся в пределах 25-27%, что связано, скорее всего, с испарением водной составляющей смеси в процессе формирования пористой структуры. Варьирование долевого содержания метасиликата натрия в сухой шихте от 30 до 40 мас. % позволяет варьировать диаметр пор пеностекла от 0,5 до 3,5 мм, что приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности материала от 86 до 34 мВт/(м·К). Стоит отметить, что у образцов, имеющих диаметр поры более 4 мм, наблюдается резкое снижение прочностных характеристик, что затрудняет использование крупнопористого материала в качестве надежного теплоизоляционного материала.

После формования в СВЧ печи и извлечения из контейнера вспененные блоки подвергаются термической обработке в муфельной печи в течение 1,5-2 ч при температуре 300-550°C с целью повышения прочностных характеристик и увеличения водостойкости. Значения коэффициентов теплопроводности в зависимости от размера пор представлены в табл. 1.

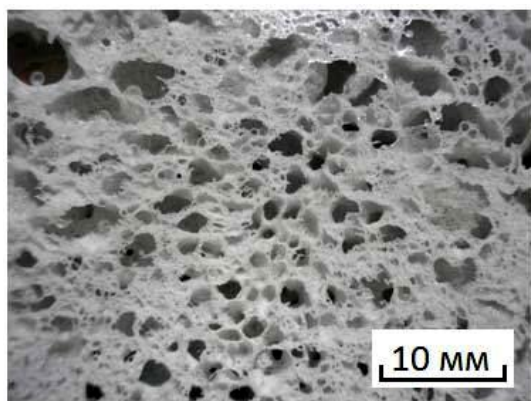


Рис. 2. Структура теплоизоляционного материала, сформированного в СВЧ печи



Рис. 3. Блоки пеностекла, полученного в СВЧ печи

Таблица 1

Значения коэффициентов теплопроводности

Пример	Средний диаметр поры, мм	Пористость	Коэффициент теплопроводности, мВт/(м·К)	Термостойкость, °С
1	0,5	0,81	85,7	650
2	1,0	0,89	45,7	
3	3,0	0,906	38,8	
4	3,5	0,925	33,9	

Полученные блоки характеризуются аморфным состоянием вне зависимости от содержания алюминия в шихте и от температуры термической обработки.

При проектировании предприятия по производству пеностекла с помощью СВЧ энергоподвода, проводится технико-экономический расчет.

Пусть речь идет о производстве со следующими показателями: $T_{р.ч.}$ – количество рабочих часов в месяц (производственный календарь за 2017 год с учетом того, что рабочая смена длится 8 часов); $V_{пр.ч.} = 3 \text{ м}^3/\text{ч}$ – объем продукции, выпускаемой в час; $C_{ст.с.} = 3 \text{ тыс. руб./м}^3$ – стоимость сырья (среднее значение); $P = 27 \text{ кВт}$ – мощность установки; $C_{эл.э.} = 3,2 \text{ р/кВт·ч}$ – стоимость электроэнергии (2017 г.); $C_{от} = 24,78 \text{ руб./м}^2$ – стоимость тарифа на отопление; $S = 80 \text{ м}^2$ – отапливаемая площадь; $T = 10,0 \text{ тыс. руб.}$ – тарифная ставка; $k = 15\%$ – районный коэффициент; $K = 3200 \text{ тыс. руб.}$ – стоимость установки.

Тогда затраты на сырье составят:

$$Z_c = (C_{ст.с.} \cdot V_{пр} \cdot v_{инф}) + (C_{ст.с.} \cdot V_{пр}), \quad (1)$$

где $V_{пр}$ – объем продукции в месяц; $v_{инф} = 0,06$ – процент инфляции.

Объем продукции каждый месяц будет разным, так как в каждом месяце разное количество рабочих дней, и составит

$$V_{пр} = T_{р.ч.} \cdot V_{пр.ч.} \quad (2)$$

Затраты на электроэнергию определяются соотношением

$$Z_{эл.э.} = C_{эл.э.} \cdot P \cdot T_{р.ч.}, \quad (3)$$

затраты на отопление – соотношением

$$Z_{от.} = C_{от.} \cdot S, \quad (4)$$

заработная плата определится по соотношению

$$Z_{зн} = T \cdot (T \cdot k). \quad (5)$$

Объем страховых выплат формируется из взносов в Пенсионный фонд России, Фонд социального страхования, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования и составляет соответственно:

взнос ПФР – 22%; взнос ФСС – 2,9%; взнос ФФОМС – 5,1%.

Таким образом, страховые выплаты составляют

$$З_{с.в.} = T \cdot H, \quad (6)$$

где $H = ПФН + ФСС + ФФМОС$ – страховые взносы.

Потери от брака примем $v_b = 3\%$ от всей месячной продукции:

$$П_{бр} = V_{np} \cdot v_b \cdot C_{см.с.} \quad (7)$$

Затраты на вспомогательное оборудование и материалы определяются соотношением

$$З_{о.м.} = K v_{м.}, \quad (8)$$

где $v_{м.} = 5\%$ – процент от стоимости установки.

Амортизация основного капитала составит

$$C_a = K \cdot y_a, \quad (9)$$

где $y_a = 5\%$ – норма амортизационных отчислений.

Выручка от реализации продукции определяется соотношением

$$B = C_{np} \cdot k_p, \quad (10)$$

где $k_p = 1,5$ – коэффициент рентабельности производства.

Валовая прибыль от производства составит

$$П_{вал} = B - C_{np}. \quad (11)$$

Налог на прибыль определяется соотношением

$$H_n = П_{вал} \cdot k_n, \quad (12)$$

где k_n – налоговая ставка по налогу на прибыль.

Согласно ст. № 284 НК РФ налоговая ставка по налогу на прибыль равна 20%.

Налог на имущество равен

$$H_{им} = (K - C_a) \cdot 0,22, \quad (13)$$

где C_a – амортизационные вложения.

Чистая прибыль определяется соотношением

$$П_{чист} = П_{вал} - H_n - H_{им}. \quad (14)$$

Коэффициент дисконтирования равен

$$\alpha_t = \frac{1}{(1 + E)^t}, \quad (15)$$

где $E = 0,1$ – норма дисконтирования, так что

$$\alpha_1 = 0,99; \quad \alpha_2 = 0,98; \quad \alpha_3 = 0,97;$$

$$\alpha_4 = 0,96; \quad \alpha_5 = 0,95; \quad \alpha_6 = 0,94;$$

$$\alpha_7 = 0,93; \quad \alpha_8 = 0,92; \quad \alpha_9 = 0,91;$$

$$\alpha_{10} = 0,9; \quad \alpha_{11} = 0,89; \quad \alpha_{12} = 0,88.$$

Наконец, чистый дисконтированный доход равен

$$ЧДД = П_{чист} \cdot \alpha_t. \quad (16)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Итак, проанализирован способ получения вспененного стекломатериала с использованием СВЧ активации процесса формирования стеклоблоков [5]. Установлено, что основными положительными результатами процесса получения теплоизоляционного материала с помощью СВЧ энергии является сочетание экологически чистого производства и уменьшение длительности процесса формирования пеностекла (общая длительность процесса получения пеностекла составляет не более 3 ч, а форма блоков зависит от типа используемого радиопрозрачного контейнера). Полученные блоки характеризуются аморфным состоянием вне зависимости от содержания алюминия в шихте и от температуры дополнительной термической обработки в муфельной печи.

Приведен пример технико-экономического расчета предприятия по производству пеностекла. Результаты технико-экономического расчета приведены в табл. 2 и показывают, что подобное предприятие окупается к концу третьего квартала первого года работы. В дальнейшем требуется оптимизация технологии производства пеностекла с СВЧ энергоподводом.

Таблица 2

Технико-экономический расчет предприятия по производству пеностекла

Производство пеностекла	Затраты по месяцам											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Перечень статей инвестиционных затрат												
1. Покупка и установка оборудования (с НДС), тыс. руб.	3200											
Итого потребность в инвестициях, руб.	3200											
Определение себестоимости продукции												
1. Затраты на сырье (материалы), тыс. руб.	612,9	648,9	792,9	720,9	720,9	756,9	756,9	828,9	756,9	792,9	756,9	756,9
2. Заработная плата персонала, тыс. руб.	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
3. Затраты на электроэнергию, тыс. руб.	11,75	12,44	15,20	13,82	13,82	14,51	14,51	15,89	14,51	15,2064	14,51	14,51
4. Затраты на отопление, тыс. руб.	2	2	2	2	0	0	0	0	0	2	2	2
5. Стоимость вспомогательных материалов, тыс. руб.	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
6. Потери от брака, тыс. руб.	30,6	32,4	39,6	36	36	37,8	37,8	41,4	37,8	39,6	37,8	37,8
7. Отчисления на социальное страхование, тыс. руб.	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45
8. Амортизация основного капитала, тыс. руб.	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Итого себестоимость продукции, тыс. руб.	957,20	995,69	1149,65	1072,67	1070,67	1109,16	1109,16	1186,14	1109,16	1149,65	1111,16	1111,16
Выручка от реализации продукции, тыс. руб.	1435,80	1493,53	1724,48	1609,01	1606,01	1663,74	1663,74	1779,22	1663,74	1724,48	1666,74	1666,74
Итого валовая прибыль, тыс. руб.	478,60	497,84	574,82	536,33	535,33	554,58	554,58	593,07	554,58	574,82	555,58	555,58
Налог на прибыль, тыс. руб.	95,720	99,56	114,96	107,26	107,06	110,91	110,91	118,61	110,91	114,96	111,11	111,11
Налог на имущество, тыс. руб.	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
Итого чистая прибыль, тыс. руб.	339,38	354,77	416,36	385,56	384,76	400,16	400,16	430,95	400,16	416,36	400,96	400,96
Коэффициент дисконтирования	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88
Итого экономический эффект с учетом дисконтирования, тыс. руб.	335,98	347,68	403,87	370,14	365,53	376,16	372,15	396,48	364,15	374,73	356,86	352,85
Итого суммарный экономический эффект, тыс. руб.	-2864	-2516,3	-2112,4	-1742,3	-1377	-1001	-628,5	-232	132,16	506,89	863,75	1216,6

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство и применение пено-стекла / Б.К. Демидович и др. Минск: Наука и техника, 1972. 302 с.

2. Mathis. Microwave Synthesis using Multicomponent and Multiphasic Systems / Mathis // Ph. D. Thesis. Pennsylvania State University. University Park, Pa., 1997.

3. Перспективы использования энергии СВЧ излучения в процессах создания керамических и металлокерамических компози-тов / А.Ф. Ильющенко и др. // Инженерия поверхности. Новые порошковые компози-ционные материалы. Сварка: сб. докл. Междунар. симп. Минск: Ин-т порошковой металлургии, 2009. С. 78-82.

4. Теплоизоляционные силикатные вы-сокопористые материалы, формируемые с использованием термического нагрева и микроволнового излучения / А.В. Павленок и др. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: IV Меж-дунар. науч.-техн. конф. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2009. С. 168-170.

5. Способ получения пеностекла: па-тент. № 11711 Респ. Беларусь, МПК С 03С 11/00 / Е.И. Гришкова, Е.Н. Подденежный, А.В. Павленок, А.А. Бойко, Я.О. Шаблов-ский; заявитель ГГТУ им. П.О. Сухого.

Докучаев Валерий Сергеевич – маги-странт кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государ-ственного технического университета име-ни Гагарина Ю.А.

Кожевников Вячеслав Юрьевич – канди-дат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного техниче-ского университета имени Гагарина Ю.А.

Valery S. Dokuchaev – Master Student, De-partment of Power Supply and Electrotechnol-ogies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav Yu. Kozhevnikov – PhD, Asso-ciate Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

**КОНЦЕПЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ
ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ**

А.А. Анашкин, Г.Г. Угаров

**THE CONCEPT OF ENERGY CONSERVATION
IN THE FIELD OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION
OF UNDERGROUND METAL PIPELINES**

A.A. Anashkin, G.G. Ugarov

Рассмотрена концепция энергосбережения в области электрохимической защиты подземных сооружений, ориентированная на структуру локального контура автоматического управления противокоррозионными техническими средствами в границах защитной зоны одной катодной станции. Концепция базируется на периодически повторяемом определении оптимальных с позиций энергетической эффективности параметров противокоррозионной защиты для конкретного защищаемого участка подземного сооружения. Изложен алгоритм автоматического определения рабочего значения потенциала и допустимого диапазона его регулирования путём построения кривых Тафеля применительно к особенностям конкретного участка защищаемого сооружения и условиям его эксплуатации. Рассмотрена функциональная связь между защитным потенциалом подземного сооружения и потребляемой мощностью катодной станции. Приведены примеры количественной оценки энергетической эффективности рассматриваемой концепции энергосбережения.

Ключевые слова: подземное металлическое сооружение, средства электрохимической защиты, станция для катодной защиты, защитный потенциал, защитный ток, выходной ток катодной станции, потребляемая мощность, выходная мощность, уравнение Тафеля, кривая Тафеля, градиент потенциала по логарифму тока, диапазон регулирования защитного потенциала

The article considers the concept of energy saving in the field of electrochemical protection of underground structures. The work focuses on the structure of the local loop to automatic control of anticorrosive technical means within the protective zone of a single cathode station. The concept is based on the circulating determination of optimum anti-corrosion protection parameters for a particular protected section of an underground structure in terms of energy efficiency. The authors describe an algorithm to automatically determine the working value of the potential or permissible range of its regulation by constructing the Tafel curves with reference to the features of a particular section in the protected structure and its operation conditions. The functional relationship between the protective potential of an underground structure and power consumption at a cathode station is considered. The provided examples refer the quantitative assessment of energy efficiency of the given energy saving concept.

Keywords: underground metal structure, electrochemical protection means, station for cathode protection; protective potential, protective current, cathode output current, power consumption, output power, Tafel equation, Tafel curve, logarithmic potential gradient, protective potential control range

Многолетний опыт эксплуатации средств электрохимической защиты (ЭХЗ) подземных металлических сооружений (ПМС) показал, что важным критерием оптимизации противокоррозионной защиты является энергетическая эффективность используемого электрооборудования. Из известных нам существующих концепций энергосбережения в области ЭХЗ можно выделить концепции структурно-параметрической оптимизации работы станций для катодной защиты (СКЗ) [1] и импульсного регулирования защитного потенциала ПМС [2]. Согласно первой концепции управление осуществляется совокупностью СКЗ, режим работы каждой из которых, вплоть до её полного отключения, выбирается по результатам коррозионного дистанционного мониторинга распределения защитного потенциала вдоль трубопровода. Алгоритм управления процессом ЭХЗ решает задачу выборочного отключения отдельных катодных станций, снижая тем

самым усреднённое энергопотребление всей группы управляемого оборудования. При этом мониторинг состояния ПМС и управление параметрами катодных станций осуществляется централизованно. Согласно второй концепции снижение энергопотребления обусловлено импульсным характером подаваемого на ПМС выходного напряжения СКЗ, что вытекает из известной зависимости между амплитудным и средним значениями импульсного сигнала. При этом управление процессом ЭХЗ осуществляют также группой катодных станций, сдвигая по фазе подаваемое на них напряжение.

Нами предлагается концепция энергосбережения в области ЭХЗ, ориентированная на структуру локального в границах защитной зоны одной СКЗ контура автоматического управления электротехническим комплексом ЭТК, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

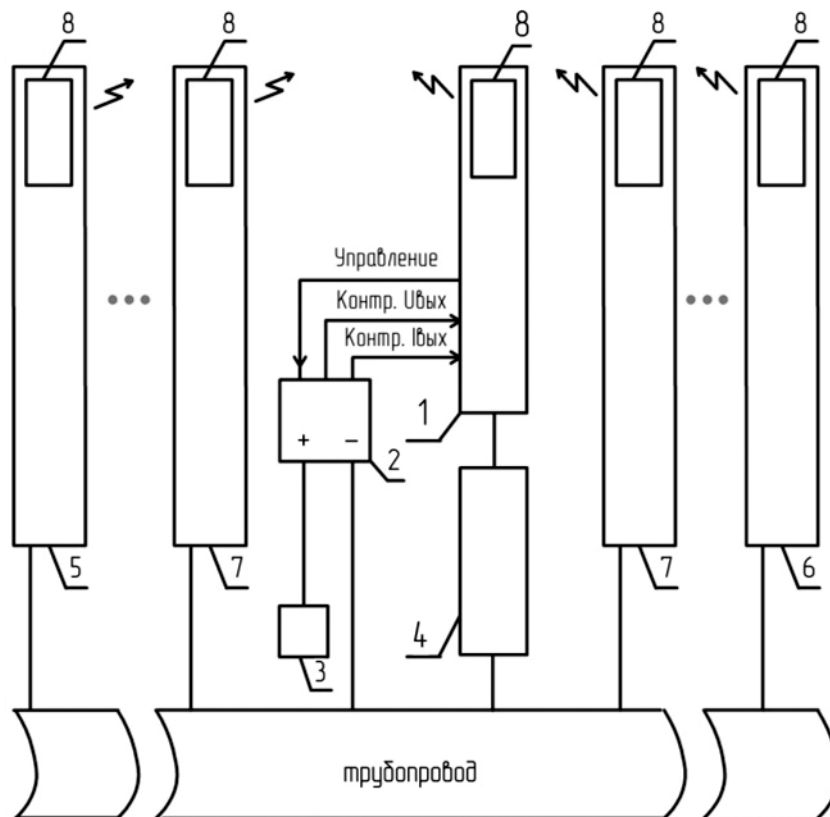


Рис. 1. Функциональная схема электротехнического комплекса: 1 – станция управления; 2 – станция для катодной защиты; 3 – анодный заземлитель; 4 – базовый измерительный пункт; 5 – первый удалённый измерительный пункт; 6 – второй удалённый измерительный пункт; 7 – линейный измерительный пункт; 8 – приёмопередатчик

В состав ЭТК входят: станция управления (СУ), станция для катодной защиты (СКЗ), анодный заземлитель (АЗ), базовый измерительный пункт (БИП), размещённый вблизи точки дренажа, два удалённых измерительных пункта (УИП1 и УИП2) с автономным питанием, размещённые на границах зоны действия СКЗ по одну и по другую от неё стороны вдоль трубопровода, комплект линейных измерительных пунктов (ЛИП) с автономным питанием, расположенных между базовым и удалёнными измерительными пунктами, канал связи (КС) между ЛИП, УДИП1, УДИП2 и СУ, оснащёнными приёмопередатчиками (ППР).

Известно, что потребляемая СКЗ мощность определяется выражением

$$P_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta} + P_{\text{су}} + P_{\text{хх}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность СКЗ; η – КПД; $P_{\text{су}}$ – потери на питание схемы управления СКЗ; $P_{\text{хх}}$ – потери холостого хода.

В свою очередь, выходная мощность СКЗ пропорциональна квадрату её выходного тока, выполняющего роль защитного тока:

$$P_{\text{вых}} = (I_{\text{вых}})^2 R_n = (I_{\text{защ}})^2 R_{\text{экв}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность СКЗ; $I_{\text{вых}}$ – выходной ток СКЗ; R_n – сопротивление нагрузки СКЗ; $I_{\text{защ}}$ – защитный ток трубопровода; $R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление протеканию защитного тока.

При этом формируемый СКЗ защитный ток трубопровода $I_{\text{защ}}$ зависит от расчётной плотности защитного тока $J_{\text{защ}}$ и суммарной площади участка трубопровода, защищаемого данной СКЗ [3]:

$$I_{\text{защ}} = \alpha J_{\text{защ}} \Sigma S_{\text{нов.тр.}}, \quad (3)$$

где α – коэффициент неравномерности распределения плотности тока по длине ПМС; $J_{\text{защ}}$ – плотность защитного тока (А/м^2); $\Sigma S_{\text{нов.тр.}}$ – суммарная поверхность трубопровода в пределах защитной зоны СКЗ (м^2).

В соответствии с уравнением Тафеля [4]

$$|U_{\text{зн}}| = a + b \log(J_{\text{защ}}), \quad (4)$$

где $|U_{\text{зн}}|$ – абсолютная величина текущего значения защитного потенциала; a и b – константы Тафеля; $\log(J_{\text{защ}})$ – десятичный логарифм плотности защитного тока.

Константа a является величиной перенапряжения для единичной плотности защитного тока $J_{\text{защ}} = 1 \text{ А/м}^2$ и определяет начальное смещение по оси ординат графика, отражающего выражение (4) и именуемого кривой Тафеля. Для металлов группы железа типовое значение константы a находится в пределах 0,6-0,7 В. Константа b определяет угол наклона кривой Тафеля, и её типовое значение находится в пределах 0,11-0,13 В. График кривой Тафеля имеет характерную точку резкого изменения крутизны наклона (точку излома), отражающую переход электрохимического процесса восстановления кислорода в нежелательный процесс восстановления воды с выделением газообразного водорода.

Предлагаемая нами концепция энергосбережения предполагает периодически повторяемое автоматическое определение минимально допустимого защитного потенциала, дальнейшая стабилизация которого в точке дренажа обеспечит гарантированную защиту участков трубопровода, расположенных на границе защитной зоны СКЗ. Последовательность и содержание операций, составляющих алгоритм управления средствами ЭТК, приведены ниже, а поясняющие суть концепции графические материалы, приведены на рис. 2, где отражены кривые Тафеля для различных участков ПМС.

Алгоритм управления техническими средствами, входящими в состав ЭТК (рис. 1), заключается в автоматическом чередовании контрольного цикла КЦ и рабочего цикла РЦ. При этом интервал времени между контрольными циклами КЦ, составляющий длительность рабочего цикла РЦ, устанавливается работником службы ЭХЗ с учетом особенностей условий эксплуатации конкретного ПМС и его параметров. РЦ может составлять от одного до трёх месяцев.

На рис. 2 f_1, f_2, f_3 – кривые Тафеля, полученные для участка ПМС вблизи точки дренажа (f_1), для участка ПМС вблизи

УИП1 (f_2), для участка ПМС вблизи УИП2 (f_3); $U_{зп.мд.}$ – минимально допустимое нормативное значение потенциала ($-0,85$ В); $I_{кз1}$, $I_{кз2}$, $I_{кз3}$ – логарифмы значений плотности выходного тока СКЗ, соответствующие пересечению кривых f_1 , f_2 , f_3 уровня ($-0,85$ В); $U_{зп.в.}$ – верхняя граница зоны регулирования защитного потенциала в точке дренажа, соответствующая «точке излома» кривой Тафеля f_1 ; $I_{кз.в.}$ – логарифм плотности выходного тока СКЗ, соответствующе-

го $U_{зп.в.}$; $U_{зп.н.}$ – нижняя граница зоны регулирования защитного потенциала в точке дренажа; $U_{зп.р.}$ – рабочее значение защитного потенциала в точке дренажа; $I_{кз.р.}$ – логарифм плотности выходного тока СКЗ, соответствующий $U_{зп.р.}$; $I_{кз.нр.}$ – логарифм предельной плотности выходного тока СКЗ; Начальная точка кривых f_1 , f_2 , f_3 смещена по оси ординат на величину, равную константе «а» уравнения Тафеля ($-0,65$ В).

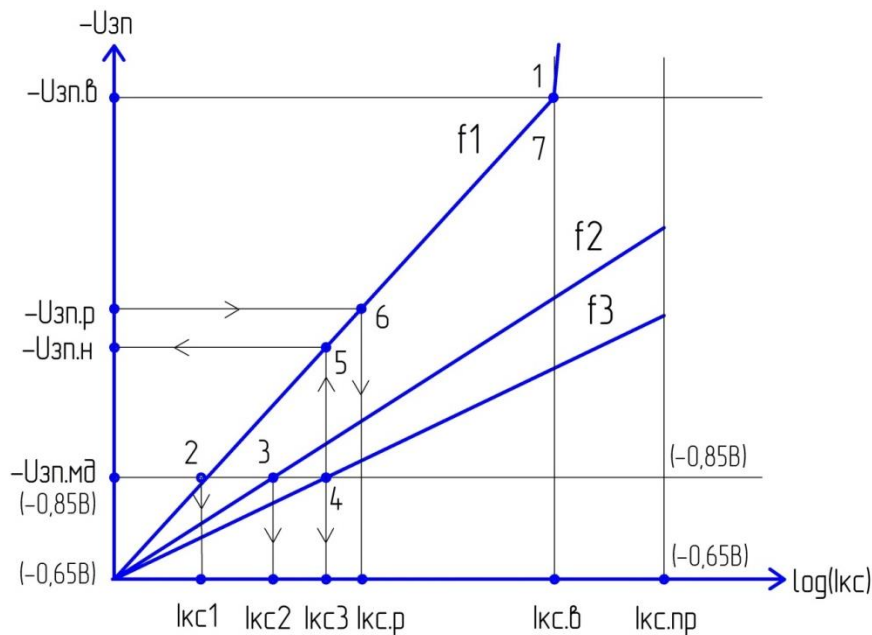


Рис. 2. Поляризационные кривые (кривые Тафеля) для различных участков ПМС

В ходе выполнения КЦ осуществляется: пошаговое формирование на выходе СКЗ дискретно возрастающих значений защитного тока $I_{кзi}$; вычисление логарифма данного значения тока; измерение текущих значений защитного потенциала $U_{зпi}$, соответствующих каждому значению $\log(I_{кзi})$. В результате выполнения указанных действий снимаются кривые Тафеля, обозначенные на рис. 2 – f_1 , f_2 , f_3 . При этом кривая f_1 соответствует участку ПМС, расположенному вблизи точки дренажа, кривая f_2 соответствует участку ПМС, расположенному вблизи УИП1, а кривая f_3 соответствует участку ПМС, расположенному вблизи УИП2. Коэффициент a уравнения Тафеля (4) принят равным типовому значению ($-0,65$ В) и учтён на рис. 2 смещением по оси ординат начального потенциала

кривых f_1 , f_2 , f_3 . Коэффициент b уравнения Тафеля (4) принят равным типовому значению $0,12$ В. База данных, формируемая в памяти станции управления СУ в процессе снятия кривых f_1 , f_2 , f_3 , содержит для каждого шага: значение плотности тока $I_{кзi}$ значение $\log(I_{кзi})$, значение защитного потенциала $U_{зпi}$. Наряду с этим в памяти СУ сохраняются для каждого шага: приращение логарифма плотности тока $\Delta \log(I_{кзi})$, приращение защитного потенциала $\Delta|U_{зпi}|$, значение градиента потенциала по логарифму плотности тока V_i :

$$V_i = \frac{\Delta|U_{зпi}|}{\Delta \log(I_{кзi})}. \quad (5)$$

Пошаговое увеличение выходного тока СКЗ прекращается после того, как очередное

текущее значение тока $I_{кci}$ превысит предельное для данной модели СКЗ значение. После этого СКЗ автоматически переходит в исходное состояние с нулевыми значениями выходного напряжения и выходного тока. Полученные и сохранённые в памяти СУ в ходе снятия кривых Тафеля данные (f_1, f_2, f_3) подвергаются программными средствами СУ математической обработке, в результате которой определяются:

- верхнее допустимое значение защитного потенциала $U_{зн.в.}$;
- нижнее допустимое значение защитного потенциала $U_{зн.н.}$;
- рабочее значение потенциала $U_{зн.р.}$.

В качестве верхнего значения потенциала $U_{зн.в.}$ принимается текущее значение потенциала, соответствующие «точке излома» кривой f_1 , для которой характерно резкое изменение градиента потенциала по логарифму тока V_i (точка 1 на рис. 2).

Определение нижнего значения потенциала $U_{зн.н.}$ осуществляется последовательным выполнением следующих действий: выбирается наибольшее из значений плотности тока $I_{кci}$, при котором каждая из кривых f_1, f_2, f_3 пересекает регламентируемое документом ГОСТ ИСО 9.602-2005 минимально допустимое значение $U_{зн.мд} = -0,85$ В. Точки пересечения каждой из кривых f_1, f_2, f_3 уровня « $-0,85$ В» обозначены на рис. 2 соответственно точками: 2, 3, 4, а соответствующие им значения плотности выходного тока СКЗ обозначены на рис. 2 соответственно: $I_{кc1}, I_{кc2}, I_{кc3}$. Наибольшим из этих токов является ток $I_{кc3}$, поэтому выбрано значение $\log(I_{кc3})$, которому соответствует точка 4. Далее определяется точка пересечения перпендикуляра, восстановленного из точки 4 до пересечения с кривой f_1 (точка 5 на рис. 1). Значение защитного потенциала, соответствующее точке 5, принимается для данного ПМС в качестве нижнего допустимого значения потенциала $U_{зн.н.}$. Рабочее значение потенциала $U_{зн.р.}$ должно выбираться вблизи значения $U_{зн.н.}$, но в пределах допустимого диапазона регулирования

$$|U_{зн.н.}| < |U_{зн.р.}| < |U_{зн.в.}|. \quad (6)$$

Рабочее значение выходного тока $I_{кc.p.}$ определяется проецированием точки 6 (рис. 2) на ось $\log(I_{кc})$. Предельное значение тока СКЗ обозначено на рис. 2 $I_{кc.np.}$.

В ходе выполнения рабочего цикла значение защитного потенциала поддерживается на уровне $U_{зн.р.}$. При этом техническими средствами удалённых измерительных пунктов, расположенных на границах защитной зоны СКЗ, и техническими средствами линейных измерительных пунктов, распределённых между СКЗ и удалёнными измерительными пунктами, периодически, с интервалом не более чем раз в сутки, измеряется текущее значение потенциала ПМС, сравнивается с минимальным нормативным значением ($-0,85$ В). При обнаружении снижения текущего потенциала ниже нормативного ($-0,85$ В) соответствующим измерительным пунктом (удалённым или линейным) в СУ передаётся аварийное сообщение, при поступлении которого техническими средствами СУ осуществляется повышение $U_{зн.р.}$ до нового значения, обеспечивающего уровень потенциала на границах защитной зоны СКЗ не ниже значения ($-0,85$ В). После этого выполнение рабочего цикла продолжается.

Вся информация, содержащаяся в памяти СУ, является доступной для считывания в любой момент времени по запросу из центрального диспетчерского пункта, но управление мониторингом распределения потенциала вдоль ПМС в пределах защитной зоны СКЗ и управление режимами работы СКЗ осуществляется автономно в пределах локального контура управления средствами ЭТК. При возникновении аварийной ситуации система управления ЭТК незамедлительно передаёт в центральный диспетчерский пункт соответствующее сообщение.

Для количественной оценки энергетической эффективности предлагаемой концепции энергосбережения необходимо использовать уравнение (4) и типовые значения констант Тафеля. Так, изменение плотности тока в 2 раза вызовет изменение защитного потенциала $U_{зн.р.}$ на величину, равную $0,3\epsilon$, где ϵ – константа Тафеля, то есть на величину $0,12 \text{ В}/3 = 0,04 \text{ В}$. Если же необходимо

изменить $U_{зп.р.}$ на величину, равную константе в Тафеля (на 0,12 В), то плотность тока надо изменить в 10 раз.

При этом нормативный диапазон регулирования защитного потенциала, регламентируемый ГОСТ ИСО 9.602-2005, составляет 0,3 В.

Таким образом, даже незначительное снижение «Уставки» рабочего потенциала $U_{зп.р.}$, равное 10% от диапазона его регулирования, позволяет в 2 раза снизить плотность защитного тока, а в соответствии с выражением (3) снизить и выходной ток СКЗ. В то же время потребляемая мощность СКЗ в соответствии с выражениями (1) и (2) зависит от квадрата выходного тока СКЗ, что значительно усиливает эффект экономии электроэнергии. Предлагаемая концепция позволяет определить реальный диапазон регулирования защитного потенциала для конкретного ПМС ($\Delta U_{зп.}$) и выбрать значение рабочего потенциала $U_{зп.р.}$ как можно ближе к минимальному пределу $U_{зп.н.}$, что обуславливает существенное снижение выходного тока СКЗ, обеспечивающего защиту ПМС по всей его длине при минимальном потреблении электроэнергии.

Итак, предложенная авторами концепция энергосбережения в области ЭХЗ [5, 6] ориентирована на автономную структуру локального контура автоматического

управления средствами ЭХЗ в границах защитной зоны одной катодной станции. Важным достоинством предлагаемой концепции является свойство автоматического выбора оптимальных для конкретного ПМС режимов защиты с последующей их автоматической корректировкой при воздействии дестабилизирующих внешних факторов. Для концепций, ориентированных на управление группой СКЗ [1, 2], сбой в работе системы управления может привести к потере работоспособности всех управляемых данной системой объектов, результатом чего может быть утрата коррозионной защиты ПМС значительной протяжённости. Предлагаемая нами концепция лишена данного недостатка, так как ориентирована на защиту небольшого участка ПМС, ограниченного защитной зоной только одной СКЗ. Кроме того, объём и трудоёмкость обработки большого массива данных, полученных в ходе мониторинга состояния ПМС большой протяжённости и установленного на нём большого количества оборудования, присущих концепциям [1, 2], несоизмеримо больше, чем для предлагаемой нами концепции. Данное обстоятельство обеспечивает более высокую оперативность предлагаемой концепции, простоту её эксплуатации и более высокую надёжность работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никулин С.А.** Повышение эффективности предотвращения коррозии нефтегазопроводов на основе оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.А. Никулин. Ухта: УГТУ, 2015. 22 с.

2. **Кривцов А.О.** Электротехнический комплекс с импульсно-непрерывным регулированием напряжения для защиты от коррозии металлических трубопроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.О. Кривцов. Новочеркасск: РГУПС, 2011. 18 с.

3. **Экилик Г.Н.** Электрохимические методы защиты металлов: метод. пособие

по спецкурсу / Г.Н. Экилик. Ростов-н/Д.: РГУ, 2004.

4. **Дамаскин Б.Б.** Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. М.: Химия; КолосС, 2006.

5. Способ катодной защиты протяжённого участка подземного сооружения: Патент РФ № 2 493 291, МПК (2006.1) C23F13/02 / М.А. Юдаков, А.А. Анашкин, В.В. Чулючкин; заявитель и патентообладатель ООО «Центр инновационных технологий-ЭС» № 2012111582/02. Заявл. 26.03.2012. Опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26.

6. Устройство для катодной защиты протяжённого участка подземного сооружения. Патент РФ № 2 504 368, МПК

(2006.1) С23F13/02 / М.А. Юдаков, А.А. Анашкин, В.В. Чулючкин; заявитель и патентообладатель ООО «Центр инноваци-

онных технологий-ЭС» №2012111584/02. Заявл. 26.03.2012. Опубл. 10.02.2014. Бюл. № 4.

Анашкин Анатолий Александрович – инженер

Anatoly A. Anashkin – Engineer

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Gennady G. Ugarov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция готова опубликовать сведения о ваших вузах и предприятиях, об их истории, научных и производственных успехах, планах на будущее. Объем изданий до пяти страниц текста с фотографиями.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПИТАНИЯ АНОДНЫХ ЦЕПЕЙ ГРУППЫ ПАКЕТИРОВАННЫХ МАГНЕТРОНОВ

И.И. Артюхов, Е.С. Гордеев, А.И. Земцов

SPECIFIC DESIGN CHARACTERISTICS OF CONTROLLED SOURCE TO THE CENTRALIZED POWER SUPPLY OF ANODIC CIRCUITS IN PACKAGED MAGNETRONS

I.I. Artyukhov, E.S. Gordeev, A.I. Zemtsov

В электротехнологических установках с распределённой подачей СВЧ энергии, например установках методического типа, в качестве генераторов излучения используются промышленные магнетроны пакетированного типа. Создание регулируемого источника питания группы таких магнетронов является нетривиальной задачей ввиду технологического разброса параметров магнетронов и необходимости подстройки под общий режим работы каждого магнетрона в группе. Основные принципы построения такого источника рассматриваются в статье.

Ключевые слова: магнетрон, источник питания, регулирование мощности

СВЧ нагрев находит широкое применение как в быту, так и во многих отраслях промышленности [1]. Промышленные установки СВЧ нагрева, особенно с распределённым подводом энергии к технологической камере, могут иметь в своем составе несколько магнетронных генераторов [2].

В целях унификации конструкции каждый СВЧ генератор комплектуется своим источником электропитания. С одной стороны, такое решение позволяет оперативно изменять режим работы каждого из СВЧ генераторов, с другой – требует при-

Packaged magnetrons are often used as microwave radiation sources in industrial electric appliances with dispensed supply of microwave energy, such as microwave conveyor dryers. Development of a regulated power supply for a group of these generators is a sophisticated problem caused by variation of the magnetron parameters and necessity for adjustment to the general operation mode of each magnetron in the group. The article considers the basic structural principles of these radiation sources.

Keywords: magnetron, power-supply system, power control

менения соответствующего количества высоковольтных блоков, что не способствует достижению оптимальных массогабаритных и стоимостных показателей. В этой связи представляет интерес анализ возможности централизованного питания группы пакетированных магнетронов по анодным цепям с возможностью подстройки режима работы каждого прибора.

Пакетированные магнетроны имеют разброс электрических характеристик даже среди моделей одного номинала. Это обусловлено технологическим разбросом ха-

рактических постоянных магнитов, входящих в конструкцию пакетированного магнетрона [3]. Следовательно, при централизованном питании анодных цепей каждый из магнетронов в группе будет поддерживать индивидуальный режим работы, возможно, отличный от требуемого для технологического процесса.

Кроме того, современные технологические процессы требуют от источников СВЧ энергии способности изменять мощность излучения в широких пределах по сигналам управления [4]. Промышленные магнетроны большой мощности имеют в своей конструкции электромагнит, с помощью которого, изменяя индукцию магнитного поля, можно управлять режимом работы магнетрона. В пакетированных магнетронах магнитное поле создается постоянным магнитом. Поэтому управление может осуществляться только с помощью источника анодного питания.

Режим работы магнетрона по анодной цепи определяется точкой пересечения вольт-амперной характеристики (ВАХ) магнетрона и внешней характеристики источника питания.

ВАХ магнетрона при кусочно-линейной аппроксимации имеет вид

$$U_a = R_0 I_a + U_0, \quad (1)$$

где R_0 , U_0 – соответственно динамическое сопротивление и пороговое напряжение магнетрона.

Внешняя характеристика источника анодного питания может быть представлена следующим образом:

$$U_a = E - R_{вн} \cdot I_a, \quad (2)$$

где E , $R_{вн}$ – ЭДС и внутреннее сопротивление источника соответственно.

Из (1) и (2) получим выражение для определения анодного тока:

$$I_a = \frac{E - U_0}{R_{вн} + R_{0ин}}.$$

Таким образом, требуемое значение анодного тока можно получить за счет изменения ЭДС источника питания E или его внутреннего сопротивления $R_{вн}$.

Принципы управления режимом работы магнетрона иллюстрирует рис. 1. При неизменной жесткости внешней характеристики источника питания ее параллельное перемещение приводит к изменению режима работы магнетрона. При фиксированной величине ЭДС соответствующее изменение режима работы магнетрона может быть получено за счет изменения наклона внешней характеристики источника питания.

Обратимся к рис. 2, на котором показана расчетная схема анодного питания группы N магнетронов. Магнетроны представлены моделями, каждая из которых включает последовательно соединенный диод VD_k , резистор R_{0k} , отвечающий за динамическое сопротивление магнетрона и противоЭДС, величина которой численно равна пороговому напряжению U_{0k} [5]. Источник питания имеет ЭДС E и внутреннее сопротивление $R_{вн}$.

Выходное напряжение источника анодного питания определится выражением

$$U_d = \frac{E \cdot R_{вн}^{-1} + \sum_{k=1}^N U_{0k} \cdot R_{0k}^{-1}}{R_{вн}^{-1} + \sum_{k=1}^N R_{0k}^{-1}}. \quad (3)$$

Анодный ток каждого из магнетронов найдем по формуле

$$I_{ak} = \frac{U_d - U_{0k}}{R_{0k}}. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) следует, что при параллельном подключении магнетронов к источнику питания их анодные токи будут различаться вследствие технологического разброса параметров U_{0k} и R_{0k} .

Одним из решений этой проблемы является включение в цепь анодного питания каждого из магнетронов добавочного сопротивления R_k . Схожий принцип подстройки анодной цепи применяется в радиолокационных установках, которые допускают использование в качестве источника радиоволн магнетронов различных частотных спектров. Расчетная схема анодного питания с добавочными сопротивлениями показана на рис. 3.

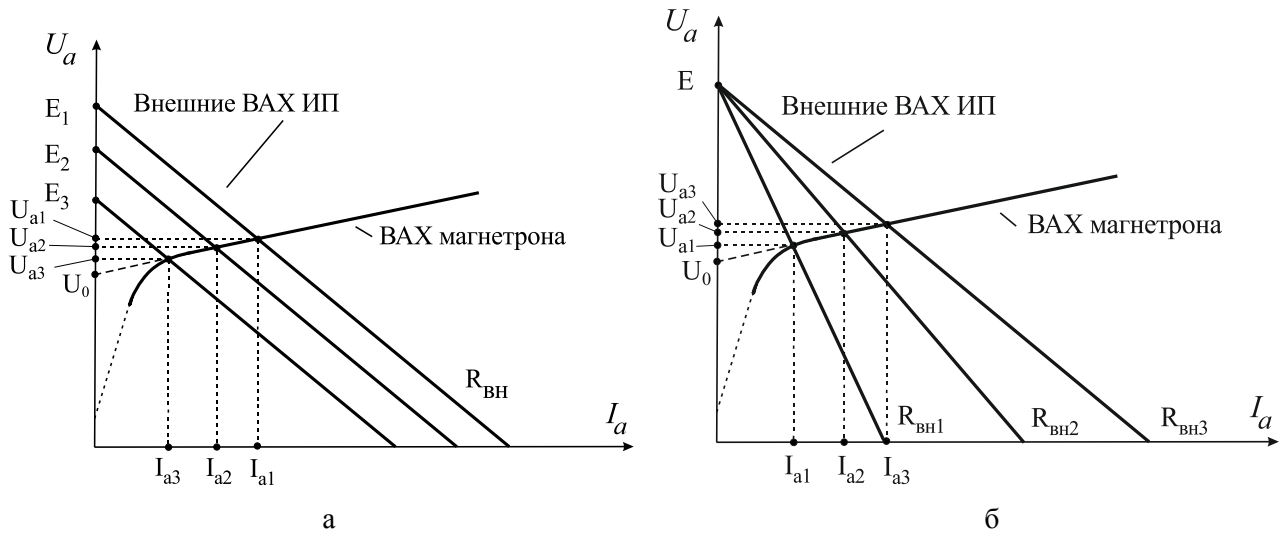


Рис. 1. Управление режимом работы пакетированного магнетрона: а – изменением ЭДС ($E_1 > E_2 > E_3$); б – изменением внутреннего сопротивления ($R_{вн1} > R_{вн2} > R_{вн3}$)

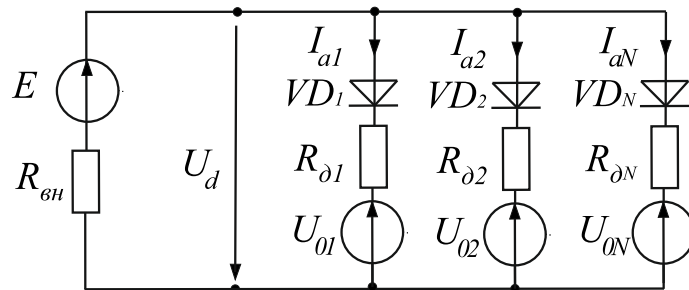


Рис. 2. Расчетная схема анодного питания группы магнетронов

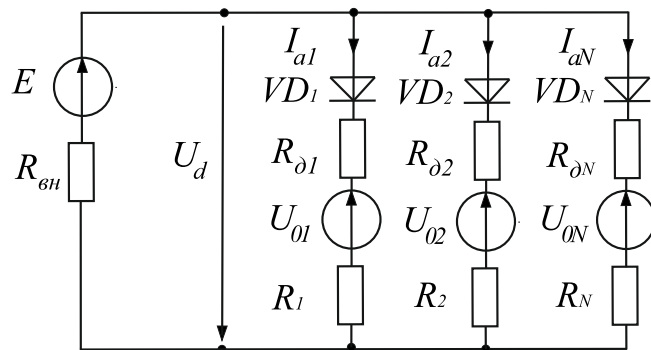


Рис. 3. Расчетная схема анодного питания группы магнетронов с добавочными сопротивлениями

Напряжение на выходе источника анодного питания для этой схемы определится следующим выражением:

$$U_d = \frac{E \cdot R_{вн}^{-1} + \sum_{k=1}^N U_{0k} \cdot (R_{0k} + R_k)^{-1}}{R_{вн}^{-1} + \sum_{k=1}^N (R_{0k} + R_k)^{-1}}.$$

Анодный ток k -го магнетрона найдем по формуле

$$I_{ak} = \frac{U_d - U_{0k}}{R_{0k} + R_k}.$$

Путем подбора сопротивлений R_k можно добиться заданных значений анодных токов. Понятно, что данный метод не позволяет оперативно менять режим работы магнетронов. Для перенастройки режима работы магнетронов требуется отключение установки, что может оказаться невозможным при реализации того или иного техно-

логического процесса. Очевидно также, что для достижения заданных значений анодных токов необходимо увеличить соответствующим образом ЭДС источника питания. Кроме того, наличие добавочных сопротивлений приведет к дополнительным потерям мощности, что отрицательно скажется на величине КПД установки.

Задачу оперативного управления режимом работы группы магнетронов можно решить за счет включения в анодную цепь каждого магнетрона дополнительного источника питания по принципу вольтодобавки. Соответствующая расчетная схема показана на рис. 4.

Выражение для расчета выходного напряжения источника анодного питания примет следующий вид:

$$U_d = \frac{E \cdot R_{\text{ан}}^{-1} + \sum_{k=1}^N (U_{0k} - \Delta E_k) \cdot R_{\text{ок}}^{-1}}{R_{\text{ан}}^{-1} + \sum_{k=1}^N R_{\text{ок}}^{-1}}.$$

Анодный ток каждого из магнетронов найдем по формуле

$$I_{ak} = \frac{U_d - U_{0k} + \Delta E_k}{R_{\text{ок}}}.$$

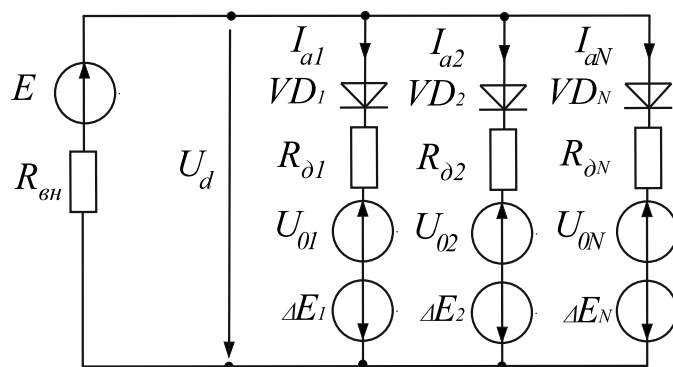


Рис. 4. Расчетная схема анодного питания группы магнетронов с вольтодобавочными элементами

Подобное решение представляется наиболее перспективным, так как не только позволяет оперативно настраивать каждый магнетронный генератор в группе на требуемый режим работы, но и может быть реа-

лизовано электрооборудованием, масса, габариты и стоимость которого будут меньше, чем аналогичные показатели установки с индивидуальными источниками питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 506 с.
2. **Артюхов И.И.** Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок / И.И. Артюхов, А.И. Земцов // Вестник СГТУ. 2011. № 1 (54). Вып. 3. С. 151-156.
3. **Артюхов И.И.** Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов: СГТУ, 2000. 48 с.

4. **Артюхов И.И.** Исследование переходных процессов в системе электропитания пакетированного магнетрона промышленного назначения / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 92-98.
5. **Артюхов И.И.** Имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для пакетированного магнетрона промышленного назначения / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4 (13). С. 33-38.

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

Гордеев Егор Сергеевич – магистрант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Egor S. Gordeev – Master Student, Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Artem I. Zemtsov – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply to Industrial Enterprises, branch of Samara State Technical University in Syzran, Doctoral Student at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

УДК 621.314

ОПЕРАТИВНО ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СЕТИ НА БАЗЕ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Ю.М. Голембиовский, А.А. Костерев

RECONFIGURABLE CONVERTERS BASED ON VOLTAGE INVERTERS

Yu.M. Golembiovskiy, A.A. Kosterev

С использованием тензорной методологии получена математическая модель многоступенчатой оперативно перестраиваемой преобразовательной сети, построенной на базе автономных трехфазных инверторов напряжения для режима прерывистого рекуперативного тока. Приведены результаты исследования электромагнитных процессов в сети при изменении режимов работы ее модулей. Установлено, что сеть устойчиво функционирует даже при мгновенной перестройке ее структуры.

Ключевые слова: инвертор напряжения, преобразовательная сеть, математическая модель, динамические процессы

Using the tensor methodology, the authors developed a mathematical model of a multi-bridge, operationally reconfigurable converter based on the autonomous three-phase voltage inverter for the intermittent regenerative current mode. The investigation results refer electromagnetic processes in the network under the changes in the operating modes of its modules. It is established that the network remains stable even with instantaneous reconfiguration of its structure.

Keywords: voltage inverter, converter network, mathematical model, dynamic processes

Концепция построения. Структура и функционирование оперативно перестраиваемых преобразовательных сетей на базе инверторов напряжения (ОППС ИН). Известные преимущества инверторов напряжения делают привлекательной задачу создания на их основе преобразовательных сетей для электроснабжения мощных потребителей (рис. 1). В результате отпадает надобность в обратном диодном мосте,

являющемся необходимой составной частью инвертора напряжения. Снижение суммарной установленной мощности диодного комплекта, рассчитанное по данным каталогов фирм-изготовителей для быстро восстанавливающихся диодов при длительности протекания тока, равной $T/6$ (T - период), составляет 23-58 % в зависимости от класса приборов по напряжению.

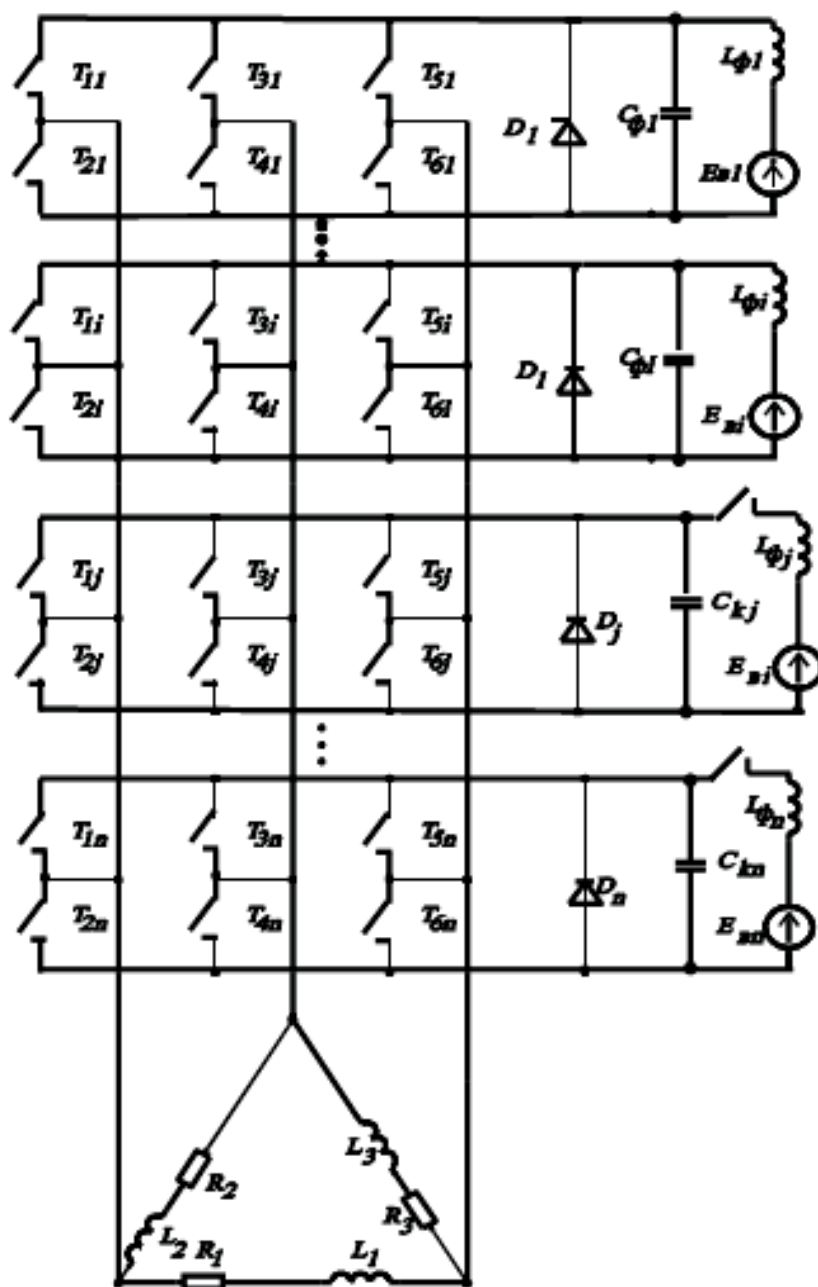


Рис. 1. Функциональная схема ОППС ИН

Обсудим основные аспекты создания ОППС ИН и те проблемы, которые в связи с этим возникают.

Модульная организация сети предполагает параллельную работу группы преобразователей на общую нагрузку. Можно указать две причины, по которым такое включение имеет смысл:

- параметры выпускаемых ключевых элементов недостаточны для создания преобразователя требуемой мощности;

- многомодульная система обеспечивает необходимый уровень надежности при значительно меньших затратах на резервирование по сравнению с единичным преобразователем такой же мощности.

В настоящее время силовая электроника для производства автономных инверторов напряжения использует IGBT, MOSFET и IGCT приборы. Они различаются по параметрам и свойствам, которые определяют преимущественные диапазоны мощностей и напряжений реализуемых на них преобразователей. Лучшие образцы IGBT обеспечивают коммутацию токов до 1200 А и напряжений до 3,5 кВ. Это позволяет создавать устройства мощностью до 1 МВт и напряжением до 3,5 кВ [1]. Для питания высоковольтных потребителей (на 6 и более кВ) прямое наращивание напряжения путем последовательного соединения приборов нецелесообразно из-за необходимости выравнивания напряжения на приборах в динамических режимах и опасности выхода из строя всего инвертора при аварии одного из последовательно соединенных IGBT. Кроме того, суммарное падение напряжения в одном плече инвертора в последовательно соединенных IGBT существенно превысит падение напряжения в плече, построенном на GTO и IGCT. По этой причине единственным приемлемым решением является в настоящее время установка повышающего трансформатора на выходе АИН [2]. Это приводит к увеличению токов вентилях и обострению проблемы драйверов и снабберных цепей.

Как показано в [2], для управления IGBT с номинальным током порядка 2000 А требуется драйвер с нагрузочной

способностью по импульсу тока порядка 30 А за 1 мкс. Кроме того, в режиме КЗ такой прибор способен пропускать импульсный ток порядка 20 кА. В процессе выключения прибора из режима КЗ при индуктивности главной цепи порядка 100 нГн потребуется малоиндуктивный пленочный снабберный конденсатор емкостью порядка 100 мкФ и быстродействующий диод на соответствующий ток.

Если использовать параллельные соединения менее мощных IGBT, то задача поиска драйвера упрощается, поскольку для каждого прибора может быть применен стандартный драйвер. Однако в режиме КЗ величина суммарного тока еще более возрастает, поскольку из-за неравномерности деления токов приходится увеличивать количество параллельно работающих приборов. При синхронном выключении транзисторов, питающихся от общего источника, задача выбора элементов снабберной цепи еще более усложняется. Поэтому наиболее приемлемым путем является параллельное включение АИН со своими звеньями постоянного тока. При такой организации ток короткого замыкания, протекающий в каждом АИН, определяется максимальным током КЗ IGBT. Например, для 400 А приборов ток КЗ составляет порядка 3,2-4 кА, что при индуктивности главных цепей порядка 100 нГн требует снабберных емкостей порядка единиц мкФ. При отработке аварийного режима каждый драйвер функционирует самостоятельно, защищая подключенный к нему прибор вне зависимости от поведения транзисторов в других АИН. Распределение токов между параллельно работающими инверторами может осуществляться либо с помощью уравнивающих реакторов, либо регулированием звена постоянного тока.

Необходимость выходного повышающего трансформатора является, безусловно, негативным моментом при использовании ШИМ. Для потребителей на 380 или 660 В выходной трансформатор необязателен. Гальваническую развязку модулей в этом случае можно обеспечить установкой, например, многообмоточного трансформа-

тора на входах преобразователей. Прогресс в области технологии IGBT позволяет несколько повысить выходное напряжение АИН. По оценкам специалистов предельные параметры IGBT, которые могут быть реально достигнуты, составляют порядка 4,5 кВ при токе в несколько кА. Поэтому для инверторов на выходное напряжение более 4,5 кВ установка повышающего трансформатора неизбежна.

Иные решения предлагаются разработчиками при реализации АИН на запираемых тиристорах. В своих оценках будем ориентироваться на новые IGCT приборы, которые, по мнению специалистов, постепенно вытесняют выпускаемые в настоящее время GTO [3]. Параметры выпускаемых IGCT позволяют уже сейчас строить инверторы на мощность до 15 МВА и выходное напряжение до 6 кВ без последовательного или параллельного соединения приборов [4]. В этом диапазоне напряжений сотрудниками фирмы ABB Semiconductor AG для увеличения мощности рекомендуется параллельное соединение IGCT, а для больших напряжений и мощностей в десятки и сотни МВА – последовательное. Это обусловлено тем, что в отличие от IGBT приборы IGCT имеют низкое падение напряжения в открытом состоянии, примерно такое же, как у однооперационных тиристоров и диодов с одинаковыми параметрами. Кроме того, последовательное включение позволяет повысить надежность АИН за счет установки большего числа IGCT, чем это необходимо. Тогда при повреждении одного из IGCT или обратного диода напряжение перераспределяется между оставшимися приборами и функционирование АИН не нарушается (приборы IGCT при пробое становятся короткозамкнутыми). Важнейшим свойством IGCT является способность работать без снабберных цепей, ограничивающих dU/dt , однако при последовательном включении, как указывается в [4], установка снабберов все же необходима. Авторы [4] также отмечают, что короткие замыкания в фазе нагрузки очень нежелательны, так как могут приводить к выходу из строя фазового плеча преобразователя. Кроме того, если отказ

IGCT произойдет по управляющему электроду, то все плечо инвертора становится неуправляемым и производится аварийное отключение преобразователя. Для некоторых применений эти соображения могут оказаться достаточными аргументами в пользу параллельного включения АИН с повышающим трансформатором даже для высоковольтных преобразователей. Тем не менее последовательное включение IGCT рассматривается как наиболее перспективное для построения мощных и высоковольтных преобразователей. В диапазоне до 6 кВ инверторы на IGCT целесообразно строить по тому же принципу, что и на IGBT, то есть либо на базе одного моста, либо используя параллельное включение АИН.

При выборе схемотехники преобразовательного комплекса важную роль играет надежность. Существует множество потребителей, для которых показатель надежности источников питания имеет первостепенное значение. Это касается, в частности, систем централизованного электроснабжения. Чтобы обеспечить необходимую надежность при одном преобразователе, идут даже на 100% резервирование. Это вдвое увеличивает установленную мощность силового оборудования. Параллельное включение группы АИН, помимо указанных выше достоинств, позволяет сэкономить до 70% установленной мощности оборудования при том же уровне надежности введением всего лишь дополнительного модуля такой же мощности, как и остальные. Применение ОППС ИН, в которых также реализована параллельная архитектура, дает дополнительное повышение надежности за счет возможности оперативного изменения функций модулей.

Лучшей элементной базой для построения ОППС ИН являются асимметричные IGCT приборы, то есть не содержащие интегрированных обратных диодов. Это обусловлено, во-первых, тем, что IGCT имеют вдвое меньшее падение напряжения в открытом состоянии (примерно 2,4 В) по сравнению с IGBT. Поэтому суммарные потери в той группе модулей, которые работают в режиме рекуперации, примерно

равны потерям в обратных диодах единичного инвертора такой же мощности. Суммарные же потери в ОППС ИН, построенной на IGCT, будут значительно меньше, чем при реализации на IGBT. Во-вторых, использование асимметричных IGCT позволяет, как указывалось выше, экономить до 60% установленной мощности диодного комплекта. Наконец, при отказе одного из инверторов он может быть оперативно отключен, а на его место из режима рекуперации или резерва переведен другой модуль. Это свойство ОППС ИН повышает ее живучесть. При реализации ОППС ИН на IGBT или на симметричных IGCT, то есть содержащих интегрированные обратные диоды, экономии установленной мощности диодного комплекта не происходит, но все остальные достоинства сетевой организации систем электроснабжения сохраняются.

Математическая модель ОППС ИН.

При синтезе математической модели следует иметь в виду, что её структура зависит от топологии токопроводящих цепей на интервале между коммутациями ключей, образующих инверторные мосты. Если применяется несимметричное управление ключами,

различают два варианта протекания возвратного реактивного тока нагрузки: непрерывный (когда возвратный ток протекает в течение всего интервала t_0 между коммутациями инверторных ключей) и прерывистый (когда указанный ток уменьшается до нуля до окончания интервала t_0). В случае прерывистого реактивного тока он принимает нулевое значение в момент $t' < t_0$. Математическая модель, описывающая непрерывный режим, изложена в [5].

Рассматривая IGBT и IGCT как идеальные ключи с односторонней проводимостью (что вполне уместно для анализа такой сложной динамической системы, какой является преобразовательная сеть), следует в подынтервале $t' \leq t \leq t_0$ при несимметричном управлении мостом положить ток $i_p = 0$.

Схема замещения для этого случая показана на рис. 2. Вследствие разрыва связей количество действительных контуров в схеме (рис. 2) уменьшилось по сравнению со схемой [5]. Чтобы сохранить ортогональность в схеме замещения (рис. 2), введен воображаемый контур с током $i_a = 0$.

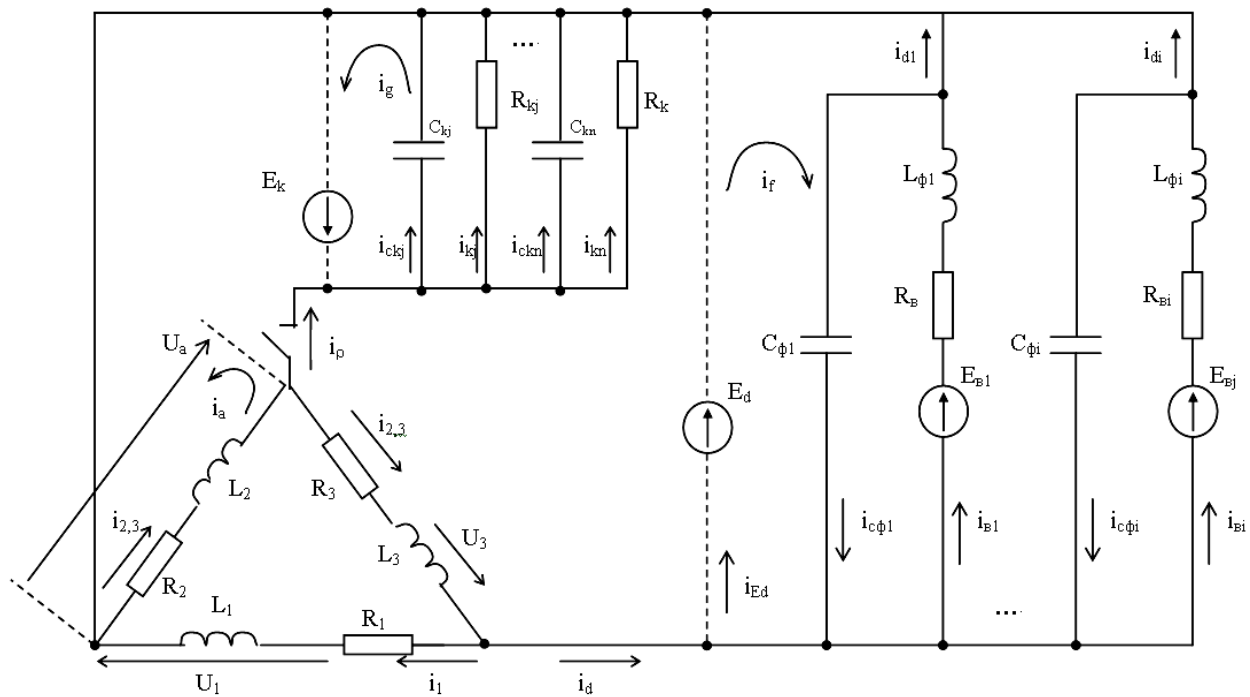


Рис. 2. Схема замещения ОППС ИН в подынтервале $t' \leq t \leq t_0$

Соотношения между токами в примитивной (состоящей из не связанных между собой элементов) и в действительной сетях

по Кирхгофу в соответствии с тензорной методологией, изложенной в [6], будет иметь вид

$$\begin{array}{l}
 i_{n1} = \\
 i_{n2,3} = \\
 i_{n3} = \\
 i_{e1} = \\
 \vdots \\
 i_{en} = \\
 i_{k1} = \\
 \vdots \\
 i_{kn} = \\
 i_{c\phi} = \\
 i_{ck} =
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccccccccc}
 p_1 & p_2 & e_1 & \dots & e_n & k_1 & \dots & k_n & c_\phi & c_k & a \\
 i_{p1} & & & & & & & & & & \\
 & i_{p2} & & & & & & & & & +i_a \\
 & i_{p2} & & & & a & & & & & \\
 & & i_{e1} & & & & & & & & \\
 \dots & & & \dots & & & & & & & \\
 & & & & i_{en} & & & & & & \\
 & & & & & i_{k1} & & & & & \\
 \dots & & & & & & \dots & & & & \\
 & & & & & & & i_{kn} & & & \\
 i_{p1} & -i_{p2} & +i_{e1} & \dots & +i_{en} & & & & +i_f & & \\
 & & & & & -i_{kn} & \dots & -i_{kn} & & i_g &
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (1)$$

Из (1) следует матрица преобразования примитивной сети в действительную схему замещения:

$$\begin{array}{l}
 = \\
 \begin{array}{l}
 n_1 \\
 n_2 \\
 n_3 \\
 e_1 \\
 \vdots \\
 e_n \\
 k_1 \\
 \vdots \\
 k_n \\
 c_\phi \\
 c_k
 \end{array}
 \begin{array}{cccccccccccc}
 p_1 & p_2 & e_1 & \dots & e_n & k_1 & \dots & k_n & c_\phi & c_k & a \\
 1 & & & \dots & & & & & & & \\
 & 1 & & & & & & & & & 1 \\
 & 1 & & & & & & & & & \\
 & & 1 & & & & & & & & \\
 \dots & & & \dots & & & & & & & \dots \\
 & & & & 1 & & & & & & \\
 & & & & & 1 & & & & & \\
 & & & & & & 1 & & & & \dots \\
 & & & & & & & \dots & & & \\
 & & & & & & & & 1 & & \\
 1 & -1 & 1 & \dots & 1 & & & & 1 & & \\
 & & & \dots & & -1 & \dots & -1 & & 1 &
 \end{array}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 n \\
 e \\
 = k \\
 c_\phi \\
 c_k
 \end{array}
 \begin{array}{ccccc}
 p & e_1 & k & c_\phi & c_k & a \\
 A_5 & & & & & A_7 \\
 & \varepsilon & & & & \\
 & & \varepsilon & & & \\
 A_6 & A_3 & & 1 & & \\
 & & A_4 & & 1 &
 \end{array}
 \quad (2)$$

Матрица (2) используется для получения системы тензорных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ОПЭС ИН, которая согласно методике, изложенной в [5, 7], которая в дифференциальной форме имеет вид

$$\begin{aligned}
 L_p &= A_{5t} L_n A_5, & R_p &= A_{5t} R_n A_5, \\
 U_p &= -A_{6t} E_d, & L_p \frac{dI_p}{dt} &= U_p - R_p I_p, \\
 L_\phi \frac{dI_\phi}{dt} &= -A_{3t} E_d + E_\phi - R_\phi I_\phi, & C_\phi^s &= A_3 C_\phi A_{3t}, \\
 C_\phi^s \frac{dE_d}{dt} &= A_6 I_p + A_3 I_\phi, & R_k I_k &= -A_{4t} E_k, \\
 \frac{dE_k}{dt} &= A_4 C_k^{-1} I_k, & L_a &= A_{7t} L_n A_5, \\
 R_a &= A_{7t} R_n A_5, & U_a &= L_a L_p^{-1} U_p - L_a L_p^{-1} R_p I_p + R_a I_p, \\
 I_n &= A_5 I_p, & U_n &= A_8 U_{da}, \\
 I_{c\phi} &= -A_{6t} I_p + A_3 I_\phi, & I_{ck} &= A_4 I_k.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В (3) приняты следующие обозначения:

$$I_p = \begin{bmatrix} i_{p1} \\ i_{p2} \end{bmatrix} \quad - \text{вектор контурных токов в схеме замещения};$$

$$R_p = \begin{bmatrix} R_{p1} & \\ & R_{p2} \end{bmatrix}, \quad L_p = \begin{bmatrix} L_{p1} & \\ & L_{p2} \end{bmatrix} \quad - \text{контурные импедансы нагрузки в схеме замещения};$$

$$U_{da} = \quad - \text{вектор напряжений на нагрузке в системе координат, определяемой схемой замещения};$$

$$L_a = \begin{bmatrix} L_{a1} & L_{a2} \end{bmatrix}, \quad R_a = \begin{bmatrix} R_{a1} & R_{a2} \end{bmatrix} \quad - \text{векторы импедансов ветви, входящей в воображаемый контур с током } i_a;$$

$$A_{5нач} = \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1 \end{bmatrix}, \quad A_6 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_{7нач} = \begin{bmatrix} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_{8нач} = \begin{bmatrix} 1 & \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Коэффициенты при переменных и импедансах на границах интервалов между коммутациями ключей вычисляются из рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned}
 A_5 &:= C_{6t} A_5, & A_{5t} &:= C_6 A_{5t}, \\
 A_{7t} &:= C_6 A_{7t}, & A_8 &:= C_{6t} A_8.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Динамические процессы в ОППС ИН.

Поскольку статические характеристики ОППС ИН и индивидуального инвертора идентичны, основной задачей исследований является определение динамических свойств сети при реализации процедур изменения ее топологии. С этой целью исследовались процессы перевода модулей из

режима инвертирования в режим рекуперации и обратно.

Рис. 3-5 иллюстрируют типичные динамические процессы, происходящие в сети при перестройке ее структуры. Кривые получены для следующих параметров модулей и нагрузки:

$$\begin{aligned}
 E_\phi &= 465,4 \text{ В}; \quad C_{\phi i} = C_{ki} = 0,001 \text{ Ф}; \\
 f &= 1000 \text{ Гц}; \quad L_\phi = 0,001 \text{ Гн}; \\
 R_\phi &= 0,1 \text{ Ом}; \quad R_n = 1 \text{ Ом}; \\
 R_k &= 0,07 \text{ Ом}; \quad L_n = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \\
 (\cos \varphi &= 0,8).
 \end{aligned}$$

Исходная конфигурация сети: модули 1, 2 и 3 работают в режиме инвертирования, модули 4 и 5 – в режиме рекуперации.

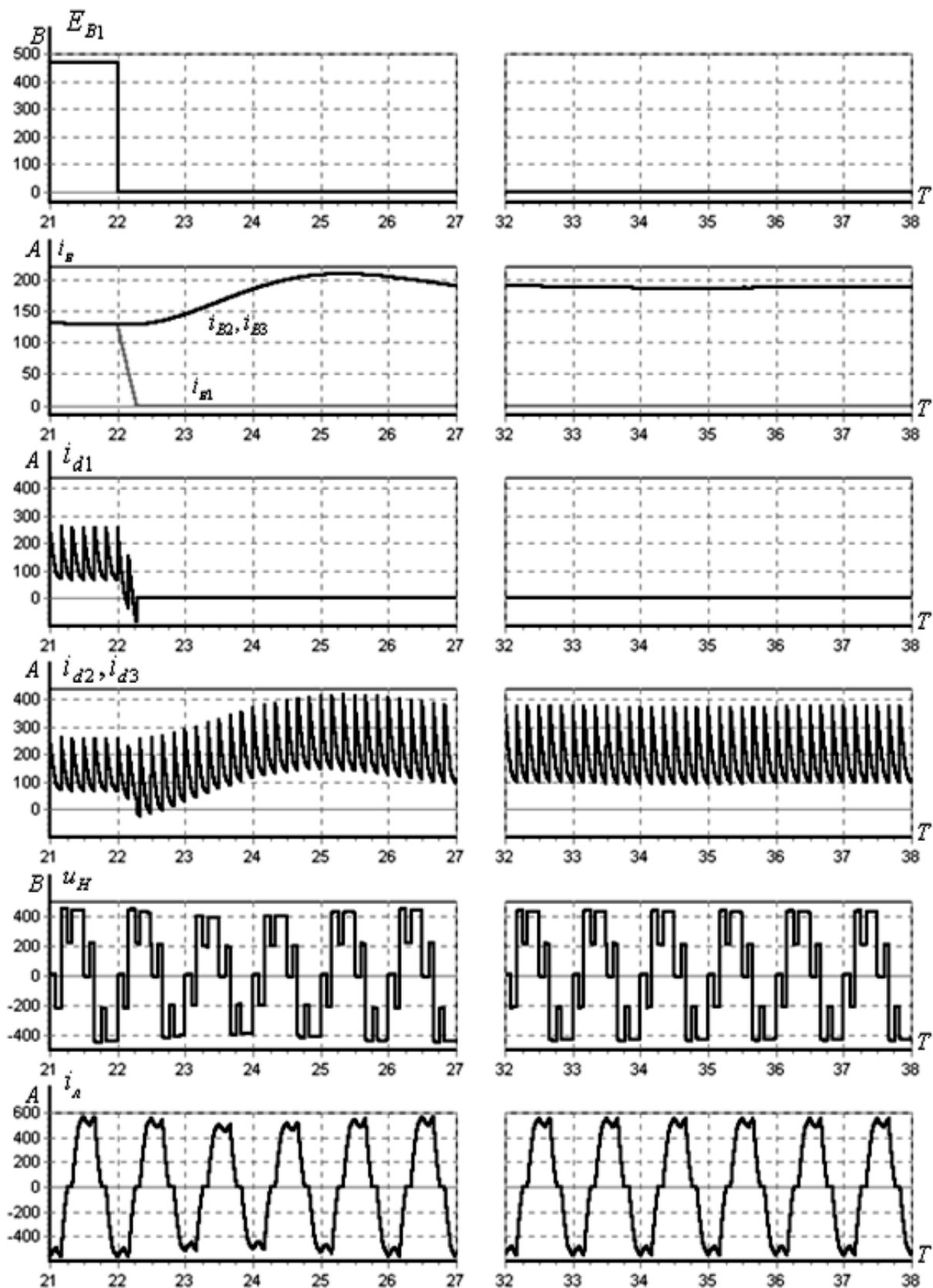


Рис. 3. Процесс выключения инвертора при мгновенном изменении E_g и несимметричном управлении транзисторами инверторов ($\cos \varphi = 0,8$)

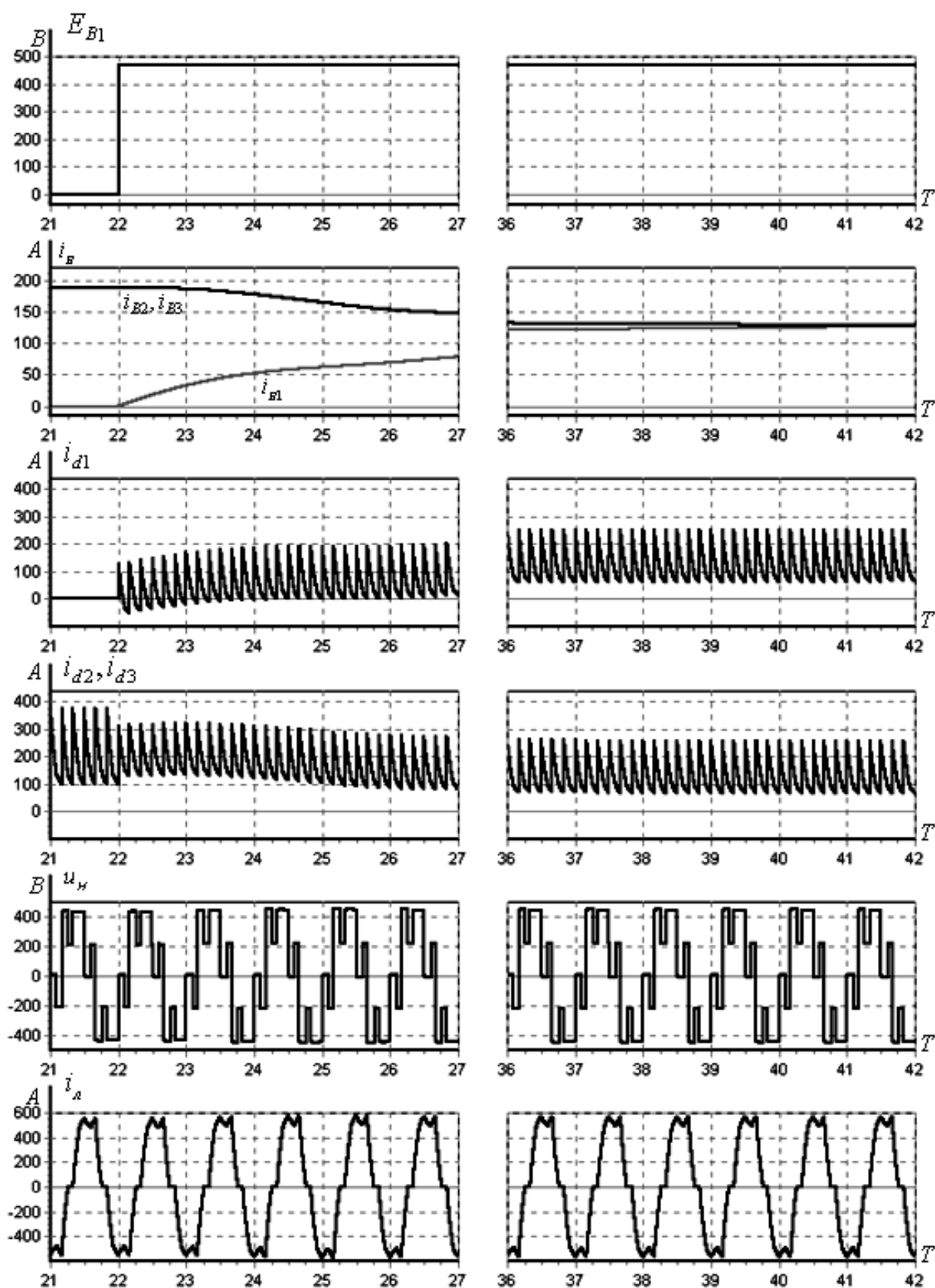


Рис. 4. Процесс включения инвертора при мгновенном изменении E_e и несимметричном управлении транзисторами инверторов ($\cos \varphi = 0,8$)

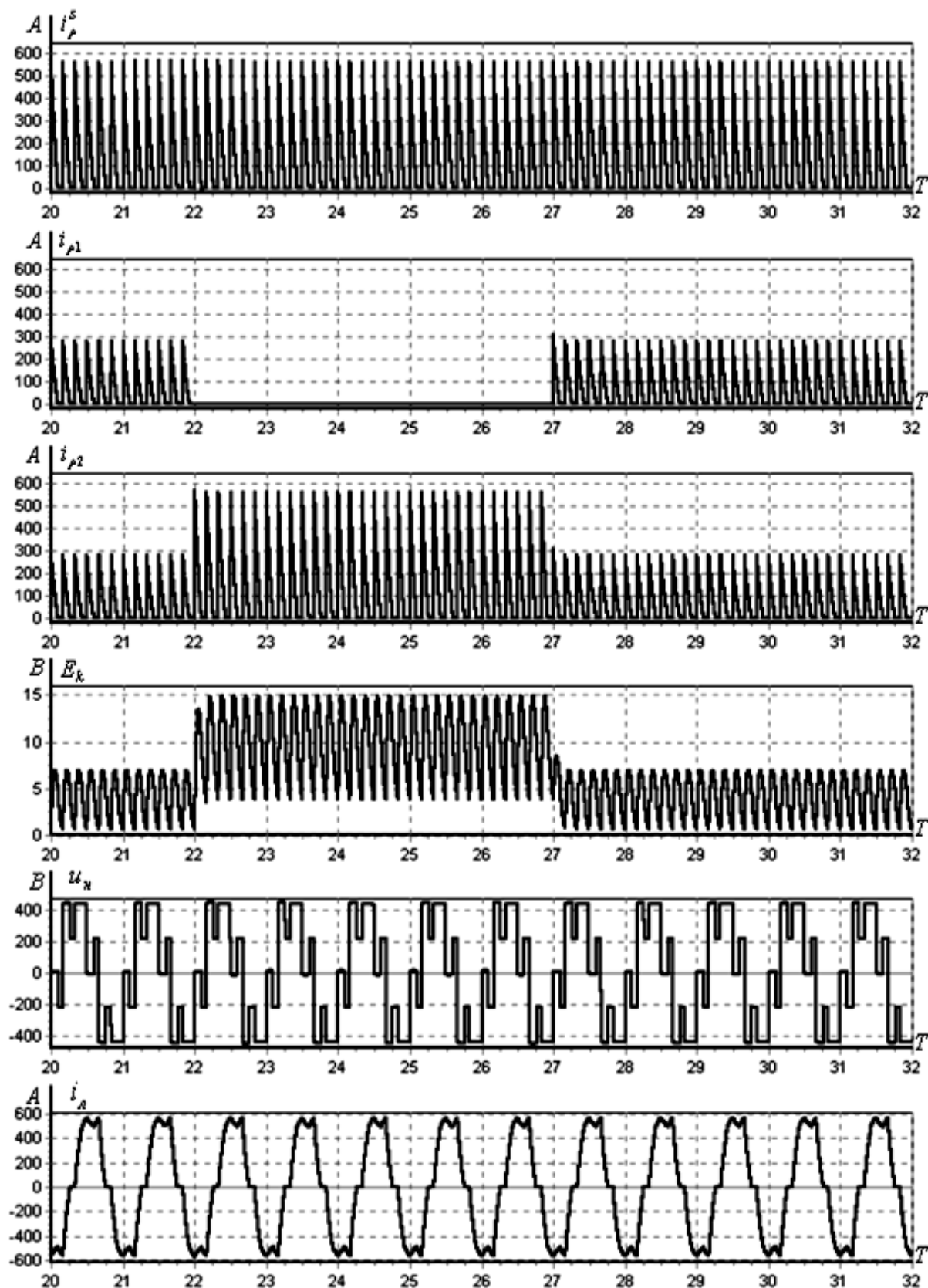


Рис. 5. Процесс мгновенного перевода модуля из режима рекуперации в резерв и обратно при несимметричном управлении транзисторами инверторов ($\cos \varphi = 0,8$)

Из приведенных результатов исследований следует, что ОППС ИН допускает мгновенное отключение и включение питающего напряжения модулей (рис. 3, 4). Перераспределение мощности (токи i_{e1} , i_{e1} , i_{e2} , i_{e3} , i_{d1} , i_{d2} , i_{d3}) между модулями происходит плавно и никак не отражается на величине и качестве выходного напряжения U_n и тока i_l нагрузки.

Длительность переходного процесса выключения и включения инвертора зависит от параметров фильтра L_f и C_f , которые должны быть выбраны так, чтобы обеспечить приемлемое время установления и качество процессов в ОППС ИН, а также требуемый уровень фильтрации выпрямленного напряжения.

Процедура перевода модуля из режима рекуперации в резерв и обратно показана на рис. 5. Как указывалось раньше, перевод

осуществляется сдвигом импульсов управления модулем относительно импульсов управления работающими инверторами. Анализ кривых позволяет сделать следующие заключения.

1. Модуль пропускает рекуперативный ток (i_{p1}) при сдвиге импульсов управления в диапазоне $0 < \varepsilon \leq 60^\circ$ в сторону отставания. Полное выключение модуля происходит при $\varepsilon = 0$. Возвратный ток будут пропускать оставшиеся в режиме рекуперации модули (в данном случае модуль 4, ток i_{p2}).

2. Величина и форма выходного напряжения и тока не изменяются как при постепенном, так и при мгновенном переводе модуля и не зависят от величины $\cos \varphi$ нагрузки и длительности импульсов управления α_y транзисторами мостов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные и перспективные силовые IGBT-модули / С.Н. Флоренцев, Х.Г. Буданов, В.М. Гарцбейн, Л.В. Романовская // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка та енергоефективність. 2000. Ч. 1. С. 19-28.

2. О построении мощных инверторов напряжения на IGBT / В.А. Барский, М.Г. Брызгалов, Н.А. Горяйнов и др. // Технічна електродинаміка. Спец. вип. 2. Т. 1. 1998. С. 80-83.

3. Флоренцев С.Н. Состояние и тенденции развития силовых модулей / С.Н. Флоренцев // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Проблеми сучасної електротехніки. 2000. Ч. 1. С. 50-57.

4. IGCT-появление новой технологии для сверхмощных экономически эффектив-

ных преобразователей; пер. с англ. / Р.К. Steimer, Н.Е. Gryning, J. Werninger et al. // Электротехника. 1999. № 4. С. 10-18.

5. Голембиовский Ю.М. Адаптивные сети на базе инверторов напряжения. Proceedings of the 4-th IC / Ю.М. Голембиовский // Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. St. Petersburg, Russia, 1999. Vol. 3. P. 1063-1068.

6. Голембиовский Ю.М. Тензорные модели многомостовых оперативно пере-страиваемых преобразовательных сетей / Ю.М. Голембиовский // Проблемы преобразовательной техники: докл. V Всесоюз. науч.-техн. конф. Киев: АН УССР, 1991. Ч. 1. С. 243-245.

Голембиовский Юрий Мичиславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Костерев Андрей Александрович – кандидат технических наук, главный инженер Саратовского научного центра РАН

Yuri M. Golembiovsky – Dr.Sc., Professor, Department of Systems Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Andrey A. Kosterev – PhD, Chief Engineer at Saratov Research Center of the Russian Academy of Sciences

Статья поступила в редакцию 12.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПРОТЕКАНИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.В. Вахнина, О.В. Самолина

SOURCES AND FLOW PATTERNS OF GEOINDUCED CURRENTS IN ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS

V.V. Vakhnina, O.V. Samolina

Геомагнитные бури являются причиной тяжелых аварий, функциональных нарушений и ускоренного накопления дефектов и старения электрооборудования систем электроснабжения. В статье рассмотрен механизм возникновения геоиндуцированных токов в системах электроснабжения при геомагнитных бурях. Воздействие геоиндуцированных токов на силовые трансформаторы и автотрансформаторы заключается в насыщении магнитной системы, возрастании токов намагничивания и смещении рабочего линейного режима работы в нелинейную часть гистерезиса. Путем компьютерного моделирования установлено, что максимальные значения токов намагничивания в присутствии геоиндуцированного тока многократно превосходят паспортное значение тока холостого хода однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН 267000/500/220.

Ключевые слова: геомагнитные бури, геоиндуцированный ток, система электроснабжения, силовой автотрансформатор

Geomagnetic storms cause severe accidents, functional disruptions, accelerated accumulation of defects, and aging of electrical equipment in power supply systems. The article deals with a pattern of geoinduced currents in power supply systems under geomagnetic storms. The effect of geoinduced currents on power transformers and autotransformers results in saturation of the magnetic system, an increase of magnetizing currents and shift in the operation linear mode towards the nonlinear part of the hysteresis. Using computer simulation, it has been established that the maximum values of magnetization currents in the presence of the geoinduced current significantly exceed the rated value of the idling current of the single-phase power autotransformer AODTSTN – 267000/500/220.

Keywords: geomagnetic storms, geoinduced current, power supply system, power autotransformer

За последние десятилетия произошло несколько системных аварий в крупнейших энергосистемах, которые нанесли существенный ущерб потребителям.

В 2003 г. в Швеции в результате отключения реактора на атомной электростанции Oskarshamn-3 мощностью 1135 МВт без электричества остались около 4 миллионов жителей в Швеции и Дании. На Апеннинах в 2003 г. произошло обесточивание всего по-

луострова. В результате выхода из строя одной из двух линий электропередачи, соединяющих Италию со Швейцарией, возникла перегрузка энергосистемы. Это привело к автоматическому отключению второй линии, а затем еще двух, которые передавали энергию из Франции и Австрии. Дефицит мощности в энергосистеме Италии составил 20% и произошло полное ее погашение. Около 56 миллионов человек остались без электри-

чества. Помимо Италии, в темноту погрузились Ватикан и Сан-Марино. В Испании в июле 2004 г. около 1,2 миллиона человек остались без электричества в результате аварии на линии электропередач. В 2006 г. из-за обрыва кабеля высокого напряжения электричества лишились более миллиона жителей Токио, Кавасаки и Иокогама. В 2009 г. в Бразилии из-за нештатной ситуации на гидроэлектростанции «Итайпу», которая является второй в мире по выработке электроэнергии, более 50 миллионов человек остались без электричества. Ураган, бушевавший в районе станции, спровоцировал перегрузки в сети, что привело к обесточиванию отдельных участков по «принципу домино» и веерному отключению электричества. В 2010 г. в России произошла авария на Невинномысской ГРЭС, что вызвало отключение потребителей электрической энергии на величину 286,85 МВт и прекращение электроснабжения около миллиона человек населения. В 2012 г. в столице Аргентины Буэнос-Айресе произошло масштабное отключение электро-

энергии, вызванное выходом из строя двух высоковольтных кабелей. По данным властей, в результате аварии без электричества остались около трех миллионов человек. В октябре 2012 г. из-за обрушившегося на восточное побережье США урагана «Синди» без электричества осталось более 8 миллионов потребителей [1-3].

Анализ аварий в системах электроснабжения (СЭС) показывает, что одной из причин нарушения электроснабжения потребителей, помимо широко известных и исследованных, являются геомагнитные бури (ГМБ). ГМБ являются причиной тяжелых аварий, функциональных нарушений и ускоренного накопления дефектов и старения электрооборудования систем электроснабжения [3-5].

Количественное соотношение причин возникновения ненормальных и аварийных режимов работы систем электроснабжения наглядно показывает влияние геомагнитных бурь на работу СЭС (рис. 1).

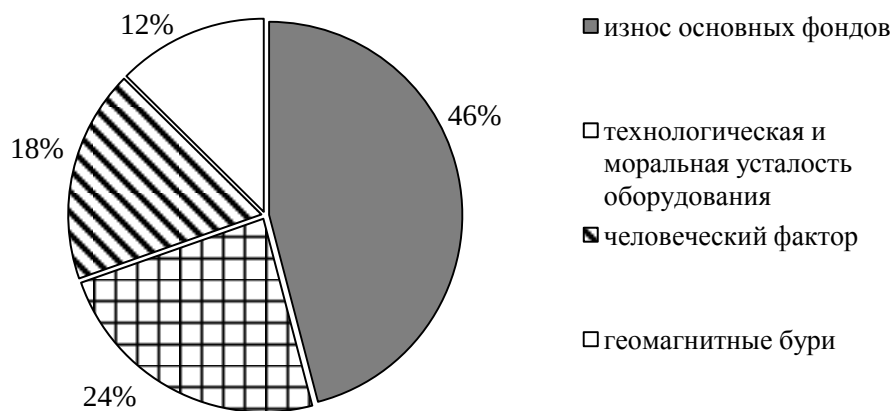


Рис. 1. Причины возникновения аварий в системах электроснабжения

Регулярные суточные вариации магнитного поля создаются в основном изменениями токов в ионосфере Земли из-за изменения освещенности ионосферы Солнцем в течение суток. Нерегулярные вариации магнитного поля создаются вследствие воздействия потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменениями внутри магнитосферы, взаимодействием магнитосферы и ионосферы. Солнечный ветер – поток ионизированных

частиц, истекающий из солнечной короны со скоростью 300-1200 км/с (у Земли около 400 км/с) в окружающее космическое пространство. Солнечный ветер деформирует магнитосферы планет, порождает полярные сияния и радиационные пояса планет. Усиление солнечного ветра происходит во время вспышек на Солнце. Мощная солнечная вспышка сопровождается испусканием большого количества ускоренных частиц – солнечных космических лучей. Самые

энергичные из них (108-109 эВ) начинают приходить к Земле спустя 10 минут после максимума вспышки. Повышенный поток солнечных космических лучей у Земли может наблюдаться несколько десятков часов. Вторжение солнечных космических лучей в ионосферу полярных широт вызывает дополнительную её ионизацию и ухудшение радиосвязи на коротких волнах.

Вспышка на Солнце генерирует мощную ударную волну и выбрасывает в межпланетное пространство облако плазмы. Двигаясь со скоростью свыше 100 км/с, ударная волна и облако плазмы за 1,5-2 суток достигают Земли, вызывая при этом резкие изменения магнитного поля, то есть магнитную бурю, усиление полярных сияний, возмущения ионосферы. Имеются данные о том, что через 2-4 суток после магнитной бури происходит заметная перестройка барического поля тропосферы. Это приводит к увеличению неустойчивости атмосферы, нарушению характера циркуляции.

Для описания вариаций магнитного поля Земли, вызванных солнечной активностью, используются индексы геомагнитной активности [6, 7]: К-индекс – отклонение магнитного поля Земли от нормы в течение трехчасового интервала, представляет собой значения от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала (0-3, 3-6, 6-9 и т. д.) мирового времени; Кр-индекс – планетарный индекс, вычисляется как среднее значение К-индексов, определенных на 13 геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44 и 60 градусами северной и южной геомагнитных широт. Качественно состояние магнитного поля в зависимости от Кр-индекса можно охарактеризовать следующим образом:

- Кр < 2 – спокойное;
- Кр = 2, 3 – слабовозмущенное;
- Кр = 4 – возмущенное;
- Кр = 5, 6 – магнитная буря;
- Кр = 7 и выше – сильная магнитная буря.

В последнее время вместо Кр-индекса часто применяется Ар-индекс. Ар-индекс определяется в единицах напряженности магнитного поля – нанотеслах (нТл). При-

меняется также G-индекс, который характеризует интенсивность геомагнитного шторма по воздействию вариаций магнитного поля Земли на людей, животных, электротехнику, связь, навигацию и т.д. Градации G-индекса – от G1 до G5, то есть от слабого возмущения магнитного поля Земли до экстремального:

– G0 – Кр < 5 – без шторма (геомагнитная обстановка от спокойной до возмущенной, наблюдаются полярные сияния в высоких (> 65°) широтах);

– G1 – Кр = 5 – слабый (незначительные сбои в работе энергосистем, обычные пути миграций животных могут быть изменены);

– G2 – Кр = 6 – средний (в энергосистемах, расположенных в высоких широтах, могут происходить сбои напряжения, длительный геомагнитный шторм может вызвать неполадки на трансформаторных подстанциях);

– G3 – Кр = 7 – умеренный (возникновение перенапряжений в промышленной электросети, ложные срабатывания автоматики, кратковременные сбои GPS-навигации и низкочастотной радионавигации, перебои коротковолновой связи, полярное сияние может наблюдаться на широте Риги, Москвы);

– G4 – Кр = 8 – сильный (широкомасштабное возникновение перенапряжений в промышленной электросети, повсеместное ложное срабатывание защитных систем, коротковолновая связь неустойчива, GPS-навигация ухудшается на несколько часов, средневолновая радионавигация отсутствует, северное сияние наблюдается на широте Минска);

– G5 – Кр = 9 – очень сильный (могут возникнуть повсеместные проблемы с регулировкой напряжения промышленной электросети и проблемы в работе защитных систем, энергосистемы могут полностью выйти из строя или отключиться; трансформаторные подстанции могут быть выведены из строя, наведенные токи могут достигать сотен ампер, коротковолновая связь может отсутствовать повсеместно в течение одного-двух дней, GPS-навигация может отсутствовать несколько дней, сред-

неволновая радионавигация может отсутствовать часами, полярное сияние наблюдается на широтах Варшавы, Гомеля).

При наличии протяженной заземленной системы проводников возбуждаемое геомагнитной бурей геоэлектрическое поле создает в ней почти постоянный (квазипостоянный) ток частотой от 0,001 Гц до 0,1 Гц, который принято называть геоиндуцированным током [8, 9].

Исследования воздействия геоиндуцированных токов на технологические системы проводятся в различных странах со второй половины двадцатого века. В то же время задача защиты технических систем от негативных воздействий геомагнитных возмущений не решена окончательно.

Возмущенность геомагнитного поля сильно меняется с широтой – ее максимум приходится на зону полярных сияний, поэтому шкала определения К-индекса имеет разную амплитуду. Следует отметить, что К-индекс не может указать возможный ущерб системам электроснабжения от

мощной геомагнитной бури, так как не берет в расчет скорость изменения вариаций геомагнитных полей. Так, буря К-9 с медленными вариациями геомагнитного поля нанесет меньший вред, чем, например, буря К-6 с более быстрыми изменениями.

Наиболее интенсивно воздействие геомагнитных бурь на системы электроснабжения проявляется главным образом для высоких широт Северного полушария и Южного полушария (СЭС Канады, Скандинавских стран и т.д.), где эти воздействия чаще всего имеют место из-за больших и импульсивных геомагнитных возмущений.

Преимущественно геоэлектрические поля индуцируются вдоль поверхности Земли в широтном направлении. Зарегистрированные амплитуды поверхностных потенциалов Земли в восточно-западном направлении достигают $E_y = 6-10$ В/км, а в отдельных случаях $E_y = 15-20$ В/км; в северо-южном – $E_x = 3-5$ В/км, в отдельных случаях $E_x = 6-10$ В/км (рис. 2) [10].

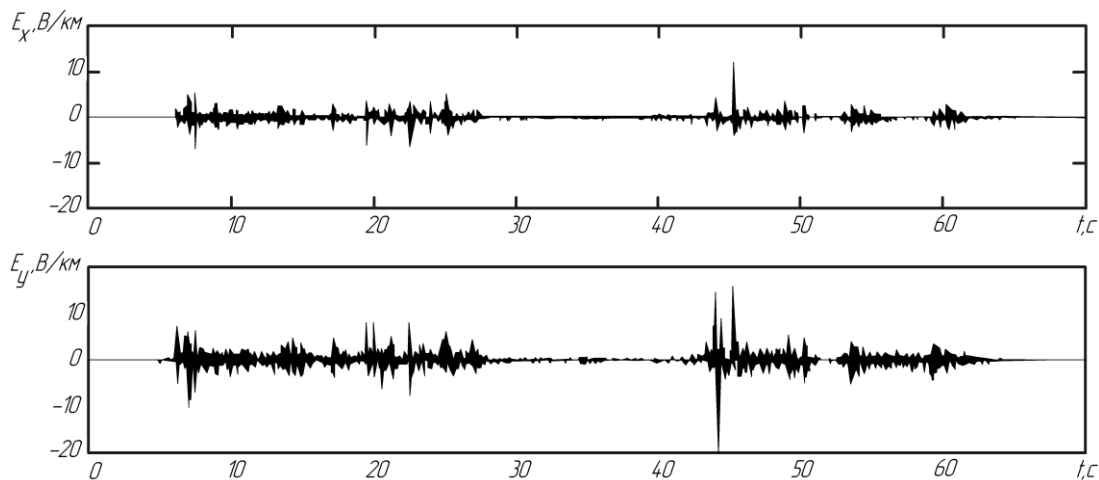


Рис. 2. Изменения напряженности геоэлектрического поля в северо-южном (компонента E_x) и восточно-западном направлении (компонента E_y) при геомагнитной буре «The Halloween storm» 30 октября 2003 г.

Характер изменения напряженности геоэлектрического поля, индуцированного на линии электропередач 345 кВ длиной 368 км при слабой геомагнитной буре (индекс К-5), представлен на рис. 3. Порядок величин напряженности геоэлектрического поля ниже, чем при более сильной ГМБ. При сильной геомагнитной буре зарегистрированные

значения напряженности геоэлектрического поля составили до 10 В/км длительностью примерно один час с дискретными периодами покоя на протяжении примерно 24 часов [11].

При выполнении системы электроснабжения с эффективно или глухо заземленными нейтралями силовых трансформаторов и

автотрансформаторов (рис. 4) при условии, что точек заземления не менее двух, в воздушных линиях электропередач протекают ГИТ до нескольких десятков и даже сотен ампер на фазу, влияя на работу систем электроснабжения [12]. Путь протекания ГИТ

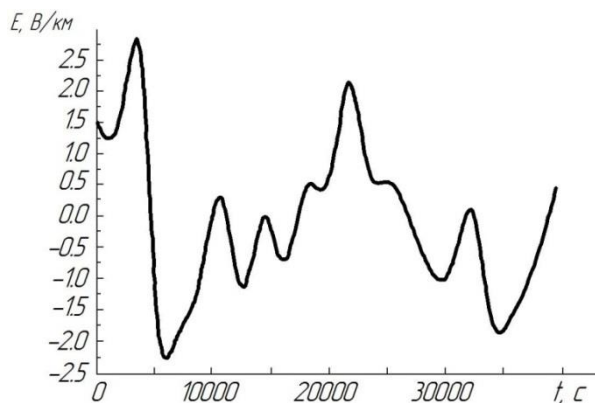


Рис. 3. Геоэлектрическое поле, индуцированное на линии электропередач 345 кВ длиной 368 км при геомагнитной буре с индексом $K-5$ (12/13 мая 1989 г. магнитная обсерватория Фюрстенфельдбрук)

Величина геоиндуцированных токов, протекающих в воздушных линиях электропередач, определяется скоростью изменения геомагнитного поля при геомагнитной буре и размерами области распространения геомагнитного поля; длиной и связанностью линий электропередач; географическим расположением точек, в которых СЭС контактирует с земной поверхностью [13, 14]. Кроме того, воздействие солнечной активности на СЭС усиливается в случае, если грунт вблизи подстанции является слабопроводящим, так как через заземленные проводники будет проходить большая величина ГИТ.

Наиболее сильное воздействие геомагнитные бури оказывают на трансформаторное оборудование, то есть на силовые трансформаторы и автотрансформаторы.

В большинстве крупных системных аварий, произошедших вследствие мощных геомагнитных бурь, разрушающему воздействию подверглось в первую очередь трансформаторное оборудование: 25% –

между двумя подстанциями: теллурические токи – ТП1 (заземлитель – нейтраль – заземленная обмотка силового трансформатора Т1) – провода ЛЭП – ТП2 (заземленная обмотка силового трансформатора Т2 – нейтраль – заземлитель) – теллурические токи.

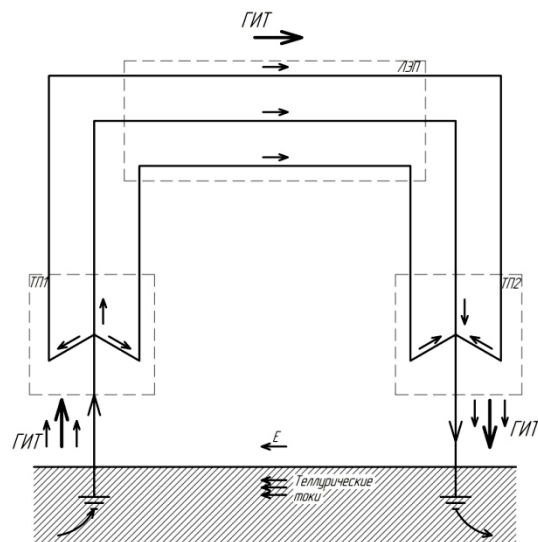


Рис. 4. Схема проникновения ГИТ в нейтраль силового трансформатора при Y-схеме включения трех фаз с заземленной нейтралью

силовые трансформаторы с бронестержневой конструкцией магнитной системы; 64% – силовые автотрансформаторы; 11% – высоковольтные ЛЭП (рис. 5).

Воздействие ГИТ на силовые трансформаторы и автотрансформаторы заключается в насыщении их магнитной системы [15]. Проходя через заземленную нейтраль силового трансформатора или автотрансформатора, ГИТ производит дополнительное одностороннее подмагничивание сердечника и смещение рабочего линейного режима в нелинейную часть гистерезиса (рис. 6).

Следует отметить, что известные подходы к расчету воздействия ГИТ на электрические системы используют в качестве исходных данных параметры горизонтальной компоненты геоэлектрического поля на поверхности земли, которую считают неизменной по величине и направлению в пределах области, занимаемой рассматриваемой электрической сетью, то есть геоэлектрическое поле предполагается потенциальным, что позво-

ляет применять законы линейных электрических цепей с активным сопротивлением, где источником является геоэлектрическое поле

в данный момент времени, и квазипостоянный геоиндуцированный ток можно принять постоянным [16].

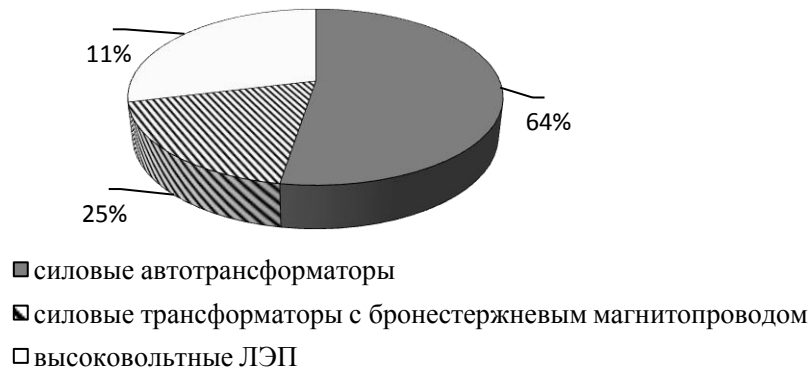


Рис. 5. Уязвимость электрооборудования СЭС к геомагнитным бурям

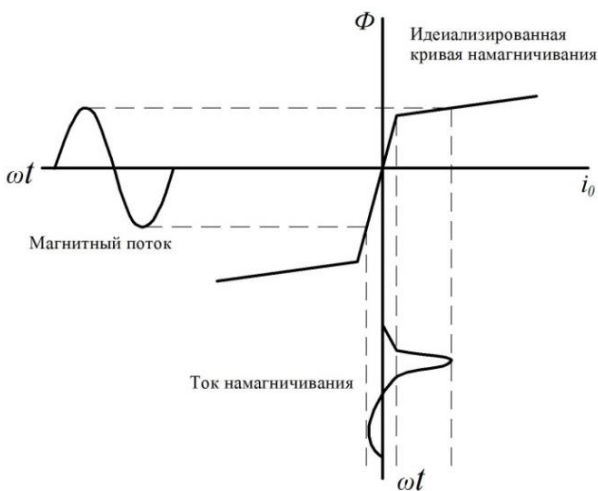


Рис. 6. Смещение рабочего режима трансформатора в нелинейную часть при протекании ГИТ

Установлено, что степень намагничивания магнитопровода силовых автотрансформаторов и трансформаторов зависит от конструкции магнитной системы [17-19]. Зависимости средних значений магнитной индукции в поперечном сечении стержня магнитопровода при протекании по обмоткам постоянного тока $B_0 = f(I)$ для трехфазного силового трансформатора ТРДН – 63000/110 с трехстержневым типом магнитопровода, трёхфазного силового трансформатора ТДЦ – 400000/220 с бронестержневым типом магнитопровода и однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН – 267000/500/220 с броневым типом магнитопровода показаны на рис. 7.

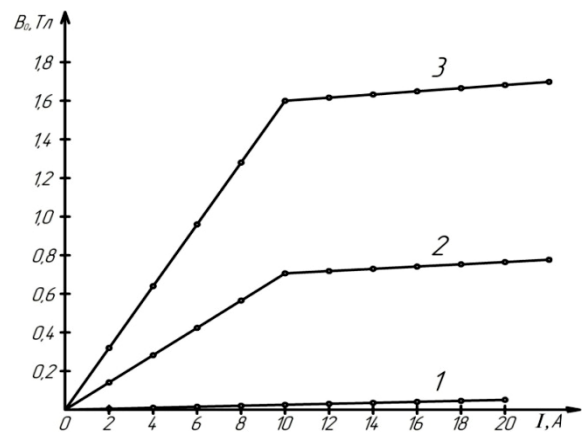


Рис. 7. Зависимости средней магнитной индукции в стержне магнитопровода от постоянного тока: 1 – ТРДН – 63000/110; 2 – ТДЦ – 400000/220; 3 – АОДЦТН – 267000/500/220

При токе $I = 10$ А, протекающем по заземленным обмоткам, начинается насыщение магнитопровода трехфазного силового трансформатора ТДЦ – 400000/220 с бронестержневой магнитной системой и магнитопровода однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН – 267000/500/220 с броневой магнитной системой. При этом значение средней магнитной индукции в боковых стержнях бронестержневой магнитной системы трехфазного силового трансформатора ТДЦ – 400000/220 равна 0,74 Тл, то есть в 2,2 раза меньше значения средней магнитной индукции в стержне броневой магнитной системы однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН –

267000/500/220, которое равно 1,62 Тл. Средняя индукция в стержне трёхфазного силового трансформатора ТРДН – 63000/115 с трехстержневой магнитной системой равна 0,019 Тл, и при токе $I = 10$ А магнитная система не насыщена.

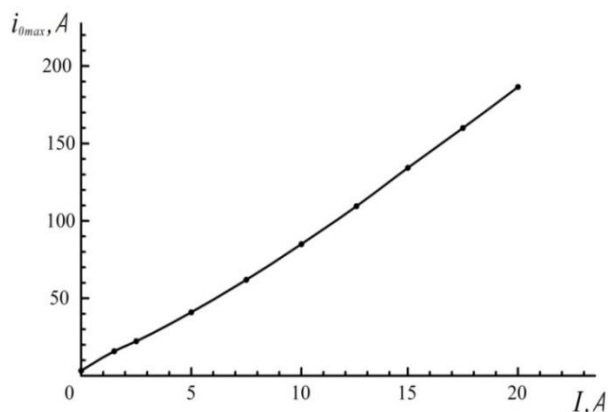


Рис. 8. Зависимость максимальных значений тока намагничивания от величины постоянного тока однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН – 267000/500/220

Насыщение магнитной системы постоянным током приводит к возрастанию несину-

соидальных токов намагничивания. Путем компьютерного моделирования получены максимальные значения тока намагничивания для однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН – 267000/500/220 при вариациях постоянного тока (рис. 8).

В результате моделирования процессов насыщения магнитной системы получено, что максимальные значения токов намагничивания в присутствии постоянного тока многократно превосходят паспортное значение тока холостого хода $I_x = 3,26$ А однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН – 267000/500/220.

В результате исследований установлено, что воздействие геоиндуцированного тока на силовые трансформаторы и автотрансформаторы приводит к насыщению магнитной системы, возрастанию токов намагничивания, искажению формы кривой тока в обмотках, локальному перегреву обмоток и элементов конструкции и оказывает отрицательное влияние на нормальную работу систем электроснабжения в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеев Б.А.** Системные аварии и меры по их предупреждению / Б.А. Алексеев // Энергохозяйство за рубежом. 2005. № 4. С. 78-83.
2. **Худяков В.В.** Проблемы энергосистем США / В.В. Худяков // Электричество. 2006. № 6. С. 7-20.
3. **Березнев Ю.И.** О проблеме обеспечения надежности электроснабжения / Ю.И. Березнев // Энергетик. 2007. № 10. С. 24-25.
4. Оценка уязвимости систем электроснабжения различной топологии к геомагнитным возмущениям / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, О.В. Самолина, А.А. Козуб // Промышленная энергетика. 2016. № 8. С. 16-23.
5. Space weather effects on electric power transmission grids and pipelines / R. Pirjola, A. Viljanen, A. Pulkkinen et al. Amm. GeoForschungsZentrum Potsdam. D-14473, Germany // Effect of space weather on technology infrastructure. 2004. P. 235-256.
6. Geomagnetic induction during highly disturbed space weather conditions: studies of ground effects // Finnish meteorological institute contributions. 2003. № 42. 90 p.
7. **Ермолаев Ю.И.** Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды / Ю.И. Ермолаев, М.Ю. Ермолаев // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т. 8. № 1. С. 5-35.
8. **Boteler D.H.** Geomagnetic hazards to conduction networks / D.H. Boteler // Natural Hazards 28. 2003. P. 537-561.
9. **Pirjola R.** Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems / R. Pirjola // Surveys in geophysics. 2002. P. 71-90.
10. Магнитные бури в октябре 2003 года: отчет коллаборации «Солнечные экстремальные события 2003 года (СЭС-2003)» / М.И. Панасюк, С.Н. Кузнецов, Л.Л. Лазутин, С.И. Авдюшин. М., 2004. 41 с.

11. **Kielen B.** Solstormar, transienta geomagnetiska stormingar / B. Kielen // Elforsk report (in Swedish). Stockholm, Sweden: Elforsk, 2004.

12. Расчет квазипостоянных токов в ЛЭП 110 кВ, 220 кВ и 500 кВ региональной энергосистемы при магнитных бурях: отчет о НИР (заключ.) / рук. В.В. Вахнина. Тольятти: Тольятт. гос. ун-т, 2008. 298 с.

13. **Вахнина В.В.** Расчет геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения при геомагнитных бурях / В.В. Вахнина, Д.А. Кретов, В.А. Кузнецов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 6. С. 244-246.

14. Анализ механизмов распространения геоиндуцированных токов в системообразующих электрических сетях различной топологии / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Кузнецов и др. // Электричество. 2015. № 5. С. 36-45.

15. **Вахнина В.В.** Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях: монография / В.В. Вахнина. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 104 с.

16. **Boteler D.** Modelling of geomagnetically induced current / D. Boteler // Final Report, Geological Survey of Canada and Ontario Hydro Collaborative Research Project, august 1998.

17. Влияние конструкции силового трансформатора на намагничивание магнитопровода постоянным током / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, Д.А. Кретов и др. // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2 (32). С. 30-35.

18. **Вахнина В.В.** Зависимость насыщения магнитной системы силовых трансформаторов постоянным магнитным потоком от конструкции магнитопровода / В.В. Вахнина, В.А. Шаповалов, О.В. Самолина // Федоровские чтения – 2015: сборник тр. XLV Междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. М.: Изд. дом МЭИ, 2015. С. 177-179.

19. Насыщение магнитной системы силового однофазного автотрансформаторами квазипостоянными токами / В.В. Вахнина, В.Н. Кузнецов, В.А. Шаповалов и др. // ЭЛЕКТРО. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. 2016. № 5 С. 28-33.

Вахнина Вера Васильевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Самолина Ольга Владимировна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

Vera V. Vakhnina – DR. Sc., Professor, Head: Department of Power Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Olga V. Samolina – Senior Lecturer, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Togliatti State University

Статья поступила в редакцию 01.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.365.5

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ В УСТАНОВКАХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский

APPLICATION OF MICROWAVE ELECTRONIC DEVICES FOR DIELECTRIC HEATING UNITS

A.V. Fedorov, Yu.S. Arkhangelskiy

Рассмотрены вопросы применения СВЧ электронных приборов в установках диэлектрического нагрева, приведены параметры этих приборов и оценена энергетическая эффективность технологических установок, в которых они используются. Обоснована целесообразность применения в установках СВЧ диэлектрического нагрева широкополосных СВЧ электронных приборов и указаны возможные типы таких приборов. Указано на возможность применения в СВЧ электротехнических установках СВЧ электронных приборов для конкретных параметров обрабатываемых диэлектриков.

Ключевые слова: СВЧ приборы, установка диэлектрического нагрева, магнетрон, лампа бегущей волны, лампа обратной волны, клистрон, ЛБВ, ЛОВ, СВЧ триод

Сверхвысокочастотные электронные приборы (СВЧ приборы) в установках диэлектрического нагрева (У СВЧ ДН) используются в источниках энергии в качестве генераторов СВЧ электромагнитных колебаний (СВЧ электромагнитного поля, СВЧ энергии) для термообработки диэлектрических сред, материалов и изделий [1, 2].

Радиоэлектроника начала освоение СВЧ диапазона электромагнитных колебаний для решения задач радиолокации, но во второй половине 50-х годов XX века начались и получили широкое распространение в 60-е – 70-е годы прошлого века научные

The article considers the problems relating the application of microwave electronic devices in dielectric heating installations, provides the parameters of these devices, and estimates the energy efficiency of technological units used to install the given devices. The authors established the efficiency of broadband microwave devices in microwave dielectric heating units and defined the possible types of these devices. Such microwave electronic devices can be installed in the microwave equipment and used for specific parameters of processed dielectrics.

Keywords: microwave devices, dielectric heating installation, magnetron, traveling wave tube, backward wave tube, klystron, TWT, BWT, microwave triode

исследования и опытно-конструкторские работы по применению СВЧ энергии в технологических установках для, как тогда говорили, СВЧ нагрева [3-7].

Для СВЧ приборов (СВЧ генераторов) У СВЧ ДН выделены, по сути дела, фиксированные частоты: 433 МГц $\pm 0,2\%$; 915 МГц $\pm 2,73\%$; 2450 МГц $\pm 2,04\%$; 5800 МГц $\pm 1,29\%$; 22152 МГц $\pm 0,56\%$, из которых в промышленных У СВЧ ДН применяются частоты 433 МГц, 915 МГц, 2450 МГц, причем наиболее широко применяются СВЧ приборы, работающие на частоте 2450 МГц [8].

Основными особенностями, которыми должны обладать СВЧ приборы технологического назначения, являются:

- надежная работа на нагрузку с большим и переменным во времени коэффициентом отражения Γ ;
- высокий КПД;
- большой срок службы;
- низкое анодное напряжение;
- отсутствие рентгеновского излучения;
- компактность;
- простота изготовления.

По этим критериям среди СВЧ приборов лидером является, разумеется, магнетрон, хотя в работах [1, 2, 9] указывается возможность построения У СВЧ ДН на клистродах, вакуумных и полупроводниковых СВЧ триодах. С годами полностью подтвердился прогноз в отношении магнетронов. Они до сих пор являются доминирующими среди СВЧ генераторов У СВЧ ДН. В табл. 1 приведены сведения о типичных магнетронах источников энергии У СВЧ ДН [10-12].

Таблица 1

Параметры и характеристики магнетронов источников энергии У СВЧ ДН

Тип	f , МГц	$P_{СВЧ}$, кВт	КПД, %	Срок службы, ч	$K_{смU}$, тах нагрузки	U_a , кВ	I_a , А	m , кг	Охла- ждение	Источ. информ.
М-136-1	2450	0,55	70	–	4	3,9	0,2	0,9	ВЗ	[10]
М112-1	2450	0,57	52	1250	–	3,6-3,9	0,2	1,0	ВЗ	[11]
М105-1	2450	0,79	–	1000	4	–	0,27- 0,29	–	ВЗ	[11]
М150	2450	1,0	66	–	3	3,8	0,42	1,1	ВД	[10]
М143-1	2450	1,5	67	–	2,5	3,7	0,6	1,5	ВД	[10]
М141	2450	3,0	64	–	2,5	5,8	0,8	2,5	ВД+ВЗ	[11]
М168	2450	5,0	60	2000	3,0	5,3	1,0	–	ВД	[11]
М146	2450	10	65	–	2,5	9,0	2,5	14	ВД	[10]
М171	915	0,6	70	2000	3,0	3,4	0,25	1,5	ВЗ	[10]
М143-Д	915	1,5	70	–	2,5	3,8	0,6	5	ВД	[10]
М193	915	25	75	2000	3,0	9,5	3,5	9,5	ВД+ВЗ	[11]
М116	915	50	75	2000	3,0	13,0	5,0	–	ВД+ВЗ	[11]
М116-М	915	75	85	2500	3,0	17,5	5,0	–	ВД+ВЗ	[11]
М116-100	915	100	85	2500	3,0	19,5	6,0	–	ВД+ВЗ	[11]
М147-М	433	5,0	70	–	2	6,2	1,3	9	ВД+ВЗ	[11]
–	433	50	75	–	–	–	–	12,5	–	[12]

Обозначения: ВЗ – воздушное охлаждение; ВД – водяное охлаждение; ВД+ВЗ – водяное охлаждение рубашки магнетрона и воздушное охлаждение вывода энергии

Согласно табл. 1 в среднем у магнетронов КПД $\eta_m = P_{СВЧ}/P \approx 70\%$, если $P_{СВЧ}$ – мощность СВЧ электромагнитной волны, отдаваемой генератором в волновод; P – мощность, потребляемая магнетроном от электрической сети, а минимальный коэффициент стоячей волны нагрузки магнетрона, безопасный для его работы, равен $K_{смU} \approx 3$, так что КПД по использованию СВЧ энергии в У СВЧ ДН $\eta_k = P_{полн}/P \approx 75\%$, если $P_{полн}$ – СВЧ мощность, использованная в рабочей камере на СВЧ диэлектрический нагрев. В таком слу-

чае полный КПД У СВЧ ДН, использующей магнетрон в качестве СВЧ генератора, равен $\eta_{полн} = \eta_m \eta_k \approx 53\%$.

Наилучшее согласование с СВЧ генератором в У СВЧ ДН удастся получить при применении в У СВЧ ДН камеры с бегущей волной (КБВ), собранной на короткозамкнутом отрезке неоднородного волновода, частично заполненного обрабатываемым диэлектриком. В этом случае обычно $K_{смU} \leq 1,2$, так что $\eta \geq 99\%$, и в этом случае $\eta_{полн} \approx 70\%$. Но геометрические размеры

такой КБВ зависят от длины волны магнетрона λ , относительной диэлектрической проницаемости ε' и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика, а так как диэлектрические параметры диэлектрика зависят от температуры, размеры КБВ рассчитываются на средние значения ε' и $\operatorname{tg} \delta$ в диапазоне температур, так что на всех стадиях СВЧ термообработки они не будут оптимальными, что скажется на величине коэффициента полезного действия КБВ по использованию СВЧ энергии η_k [9]. Сохранить максимально высокий КПД источника СВЧ энергии можно, используя перестраиваемый по частоте СВЧ электронный прибор [13, 14]. В этом случае, изменяя $\lambda[\varepsilon'(T), \operatorname{tg} \delta(T)]$, можно не

только поддерживать согласование КБВ с СВЧ генератором, но и сохранить глубину проникновения СВЧ мощности в обрабатываемый диэлектрик в КЛТ [15, 16].

В качестве электронного прибора с перестраиваемой частотой в источнике СВЧ энергии У СВЧ ДН может быть использована лампа бегущей волны – генератор (ЛБВ-генератор) (табл. 2) [17, 18]. В качестве задающего генератора ЛБВ-усилителя может быть использован полупроводниковый синтезатор частот СВЧ диапазона. Характеристики некоторых полупроводниковых опорных генераторов приведены в табл. 3 [19].

Структурная схема У СВЧ ДН с источником энергии на базе ЛБВ-генератора показана на рисунке.

Таблица 2

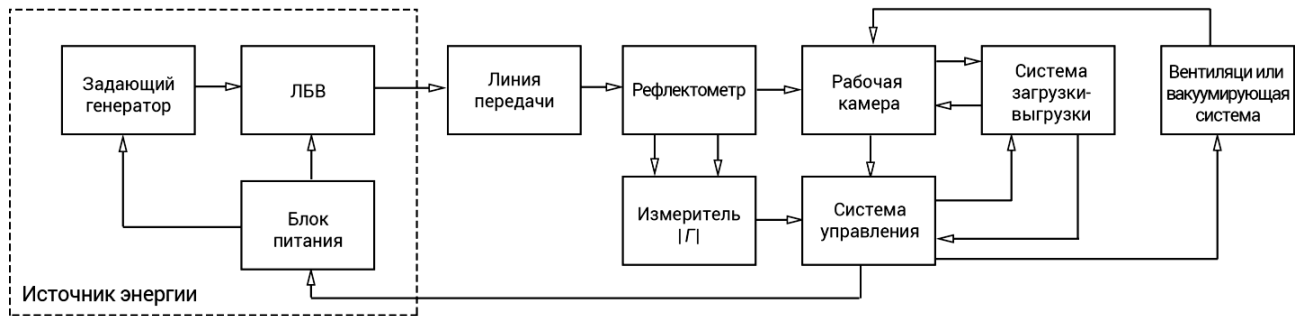
Параметры и характеристики ЛБВ

Тип	Рабочий диапазон, МГц	$P_{\text{СВЧ}}$, кВт	Усиление, дБ	$U_{\text{зам. сист}}$, кВ	Ток катода, мА	m , кг	Охлаждение	Источ. информ.
УВ-А3001	1000-2000	0,4	40	5	440	10	ВД	[17]
УВ-А3001М	800-2400	0,25	35	5	440	10	ВД	[17]
УВ-А3002	1000-2000	1	30	8,3	840	14	ВД	[17]
УВ-А3003	2000-4000	0,4	40	5,4	440	7	ВД	[17]
УВ-А3003М	1800-5400	0,3	35	5,4	440	7	ВД	[17]
УВ-А3004	2000-4000	1,2	30	9,2	840	12	ВД	[17]
УВ-А3004М	1800-5400	1	30	9,2	840	12	ВД	[17]
УВ-А3025	4000-12000	0,1	30	6,4	220	3	ВЗ	[17]

Таблица 3

Параметры и характеристики полупроводниковых опорных генераторов

Тип	Производитель	Рабочий диапазон, МГц	$P_{\text{СВЧ}}$, дБмВт	Шаг перестройки, Гц	Питание	Источ. информ.
HMC-C083	Analog Devices (США)	2000-6000	17	0,6	+3.6В, +20В, +6В	[18]
HMC832 (HMC832A)	Analog Devices (США)	25-3000	5	3	+3.3В	[18]
HMC833	Analog Devices (США)	25-6000	5	3	+5В, +3.3В	[18]
ADF4356	Analog Devices (США)	53-6800	4	3	+3.3В	[18]
HMC835	Analog Devices (США)	33-4100	3	–	+5В, +3.3В	[18]
DSN-3019A-119+	Mini Circuits (США)	1788-3019	1.5	100000	+5В, +15В	[19]
WSN-4G+	Mini Circuits (США)	700-4000	8	10 МГц	+10В, +22В	[19]



Структурная схема У СВЧ ДН с источником энергии на базе ЛБВ

Система управления такой установки получает информацию о состоянии обрабатываемого диэлектрика с помощью рефлектометра, позволяющего измерить $|\Gamma[\epsilon'(T), \text{tg } \delta(T)]|$ рабочей камеры [20]. Следуя алгоритму управления, система управления отправляет сигнал блоку питания задающего генератора, который изменяет управляющее напряжение на задающем генераторе и перестраивает его частоту так, чтобы $|\Gamma[\epsilon'(T), \text{tg } \delta(T)]| \rightarrow 0$. Затем сигнал усиливается ЛБВ, и в рабочую камеру поступает СВЧ энергия, обеспечивающая термообработку обрабатываемого диэлектрика.

КПД ЛБВ $\eta_{\text{ЛБВ}} \approx 30\text{-}40\%$, [20]. Потребляемая мощность по питанию у типичных полупроводниковых опорных генераторов обычно не превышает нескольких ватт [18, 19], что значительно меньше потребляемой мощности ЛБВ или мощных полупроводниковых усилителей. Таким образом, полный КПД У СВЧ ДН с источником энергии на базе ЛБВ-генератора определяется

$$\eta_{\text{полн}} = \eta_{\text{ЛБВ}} \eta_k$$

и составляет

$$\eta_{\text{полн}} \approx 26\%,$$

что меньше, чем у У СВЧ ДН на магнетроне.

В качестве широкополосного СВЧ электронного прибора в У СВЧ ДН может быть использована лампа обратной волны (ЛОВ), КПД которой $\eta_{\text{ЛОВ}} \approx 40\text{-}50\%$, что уже ближе к КПД магнетрона [20]. К сожалению, информации о серийно выпускае-

мых ЛОВ, генерирующих СВЧ мощность в диапазоне частот, требуемом для технологических целей, не имеется.

Разумеется, как в свое время и магнетроны, современные ЛБВ и ЛОВ для их применения в установках СВЧ диэлектрического нагрева должны быть доработаны так, чтобы они удовлетворяли приведенным выше требованиям к СВЧ генераторам У СВЧ ДН.

Вторыми после магнетронов по распространенности применения в У СВЧ ДН являются клистроны [9, 20]. Основной областью их применения остаются мощные радиотехнические системы.

Клистрон превосходит другие электронные приборы СВЧ по уровню генерируемой им СВЧ мощности, благодаря чему клистроны конкурируют с магнетроном в тех технологических процессах, где требуется особо большая мощность. Заменить в таком случае источник энергии в У СВЧ ДН на одном клистроне можно лишь применением в У СВЧ ДН многогенераторного источника энергии, собранного на нескольких мощных магнетронах.

Основной недостаток клистрона – достаточно высокая цена даже у наиболее простых конструкций (двухрезонаторных клистронов). У такого клистрона полный КПД, учитывающий потери энергии в колебательной системе, равен [20]:

$$\eta_{\text{полн}} = \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{рез}},$$

где $\eta_{\text{эл}}$ – электронный КПД; $\eta_{\text{рез}}$ – КПД резонаторной системы, а так как $\eta_{\text{эл.мах}} \approx 40\%$, $\eta_{\text{рез.мах}} \approx 60\text{-}80\%$, то $\eta_{\text{полн}} \leq 20\text{-}30\%$, то есть КПД весьма мал.

Но уже в трехрезонаторном клистроне $\eta_{эл. max} \approx 74\%$. Дальнейшее повышение КПД и выходной СВЧ мощности клистрона возможно в многолучевых и многорезонаторных клистро-нах, но любое усложнение конструкции клистрона по сравнению с конструкцией двухрезонаторного клистро-на резко увеличивает цену СВЧ электронного прибора, что делает его использование в У СВЧ ДН нецелесообразным [9, 20].

Если же использовать источник энергии У СВЧ ДН на клистроне-усилителе, то можно управлять выходной мощностью, сохраняя высокий КПД. Так, пятирезонаторный клистрон при напряжении 25,5 кВ и токе 3,25 А позволяет получить непрерывную мощность 50 кВт на частоте 2450 МГц при КПД более 70% [21]. Из-за коэффициента усиления 75 дБ такой клистрон можно возбуждать маломощным генератором [21].

Определенные перспективы применения в источниках энергии У СВЧ ДН имеют

СВЧ вакуумные и полупроводниковые триоды [9, 10-21]. Успехи в создании полупроводниковых СВЧ электронных приборов позволяют по-прежнему достаточно высоко оценить перспективу их применения в У СВЧ ДН. Малые габариты таких приборов дают возможность набрать нужную СВЧ мощность одновременной работой нескольких полупроводниковых СВЧ триодов на одну рабочую камеру [22]. Применение таких СВЧ генераторов позволяет упростить источник питания из-за более низкого напряжения, необходимого этим генераторам, и обеспечить требуемое распределение подаваемой СВЧ энергии по поверхности обрабатываемого диэлектрика. Параметры и характеристики полупроводниковых СВЧ приборов, которые могут быть применены в качестве выходных усилителей источника энергии У СВЧ ДН, приведены в табл. 4 [23-26]. Но эти возможности пока остаются нереализованными.

Таблица 4

Параметры и характеристики полупроводниковых СВЧ транзисторов

Тип	Тестовые частоты, МГц	$P_{СВЧ}$, Вт	Усиление, дБ	U_{num} , В	КПД	K_{cmU} , max нагр.	Производитель	Источ. информ.
BLC2425M8LS300P	2450	300	17	32	58%	10	Ampletron	[23]
BLF2425M7L250P	2450	250	15	28	51%	5	Ampletron	[23]
BLC2425M9LS250	2450	250	18.5	32	61%	5	Ampletron	[23]
BLF2425M6L180P	2450	180	13.3	28	53%	5	Ampletron	[23]
BLF2425M7L140	2450	140	18.5	28	52%	10	Ampletron	[23]
BLF2425M9LS140	2450	140	19	28	56%	10	Ampletron	[23]
BLF10H6600PS	400-1000	600	20.8	50	46%	40	Ampletron	[23]
BLF0910H6L500	900-930	500	18	50	61%	30	Ampletron	[23]
MHE1003N	2400-2500	230	14	26	61,5%	10	NXP	[24]
MHT1000H	2400-2500	140	13,2	28	45%	10	NXP	[24]
MHT1001H	2400-2500	190	13.2	28	46.2%	10	NXP	[24]
MHT1003N	2400-2500	250	15.9	32	59%	10	NXP	[24]
MHT1004N	2400-2500	300	15.2	32	57.9%	5	NXP	[24]
MHT1002N	915	350	20.7	48	66.9%	10	NXP	[24]
MHT2001N	902-928	175	33.8	50	72.8%	10	NXP	[24]
2П982И	1000	75	10	40	50%	—	НПП «Пульсар»	[25]
2П9103ГС	860	150	16	32	40%	—	АО «НИИЭТ»	[26]
2П9103ДС	860	300	16	32	40%	—	АО «НИИЭТ»	[26]

Наконец, мощные СВЧ электровакуумные триоды рассматриваются как достаточно перспективные приборы для применения в электротехнологических установках в длинноволновой части диапазона вплоть до метровых и дециметровых длин волн. Они обеспечивают установки мощностью до единиц кВт при КПД $\approx 60-70\%$.

Таким образом, в У СВЧ ДН по-прежнему доминируют магнетроны. Они в полной мере удовлетворяют требованиям к электронным приборам, используемым в источниках энергии У СВЧ ДН. Однако

стремление увеличить качество продукции путём более равномерной термообработки ставит вопрос о применении в СВЧ электротехнологии широкополосных электронных СВЧ приборов, таких как ЛБВ-генераторы и ЛОВ.

Однако, на наш взгляд, главной проблемой на пути применения СВЧ электронных приборов в источниках энергии У СВЧ ДН являются высокие цены на эти приборы. От решения этой проблемы зависит дальнейшее распространение установок СВЧ диэлектрического нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пюшнер Г.** Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. М.: Энергия, 1968. 311 с.
2. СВЧ энергетика / под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 2. 272 с.
3. **Долгополов Н.Н.** Электрофизические методы технологии строительных материалов / Н.Н. Долгополов. М.: Стройиздат, 1964. 312 с.
4. **Рогов И.А.** Физические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов, А.В. Горбатов. М.: Пищевая промышленность, 1974. 583 с.
5. **Рогов И.А.** Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман, Г.В. Лысов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 200 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. 325 с.
7. **Рогов И.А.** Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. М.: Агропромиздат, 1988. 325 с.
8. **Хардман Л.** Распределение частот электромагнитного спектра в условиях напряженного графика / Л. Хардман // Электроника. 1972. № 20. С. 30-32.
9. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
10. Магнетроны для бытового и промышленного применения / В.П. Еремин и др. // Современные проблемы применения СВЧ энергии: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Саратов, 1993. С. 57-59.
11. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.
12. Современные мощные магнетроны дециметрового диапазона / А.Н. Каргин и др. // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 54-57.
13. **Федоров А.В.** Определение погонных параметров рабочей камеры с бегущей волной на прямоугольном волноводе, работающей в многочастотном режиме / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3 (8). С. 30-36.
14. **Архангельский Ю.С.** К расчёту камер с бегущей волной установок СВЧ диэлектрического нагрева, работающих в многочастотном режиме / Ю.С. Архангельский, А.В. Федоров // Вопросы электротехнологии. 2015. № 2 (7). С. 42-49.
15. **Федоров А.В.** Многочастотная обработка диэлектриков в камерах лучевого типа / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 14-18.
16. **Федоров А.В.** Эффективность многочастотной СВЧ обработки диэлектриков в камерах лучевого типа / А.В. Федоров //

Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 5-9.

17. Широкополосные ЛБВ (НПЦ «Электронные системы»). Сайт АО НПЦ «Алмаз». URL: http://almaz-rpe.ru/production/wideband_lbv/ (дата обращения: 14.06.2017).

18. Продукция компании Analog Devices. Официальный сайт фирмы Analog Devices, Inc., 2013. URL: <http://www.analog.com/ru/index.html> (дата обращения: 14.06.2017).

19. **Никитин Ю.А.** Генераторы, управляемые напряжением производства Mini-Circuits для радиочастотных синтезаторов / Ю.А. Никитин // Компоненты и технологии. 2003. № 29. С. 72-74.

20. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

21. **Архангельский Ю.С.** Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 280 с.

22. **Федоров А.В.** Применение полупроводниковых генераторов в СВЧ электро-технологических установках / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Актуальные проблемы электронного приборостроения: сб. тр. науч.-техн. конф. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 2. С. 165-169.

23. Продукция компании «Ampleon». Официальный сайт фирмы «Ampleon». URL: <http://www.ampleon.com> (дата обращения: 14.06.2017).

24. Продукция компании NXP. Официальный сайт фирмы NXP® Semiconductors. URL: <http://www.nxp.com> (дата обращения: 14.06.2017).

25. Динамика развития отечественных мощных кремниевых полевых ВЧ и СВЧ МОП транзисторов / В.В. Бачурин, А.Г. Васильев, М.М. Крымко, О.В. Сопов // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2011. № 2 (227). С. 3-15.

26. Мощные СВЧ LDMOS-транзисторы ОАО «НИИЭТ» для средств радиосвязи и радиолокации / В. Кожевников, В. Дикарев, В. Горохов, А. Цоцорин // Электронные компоненты. 2015. № 4. С. 60-63.

Фёдоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

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

Yu. S. Arkhangelskiy – 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 28.05.17, принята к опубликованию 20.06.17

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Экземпляры номеров журнала «Вопросы электротехнологии» можно приобрести в редакции журнала по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, СГТУ имени Гагарина Ю.А., корпус 1, первый этаж, ком. 133 а, тел. 8(8452) 99-87-63

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.365

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ЗАГОТОВОК В МОДУЛЬНЫХ КУЗНЕЧНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЯХ

В.Б. Демидович, П.А. Ситько, В.В. Андрушкевич, Ю.Ю. Перевалов

HEAT CONTROL SYSTEMS IN MODULAR FORGING INDUCTION HEATERS

V.B. Demidovich, P.A. Syt'ko, V.V. Andrushkevich, Yu.Yu. Perevalov

Рассмотрены современные системы управления температурой в модульных кузнечных индукционных нагревателях. Показано, что при цифровом программном управлении необходима разработка высокоточных моделей индукционного нагрева. Однако при наличии возмущений необходимо использовать обратные связи по температуре. Предложен оригинальный способ управления температурой на выходе нагревателя по контролю температуры в особой точке в «активной зоне». Приведены результаты моделирования системы управления многомодульными индукционными нагревателями с использованием «активной зоны».

Ключевые слова: индукционный нагрев, модульная установка, термообработка, температурный профиль, многозонный нагрев

Индукционный нагрев получил большое распространение в условиях серийного кузнечного производства. В промышленно развитых странах доля индукционного нагрева мерных заготовок доходит до 95%. Кузнечные индукционные нагреватели (КИН) постоянно совершенствуются. В последние годы получила распространение модульная структура индукционных нагревателей [1] при непрерывном движении загрузки. Использование такой структуры дает значительные преимущества в техноло-

The article analyses modern heat control systems in modular forging induction heaters. It is shown that highly accurate models of induction heating are important for digital control. However, it is necessary to use the temperature feedback under the possible perturbation processes. The authors present a unique heat control method at the heater output to control the temperature at a singular point in the «active zone». The simulation results of multi-modular control induction heaters using the «active zone» are presented.

Keywords: induction heating, modular installation, heat treatment, temperature profile, multi-zone heating

гии индукционного нагрева, так как позволяет оптимизировать режимы работы оборудования относительно:

- энергопотребления;
- окалинообразования;
- снижения сваривания торцов заготовок;
- возможности поддержки постоянного температурного профиля при производительностях, отличных от номинальной величины;
- эффективной отработки возможных возмущений, таких как изменения скоро-

сти, диаметра и начальной температуры заготовки и, тем самым, минимизировать количество брака при нагреве [1-4].

Для полноценной реализации достоинств модульных индукционных установок необходима развитая система цифрового управления, которая включает алгоритмы управления в стационарных и нестационарных режимах работы КИН, возникающих при первоначальном пуске нагревателя, при остановках технологических линий и повторном пуске после остановки, при изменении производительности технологических линий. Нестационарные режимы могут характеризоваться сильным изменением температурного поля загрузки, электрических параметров нагревателя и потенциально могут приводить к большому проценту брака.

С позиции теории управления индукционный нагреватель является объектом с распределенными параметрами и ограниченной наблюдаемостью и управляемостью. Выходным параметром служит температурное поле загрузки, а входным – передаваемая в загрузку мощность. В промышленных условиях доступной для наблюдения и снятия сигнала для обратной связи является температура поверхности, причем в ограниченном количестве точек. Но качество нагрева оценивается по средней температуре и температурному перепаду по объему [5].

Можно выделить три наиболее характерных типа систем автоматического управления (САУ) нагревом в кузнечных индукционных нагревателях.:

1. Разомкнутые по температуре САУ с программным управлением.
2. Замкнутые САУ с отбором сигнала обратной связи от модели нагревателя.
3. Замкнутые САУ с обратной связью по температуре одной или нескольких точек нагреваемого объекта.

Первый тип систем применяется при незначительных или предсказуемых возмущениях, воздействующих на систему. Получить программу управления можно, основываясь на результатах численной модели, которая обладает достаточной точно-

стью, или экспериментальным путем во время пуско-наладочных работ. В стационарном режиме такая система обеспечивает качественный нагрев, однако в нестационарном режиме возникают значительные возмущения теплового режима, приводящие к большому количеству брака.

Второй тип систем управления с обратной связью от модели нагревателя может обеспечить качественный нагрев заготовок при достаточной точности модели и соответствующих алгоритмах управления, а также требуется знать зависимость между температурами в наблюдаемых и ненаблюдаемых точках, которую можно получить из математических моделей.

Третий тип систем управления с обратной связью по температуре от контрольных точек нагреваемого объекта может обеспечить качественный нагрев заготовок при обеспечении достаточной точности съема температуры в контрольных точках и соответствующих алгоритмах управления. Базовые значения параметров нагрева для системы управления могут быть получены так же, как для САУ первого типа, из результатов вычисления численной модели или экспериментальным путем во время пусконаладочных работ.

САУ третьего типа с несколькими точками контроля температуры, как правило, подразумевает наличие пирометрического контроля температуры после каждого индукционного модуля индукционного нагревателя. Такой подход позволяет подробно контролировать процесс нагрева, однако при взаимном влиянии индукторов друг на друга имеется негативное влияние на качество регулирования, что может приводить к существенному затягиванию процесса регулирования. Стоит также отметить, что высокопроизводительные нагревательные линии в кузнечном производстве могут содержать десятки индукционных модулей, из-за чего система управления становится излишне сложной. В связи с этим в статье исследование регулирования нестационарных режимов работы модульных индукционных нагревателей проводилось с целью определения возможности снижения изме-

нений температурного поля загрузки на выходе индукционного нагревателя при помощи САУ третьего типа с одной точкой контроля температуры внутри УИН при регулировании нагрева во время переходного процесса, то есть только одним индукционным модулем (активной зоной).

В программной среде Universal 2D было проведено моделирование нагрева стального прутка в проходном модульном индукционном нагревателе. Применение метода многозонного нагрева позволяет достичь значительного эффекта во время переходных процессов, возникающих при работе установки во время первоначального старта, при разгрузке, из-за изменения производительности или смены сортамента. Это объясняется тем, что модульная структура позволяет применять различные алгоритмы задания мощности на каждом участке линии нагрева независимо друг от друга, что в сочетании с малой инерционностью индукционной системы позволяет эффективно отработать возникшие в процессе нагрева возмущения, тем самым минимизируя количество брака при нагреве.

Результаты численного моделирования процесса нагрева цилиндрических заготовок с использованием нескольких модулей

с независимыми преобразователями частоты показали высокую эффективность индукционных нагревателей с такой конфигурацией. Они дают возможность создания высокоэффективной и надежной системы управления кузнечным индукционным нагревателем на базе трех и более модулей.

В рассматриваемом случае в установке из трех модулей управление нагревом заготовки происходит только на втором модуле (активная зона) по пирометру, точка визирования которого располагается в определенной точке внутри второго индуктора, при этом мощность на первом и третьем индукторе поддерживается на постоянном уровне (рис. 1).

Из рис. 2 видно, что при условии достижения одинаковой температуры на выходе из индукционного нагревателя температурные кривые при различной производительности пересекаются в одной точке внутри второго индукционного модуля. Это позволяет при поддержании температуры в этой особой точке на постоянном уровне за счет изменения мощности второго индуктора добиваться минимальных отклонений температуры заготовки на выходе в процессе перехода на новый режим.

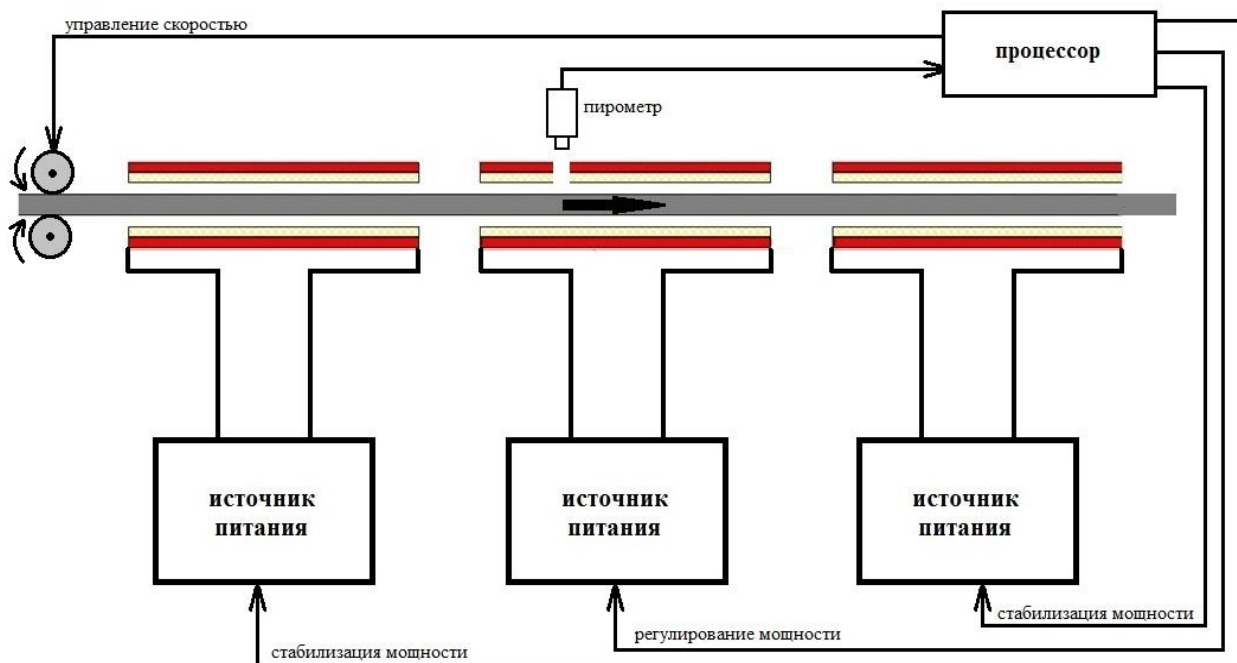


Рис. 1. Схема системы управления модульным индукционным нагревателем третьего типа с одной точкой контроля

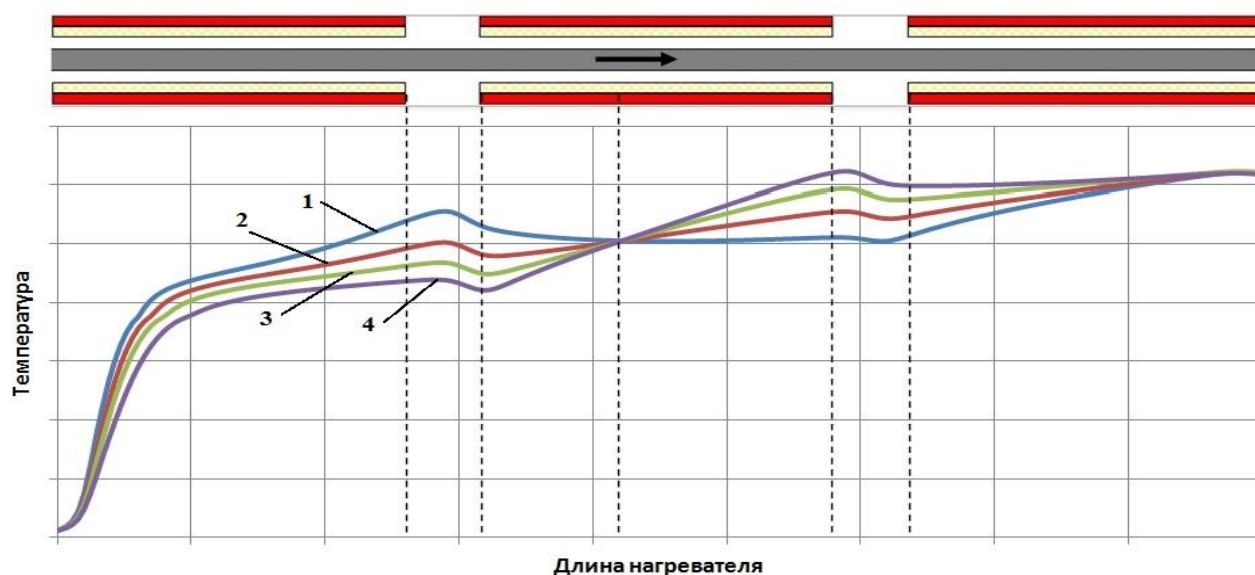


Рис. 2. Распределение температурного поля на поверхности заготовки по длине модульного индукционного нагревателя с использованием САУ третьего типа с одной точкой контроля для различных производительностей: 1 – 3,5 т/ч, 2 – 4,125 т/ч, 3 – 4,7 т/ч, 4 – 5,5 т/ч

Для нагреваемых теплотехнически тонких тел с линейными свойствами было аналитически доказано существование этой точки [6]. Для цилиндрических нелинейных тел моделирование показало, что при поддержании постоянно определенной температуры в точке пересечения температурных кривых путем регулирования мощности генератора с

обратной связью по температуре, фиксируемой оптическим пирометром в точке контроля, данный метод регулирования позволяет практически полностью убрать колебания температуры загрузки на выходе индукционной нагревательной установки мерных заготовок диаметром 130 мм и длиной 420 мм во время переходных процессов (рис. 3) [7].

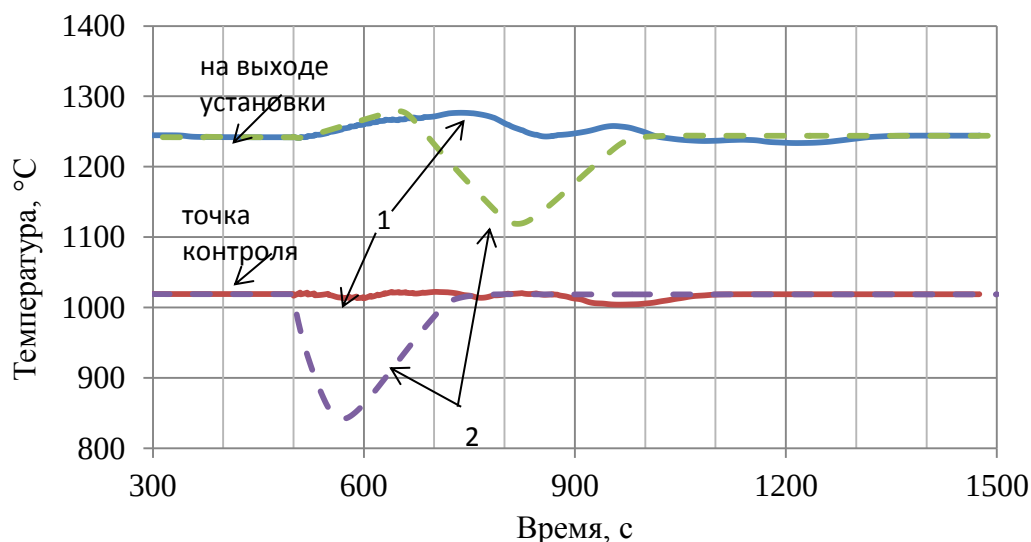


Рис. 3. Изменение температуры поверхности заготовки при использовании САУ третьего типа с одной точкой контроля (1) и САУ первого типа (2) во время переходного процесса при изменении производительности с 4,7 до 3,5 т/ч

На рис. 4 показано, как изменяется мощность второго индуктора в процессе регулирования.

Отдельно были рассмотрены случаи регулирования переходных процессов во время первоначального пуска с пустого ин-

дуктора и во время разгрузки индукционной системы. Как видно из рис. 5, использование системы управления с обратной связью по температуре, фиксируемой в центральном модуле, позволяет в значительной мере сократить или даже полностью избежать некачественного нагрева заготовок.

Также был рассмотрен случай регулирования переходных процессов во время кратковременной остановки с последующим горячим пуском. Из результатов моделирования, представленных на рис. 6, видно, что предлагаемая система управления в данном случае дает значительное улучшение нагрева.

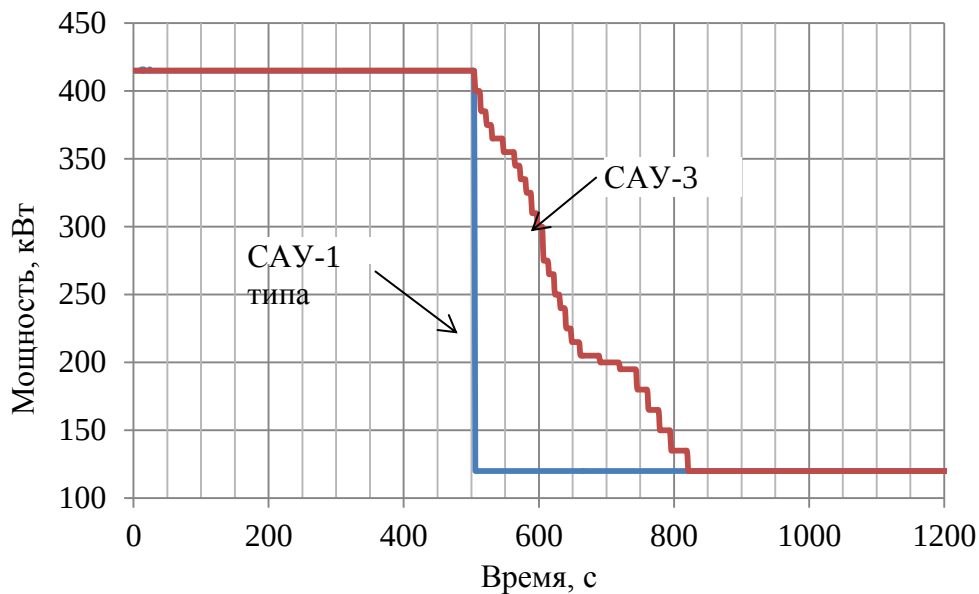


Рис. 4. Изменения мощности на втором модуле при изменении производительности с 4,7 до 3,5 т/ч

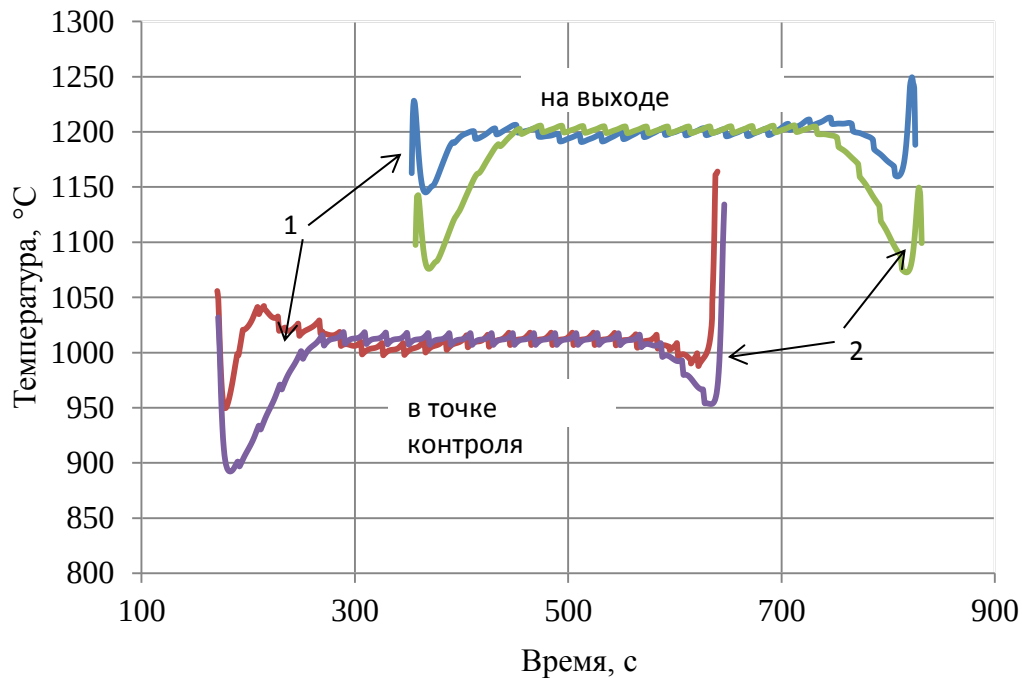


Рис. 5. Изменения температуры поверхности заготовки при использовании САУ третьего типа с одной точкой контроля (1) и при работе второго индуктора на номинальном напряжении (2)

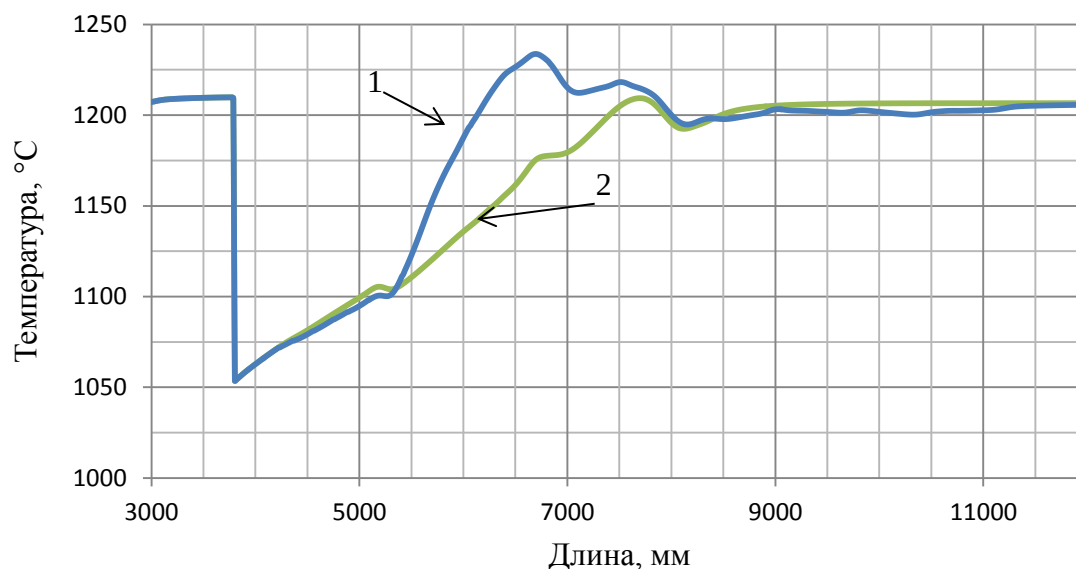


Рис. 6. Изменения средней температуры заготовки на выходе установки при повторном пуске после пятиминутной остановки работы: 1 – с использованием САУ третьего типа с одной точкой контроля; 2 – при номинальной мощности на втором индукторе при включении

Таким образом, можно сказать, что рассматриваемая САУ с зонным управлением позволяет гибко и точно адаптировать модульный индукционный нагреватель при работе с изменяющейся производительностью

и сортаментом нагреваемых заготовок, сохраняя при этом высокую энергоэффективность системы и максимальную возможную стабильность технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модульные индукционные установки в кузнечном производстве / В.Б. Демидович, В.А. Оленин, Е.А. Григорьев, П.А. Ситько // Индукционный нагрев. 2013. Вып. № 4 (26).
2. ForgeLine индукционный нагрев: ковка / SMS Elotherm GmbH, Remscheid, Germany, 2014.
3. Forge operators boost productivity and energy efficiency with new induction furnace technology / Jochen Gies, Dirk M. Schibisch // HEAT PROCESSING (9). 2011.
4. InductoForge® Modular Induction Billet Heaters, BULLETIN InductoForge Brochure. Rev. 5. 2011.

5. Демидович В.Б. Модульные индукционные установки нагрева прутков повышенной надежности / В.Б. Демидович, Б.М. Никитин, А.В. Титов // Индустрия. 2007. № 1.

6. Demidovich V., Blake E., Churchill R. United States Patent. Single-point temperature control system for a multi-section line furnace / Patent No.: US 6,259,071 B1 July 10. 2001

7. Демидович В.Б. Модульный индукционный нагреватель цилиндрических заготовок непрерывного действия / В.Б. Демидович, П.А. Ситько. Патент РФ № 136665. 10 января 2014.

Демидович Виктор Болеславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Viktor B. Demidovich – Dr.Sc., Professor, Department of Electrotechnological and Conversion Systems, Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Ситько Петр Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник межотраслевой лаборатории «Современные электротехнологии» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Peter A. Syt'ko – PhD, Senior Research Fellow at Interindustrial Laboratory Modern Electrotechnologies, Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Андрушкевич Владислав Витальевич – кандидат технических наук, сотрудник межотраслевой лаборатории «Современные электротехнологии» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)

Vladislav V. Andrushkevich – PhD, Research Fellow at Interindustrial Laboratory Modern Electrotechnologies, Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Перевалов Юрий Юрьевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Yuri Yu. Perevalov – Postgraduate, Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Статья поступила в редакцию 05.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

УДК 621.365

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ СИЛЬНО ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКЕ

А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, И.М. Генералов, А.О. Кулешов

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS TO THE THYRISTOR FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCTION HEATING UNDER VARYING LOAD CONDITIONS

A.B. Kuvaldin, M.A. Fedin, I.M. Generalov, A.O. Kuleshov

Приведено описание электротехнологического комплекса с индукционной тигельной печью, перестраиваемым преобразователем частоты и системой управления. Разработана модель трехпозиционного ре-

The article describes an electrotechnological system provided with a crucible induction furnace having a variable frequency converter and control system. The authors developed a model for a three step controller

гулятора и представлены результаты моделирования электрического режима печи в Simulink.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь, перестраиваемый тиристорный преобразователь частоты, трехпозиционное регулирование, моделирование

Постановка задачи. Индукционные тигельные печи (ИТП) достаточно широко применяются в промышленности для плавки различных металлов, при этом плавка стали в открытых и вакуумных ИТП ведется на средних и высоких частотах (до 440,0 кГц) в зависимости от емкости печи. Печи емкостью 0,06-2,5 т обычно питаются на частоте 1,0-4,0 кГц от тиристорных преобразователей частоты [1-3].

В качестве загрузки ИТП применяют кусковую ферромагнитную шихту (лом), то есть дискретную загрузку (ДЗ), в ходе нагрева и расплавления которой изменяются значения удельного электрического сопротивления и относительной магнитной проницаемости стали, а также меняется геометрия загрузки, так как куски шихты свариваются и оплавляются. В результате этого при плавке значительно изменяются электрические параметры электромагнитной системы «индуктор – ДЗ», а значит и выделяющаяся в печи мощность, что определяет необходимость применения соответствующих схем преобразователей частоты и специальных методов управления.

Для нагрева и расплавления ДЗ в ИТП следует поддерживать неизменной мощность, подводимую к шихте в течение всего технологического процесса, так как эта мера позволяет расплавить ДЗ за минимальное время, экономя электрическую энергию. Это достигается путем согласования параметров ИТП с ДЗ и источника питания на всех этапах нагрева и плавки.

В Национальном исследовательском университете «МЭИ» проведены исследования по определению параметров стальной ферромагнитной ДЗ (электрического сопротивления R и индуктивности L) методом физического моделирования. Эксперименты проводились на специальном стенде

and used Simulink to present the simulation results to the electric mode of the furnace.

Keywords: induction crucible furnace, variable thyristor frequency converter, a three step controller, simulation

и были определены зависимости параметров эквивалентной схемы замещения системы «индуктор – ДЗ» от влияющих факторов: средней температуры загрузки t_{cp} и напряженности магнитного поля H на поверхности загрузки.

Согласно проведенным исследованиям, диапазон изменения параметров ферромагнитной ДЗ весьма широк (R и L изменяются соответственно в 4 и 1,5 раза), поэтому требуется обеспечение изменения характеристик источника питания в широком диапазоне. В связи с этим был предложен специальный источник питания – перестраиваемый тиристорный преобразователь частоты (ТПЧ), имеющий три варианта инвертирующей схемы, что дало возможность использовать трехпозиционное регулирование процесса путем соответствующих переключений тириستоров [4-6].

В статье описывается схема разработанного перестраиваемого ТПЧ и приведены результаты исследования его работы при нагреве ферромагнитной стальной ДЗ до температур выше точки Кюри (около 1000°С).

Выбор способа регулирования и разработка алгоритмов управления процессом при использовании перестраиваемого ТПЧ. Рассматриваемые ИТП являются достаточно инерционными в тепловом отношении объектами управления и практика показывает, что систему регулирования теплового режима загрузки в этих печах можно строить по релейному принципу. Необходимая точность регулирования, обеспечиваемая системой управления ТПЧ, должна быть в пределах 5%.

Возможно также дополнительное плавное регулирование углом записывания вентилей инвертора в каждой топологии, но данный метод регулирования имеет недостатки.

1. Повышение напряжений на тиристорах моста инвертора тока при увеличении угла запираания, что сказывается также на значении активных потерь на коммутацию тиристором.

2. Ввиду ограничения сверху по напряжению пробоя для тиристором глубина регулирования мощностью по углу запираания может оказаться недостаточной для согласования нагрузки во всем диапазоне изменения её параметров.

Управляющими воздействиями могут быть напряжение индуктора U_u , частота тока f , распределение источников теплоты по объёму загрузки. Обычно управление осуществляется одним из указанных воздействий.

Перестраиваемый ТПЧ обладает широкими возможностями по регулированию выходных параметров, так как каждая из трех схем различается значением реактивной мощности компенсирующей конденсаторной батареи нагрузочного контура.

Рассматриваемый перестраиваемый ТПЧ имеет 3 различные топологии (варианта схемы). Проведенный анализ при постоянной нагрузке для каждой из трех топологий перестраиваемого ТПЧ позволил рассчитывать параметры под конкретный диапазон изменения параметров ферромагнитной ДЗ в ИТП. Параметры топологий подобраны так, что схема 1 обладает минимальной реактивной мощностью конденсаторной батареи, а схема 3 – максимальной. Осуществляется релейное трёхпозиционное регулирование режима перестраиваемого ТПЧ. Каждой позиции при регулировании соответствует одна определённая схема включения, наиболее эффективная для определенного интервала значений параметров загрузки (R и L). При работе по каждой из схем включения инвертор тока обеспечивает оптимальные энергетические режимы из-за минимального угла запираания вентилей, предоставляя возможность работать при относительно низком уровне потерь энергии при коммутациях в схеме.

Трёхпозиционные регуляторы обеспечивают хорошее качество регулирования для инерционных объектов с малым запаз-

дыванием, каким является ИТП с ферромагнитной ДЗ.

Регулятор работает по принципу *SPL* «нижний уровень» (схема 1) – *SP* «норма», то есть «средний уровень» (схема 2) – *SPH* «верхний уровень» (схема 3) (см. рис. 1). Величина ширины зоны нечувствительности (мертвой зоны) DB (схема 2) является регулируемым параметром настройки трехпозиционного регулятора. Увеличение ширины зоны нечувствительности DB не только уменьшает точность регулирования, но и может привести к тому, что в процессе работы САР регулирующий орган будет переключаться сразу между схемой 1 и схемой 3, то есть регулирование будет двухпозиционным. К такому же результату приводит значительное увеличение скорости реакции регулирующего органа. Диапазон нечувствительности (мертвая зона) DB устанавливается с центром в заданной точке.

Регулирование параметров рассматриваемого преобразователя частоты осуществляется по активной потребляемой мощности. Таким образом, перестраиваемый ТПЧ при трёхпозиционном регулировании будет переключаться либо между схемой 1 и схемой 2, либо между схемой 2 и схемой 3. Среднее значение активной мощности в кусковой ДЗ будет соответствовать мощности уставки трёхпозиционного регулятора.

Достоинством подобного метода регулирования является сохранение оптимальных режимов работы преобразователя частоты с высоким значением КПД. Некоторым недостатком следует считать появление в потребляемом токе преобразователя частоты субгармоник основной частоты преобразования, но их уровень значительно ниже при трёхпозиционном способе регулирования, чем при двухпозиционном [7].

На рис. 1 представлена функциональная схема перестраиваемого ТПЧ со схемой управления электрическими режимами преобразователя частоты. Система управления отслеживает изменение активного сопротивления нагрузки, измеряя активную мощность, потребляемую инвертором на постоянном токе с помощью датчика тока ДТ и датчика напряжения ДН1.

Используя датчик напряжения на индукторе ДН2, система управления измеряет частоту и амплитуду выходного напряжения, перестраиваемого ТПЧ для контроля режи-

мов работы и отработки внешних сбоев, а также служит элементом обратной связи для поддержания заданного угла записания тиристоров в перестраиваемом ТПЧ.

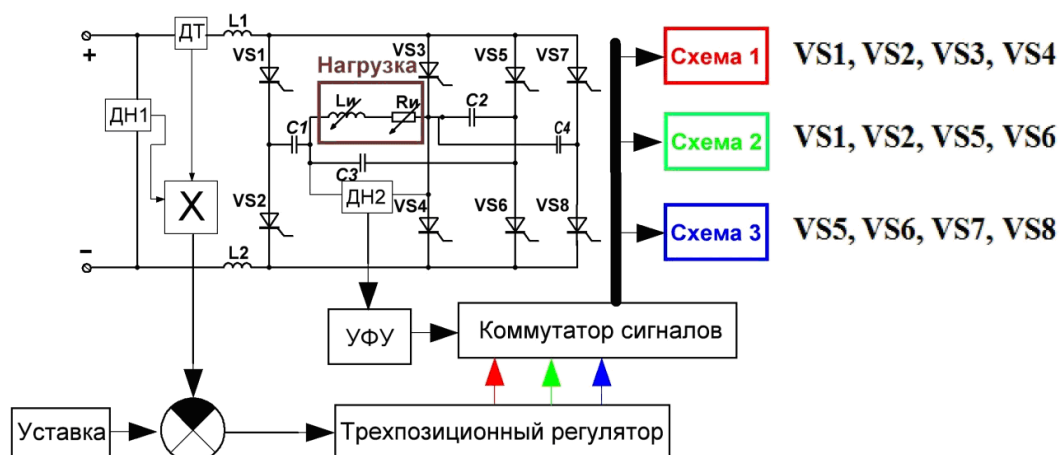


Рис. 1. Функциональная схема системы управления перестраиваемым ТПЧ. Для каждой схемы перестраиваемого ТПЧ указаны работающие тиристоры

Управление в каждой схеме перестраиваемого ТПЧ (схемы 1-3) выполняется по принципу самовозбуждения, обеспечивающего жёсткость внешней характеристики и малую зависимость выходного напряжения от параметров нагрузки. В таких схемах управления задающий генератор отсутствует и напряжение в цепь управления подается из цепи переменного тока инвертора через устройство фазового управления (УФУ).

В самовозбуждающемся параллельном инверторе тока на УФУ подаётся инвертированное напряжение, снимаемое непосредственно с зажимов нагрузки. Параметры УФУ влияют на величину угла опережения β , то есть угла сдвига импульсов управления тиристоров относительно моментов перехода кривой инвертированного напряжения через нуль. Этот угол, а также входное напряжение U_d в рассматриваемом инверторе являются управляющими воздействиями, а частота является производной величиной.

Реализация системы управления ТПЧ и системы автоматического контроля параметров ИТП с ферромагнитной ДЗ. Большинство серийно выпускаемых ТПЧ имеют параллельную или последовательно-параллельную мостовую схему инвертирования тока. Выходными параметрами ТПЧ

как источника питания являются частота тока f и напряжение на нагрузке U_d . Управляющими воздействиями могут быть напряжение выпрямителя U_d , частота f и угол опережения β , то есть угол сдвига импульсов управления тиристоров относительно момента перехода кривой выходного напряжения через нуль. Возмущающим фактором является сопротивление нагрузки инвертора.

Поскольку передаточные характеристики всех трёх схем инверторов тока в перестраиваемом ТПЧ зависят от параметров сильно изменяющейся нагрузки, непосредственный анализ устойчивости затруднителен в таких условиях, почему было применено имитационное моделирование системы управления в среде *MATLAB/Simulink* [8].

На рис. 2 представлена схема моделирования управлением инвертором тока, представляющая собой УФУ, синхронизация которой осуществляется по временам перехода напряжения нагрузочного контура через нуль [9-11]. Детектором перехода через нуль служит элемент *Hit Crossing*. Далее импульсы синхронизации поступают на источник линейно нарастающего напряжения, выполненного на основе интегратора (*Integrator*), сбрасываемого в ноль импульсами синхронизации, образуя генератор пилообразного

напряжения. Линейное напряжение сравнивается с опорным, величина которого задает угол опережения β управления инвертором тока. При изменении параметров нагрузки R и L резонансная частота нагрузочного контура изменяется, поэтому меняются значения амплитуды напряжения «пилы» и опорного напряжения, чтобы поддерживать неизменным угол опережения β .

Поддерживать неизменным угол опережения β возможно, если постоянно измерять амплитуду «пилы» и относительно данного измерения выставлять опорное напряжение, что реализовано на модели инвертора тока с самовозбуждением на моделях в *MATLAB/Simulink* и *LTSpice* на рис. 2.

После запуска перестраиваемого ТПЧ в основную работу вступает система трёхпозиционного регулирования мощности в нагрузке, модель которой изображена на рис. 3. Разница между уставкой по мощности и средней мощностью поступает на звено ограничения *Dead Zone*, формирующее зону нечувствительности в области рассогласований около нуля.

Далее сигнал поступает на два нелинейных звена, представленных двухпозиционными релейными элементами с гистерезисом *Relay1* и *Relay2*, причем один из них имеет пороги срабатывания и отпускания в области положительных невязок, другой – отрицательных.

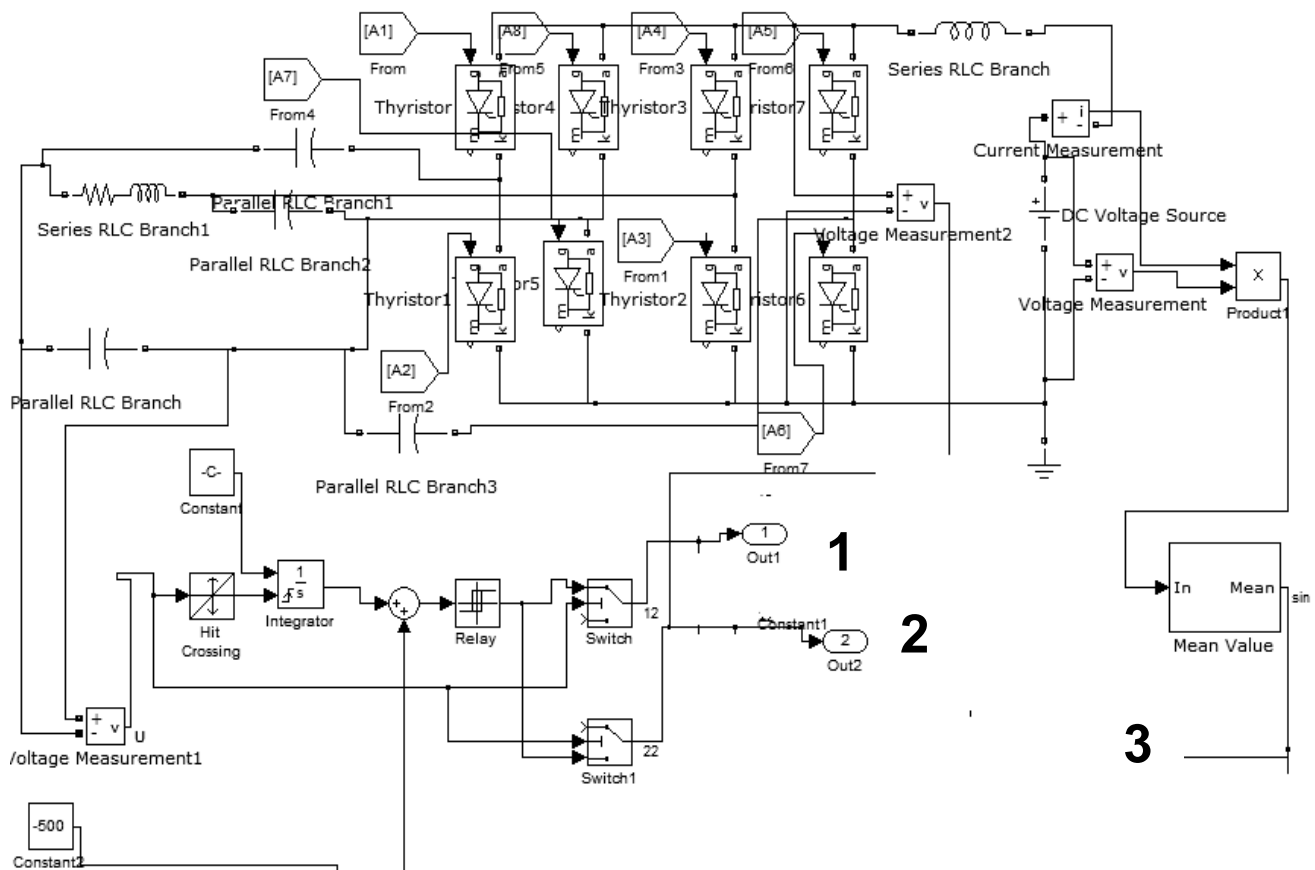


Рис. 2. Модель самовозбуждающегося перестраиваемого ТПЧ, выполненная в *Simulink*

Выходные логические сигналы с релейных элементов с помощью логических элементов формируются в три сигнала управления, включающие одну из трёх схем перестраиваемого ТПЧ в работу, представляющие сигналы выбора схемы инвертора. По данной схеме видно, что в каждый мо-

мент времени может работать только одна из трёх схем инвертора.

Сигналы выбора схемы инвертора управляют работой коммутаторов (*Switch*), через которые подаются импульсы управления со схемы УФУ на соответствующие пары тиристоров, обеспечивающие работу

инверторной схемы с заданной конфигурацией нагрузочного контура.

Временные диаграммы работы перестраиваемого ТПЧ по схеме 2 представлены на рис. 4, из которого видно, что пере-

ключение вентилей в схеме происходит с опережением выходного напряжения инвертора, т.е. на индукторе. Как уже было указано, напряжение на индукторе синусоидально.

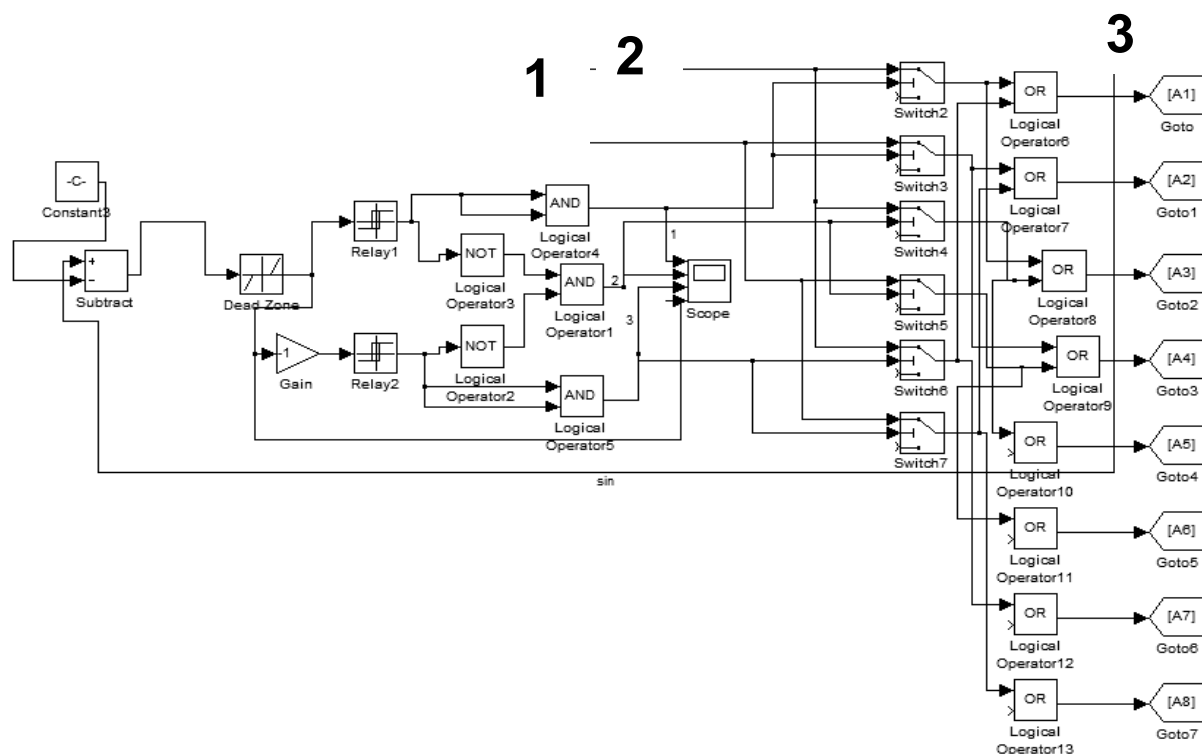


Рис. 3. Модель трёхпозиционного регулятора с коммутатором импульсов управления перестраиваемым ТПЧ

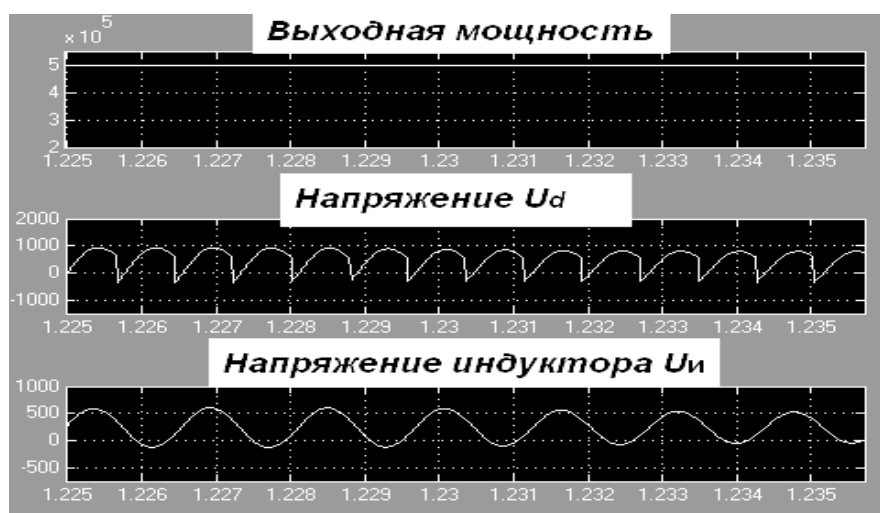


Рис. 4. Временные диаграммы ТПЧ, работающего по схеме 2

Те же временные диаграммы, но на более длительном отрезке времени, приведены на рис. 5 при работе перестраиваемого ТПЧ в режиме стабилизации средней вы-

ходной мощности. На данном рисунке видны колебания выходной мощности при трёхпозиционном регулировании в стационарном режиме.

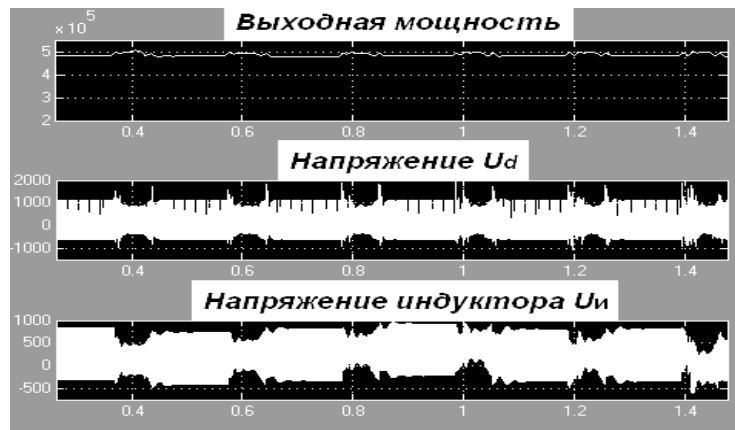
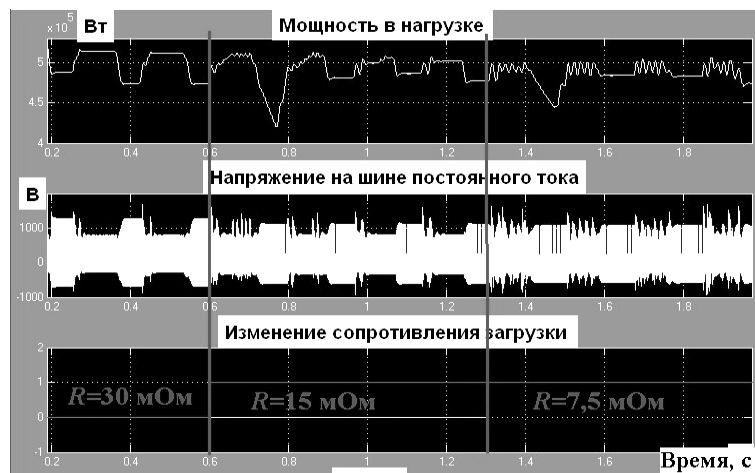
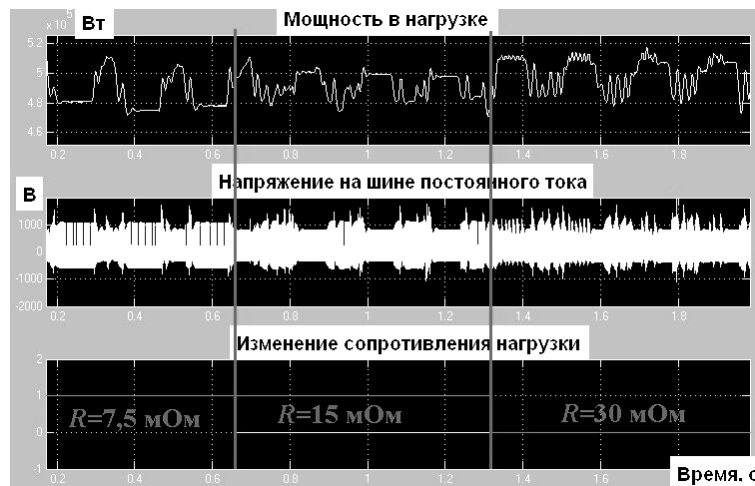


Рис. 5. Временные диаграммы при автоматическом регулировании средней выходной мощности в нагрузке



а



б

Рис. 6. Диаграммы регулирования мощности при изменении сопротивления нагрузки: а – при уменьшении; б – при увеличении

На рис. 6 а, б изображены диаграммы изменения средней мощности при отработке системой управления изменений активного сопротивления R в диапазоне

$7,5 \div 30$ мОм при $L = 25$ мкГн, причём на рис. 6 а при уменьшении сопротивления R , на рис. 6 б – при его увеличении.

Из диаграмм рис. 4-6 следует, что статическая точность регулирования составляет не хуже $\pm 5\%$ при изменении параметров нагрузки ($R = 7,5 \div 30$ мОм и $L = 20 \div 40$ мГн). Параметры трёхпозиционного регулятора: уставка мощности равна 500 кВт, ширина зоны нечувствительности $DB = 10$ кВт, пороги переключения *Relay1* и *Relay2* составляют 5 кВт, гистерезис $h = 1$ кВт, статический коэффициент передачи цепи обратной связи $k = 1$, постоянная времени цепи обратной связи составляет $T = 0,2$ с.

Диаграммы выходных сигналов трёхпозиционного регулятора представлены на рис. 7 (логические сигналы выбора рабочей схемы инвертора, 1 – инвертор работает, 0 – не работает), где можно отметить, что в данном режиме работы для стабилизации средней мощности в нагрузке производятся переключения между схемами 2 и 3 перестраиваемого ТПЧ. Следует отметить хорошую динамику переключений, которая позволяет работать с малым перерегулированием выходной мощности в нагрузке.

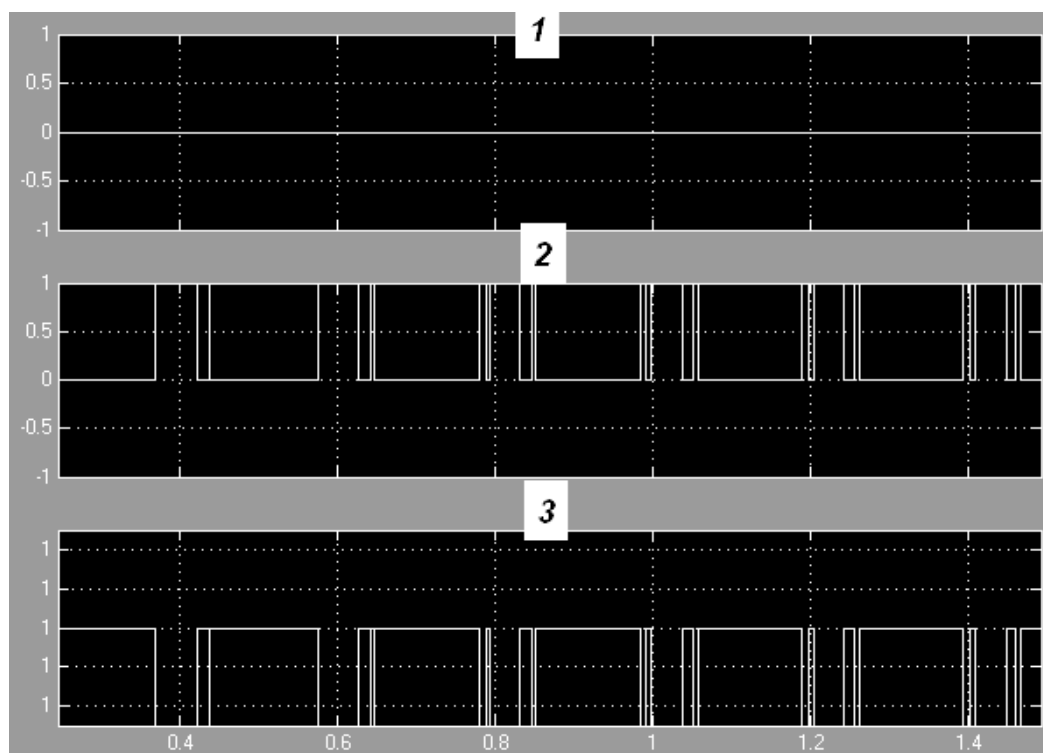


Рис. 7. Диаграмма переключений сигналов выбора работающего инвертора

Итак, проведенные исследования позволяют отметить следующие достоинства применения предложенного перестраиваемого ТПЧ с трехпозиционным управлением.

1. Повышение КПД электротехнологического комплекса, включающего индукционную тигельную печь, перестраиваемый тиристорный преобразователь частоты и систему трехпозиционного регулирования, за счет поддержания потребляемой печью на постоянно высоком уровне и, следовательно, сокращения времени плавки.

2. Снижение воздействия на питающую электросеть и возможность использования облегченного входного фильтра для подав-

ления высокочастотных гармоник потребляемого тока.

3. Снижение потерь энергии в тиристорах ТПЧ и возможность снижения их установленной мощности.

4. Хорошие динамические характеристики системы управления при резком изменении параметров загрузки.

По результатам исследований модели системы управления перестраиваемым ТПЧ в *Simulink* установлено, что точность регулирования составляет не хуже $\pm 5\%$ в широком диапазоне изменения нагрузки при заданных выше параметрах системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротермическое оборудование: справочник / под ред. А.П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980. 416 с.
2. **Сойфер В.М.** Выплавка стали в кислых электропечах / В.М. Сойфер. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.
3. Индукционные среднечастотные плавильные комплексы для литейного производства / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, С.А. Рачков, К.В. Якушев // Литейное производство. 2006. № 5. С. 23-27.
4. **Kuvaldin A.** Determination of electrical parameters of lumpy ferromagnetic charge when heated to Curie point / A. Kuvaldin, M. Fedin, I. Generalov // Acta Technica. 62 (2017). № 1. P. 085-092. Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i.
5. **Кувалдин А. Б.** Повышение энергетической эффективности электротехнологического комплекса с индукционной тигельной печью при плавке ферромагнитной кусковой загрузки / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, И.М. Генералов // Промышленная энергетика. 2016. № 5. С. 19-25.
6. Экспериментальное исследование физической модели индукционной тигельной печи / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, И.М. Генералов и др. // Труды XVI Междунар. конф. МКЭЭЭ-2016. Крым, Алушта, 2016. С. 259-261.
7. **Цыпкин Я.З.** Релейные автоматические системы / Я.З. Цыпкин. М.: Наука, 1974. 575 с.
8. **Куо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления / Б. Куо. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.
9. **Казанцев Ю.М.** Синтез управления следящими инверторами систем электропитания / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев, Е.Г. Тихонов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 6. С. 20-25.
10. **Шапиро С. В.** Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии / С.В. Шапиро, Ю.М. Зинин, А.В. Иванов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 166 с.
11. **Гальперин М.В.** Практическая схемотехника в промышленной автоматике / М.В. Гальперин. М.: Энергоатомиздат, 1987. 320 с.

Кувалдин Александр Борисович – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»

Федин Максим Андреевич – кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»

Генералов Иван Михайлович – аспирант Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»

Кулешов Алексей Олегович – аспирант Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»

Alexander B. Kuvaldin – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply to Industrial Enterprises and Electrotechnologies, Moscow Power Engineering Institute (National Research University)

Maxim A. Fedin – PhD, Associate Professor, Department of Power Supply to Industrial Enterprises and Electrotechnologies, Moscow Power Engineering Institute (National Research University)

Ivan M. Generalov – Postgraduate, Department of Power Supply to Industrial Enterprises and Electrotechnologies, Moscow Power Engineering Institute (National Research University)

Aleksei O. Kuleshov – Postgraduate, Department of Power Supply to Industrial Enterprises and Electrotechnologies, Moscow Power Engineering Institute (National Research University)

Статья поступила в редакцию 02.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.365.5

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ
В ДИАПАЗОНЕ СВЧ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова, С.В. Тригорлый

MEASURING DIELECTRIC PROPERTIES OF DIELECTRICS
IN THE MICROWAVE FREQUENCY RANGE AT HIGH TEMPERATURES

Yu.S. Arkhangelskiy, S.G. Kalganova, S.V. Trigorly

Предложен метод измерения диэлектрических параметров материалов в диапазоне СВЧ при высокой температуре, использующий СВЧ генератор, излучающую рупорную антенну, контейнер с исследуемым материалом, обеспечивающий его нагрев до высокой температуры, систему измерения модуля коэффициента отражения от поверхности исследуемого материала и программное обеспечение расчета относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Ключевые слова: измерение, диэлектрические параметры, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, модуль коэффициента отражения

При проектировании рабочих камер с бегущей волной (КБВ) и камер лучевого типа (КЛТ) установок СВЧ диэлектрического нагрева (СВЧ электротермических установок) нужно знать зависимости относительной диэлектрической проницаемости

The proposed method can be used to measure the dielectric properties of materials in the microwave frequency range at high temperatures. The new method applies a microwave generator, a radiating horn antenna, a container including the research material, which ensures heating at high temperatures, a system for measuring the modulus of reflection coefficient from the surface of the test material, and the software to estimate the relative dielectric permeability and tangent of the angle for dielectric losses.

Keywords: measurement, dielectric properties, relative dielectric permeability, tangent of the angle for dielectric losses, reflection coefficient modulus

ϵ' и тангенса диэлектрических потерь $\tan \delta$ обрабатываемого диэлектрика от температуры T . Так, например, в КБВ на нерегулярном волноводе ширина узкой стенки рассчитывается по соотношению [1]:

$$b(z) = b_2 + \frac{a\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}{60\pi^2} \left[-\frac{\Lambda}{4\pi} X_n + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_n\right)^2 + (R_n z)^2} \right], \quad (1)$$

где a – ширина широкой стенки волновода; $b_2 = 0,5\lambda / \sqrt{\epsilon' \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}$ – толщина слоя обрабатываемого диэлектрика; λ – длина волны СВЧ генератора; Λ – длина волны в

прямоугольном волноводе сечением $a \times b(l)$; l – длина слоя обрабатываемого диэлектрика; $R_n(\epsilon', \tan \delta)$, $X_n(\epsilon', \tan \delta)$ – активное и реактивное погонное сопротивление обрабатываемого диэлектрика; координата z отсчи-

тывается от места короткого замыкания в КБВ к СВЧ генератору, а ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ выбирают средними в рабочем диапазоне температур.

В КЛТ длину волны СВЧ генератора выбирают с учетом глубины проникновения СВЧ электромагнитной волны в диэлектрик по мощности δ_p , причем [1]

$$\delta_2 = \frac{0,5\lambda}{\pi\sqrt{2\epsilon'\left(\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}-1\right)}}. \quad (2)$$

Наконец, при решении самосогласованной краевой задачи электродинамики и тепломассопереноса при математическом моделировании технологического процесса термообработки диэлектрика нужно знать распределение прошедшей в диэлектрик СВЧ мощности по оси x , отсчитываемой от поверхности плоского обрабатываемого диэлектрика, на которую падает плоская СВЧ электромагнитная волна из излучающего рупора КЛТ, в глубину диэлектрика, то есть

$$P(x) = P_0 \exp\left[-2\int_0^x \alpha[\epsilon'(T), \operatorname{tg} \delta(T), x] dx\right], \quad (3)$$

где P_0 – СВЧ мощность, прошедшая в диэлектрик, при $x = 0$; α – коэффициент затухания, причем [1]

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \sqrt{2\epsilon'} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right). \quad (4)$$

Соотношения (1)-(4) свидетельствуют о существенном влиянии ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ на принимаемые при проектировании СВЧ электротермических установок решения. Методы измерения на СВЧ, в том числе ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$, рассмотрены например, в работах [2, 3], а в СВЧ электротехнологии – в работах [1, 4], а так как практически у всех диэлектриков $\epsilon'(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$, необходимо определение этих зависимостей в широком диапазоне температур.

На рис. 1 показана блок-схема установки для измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика с помощью волноводного моста (двойного волноводного тройника), хорошо зарекомендовавшей себя в измерениях параметров различных диэлектриков, термообработка которых планировалась с помощью СВЧ диэлектрического нагрева [1].

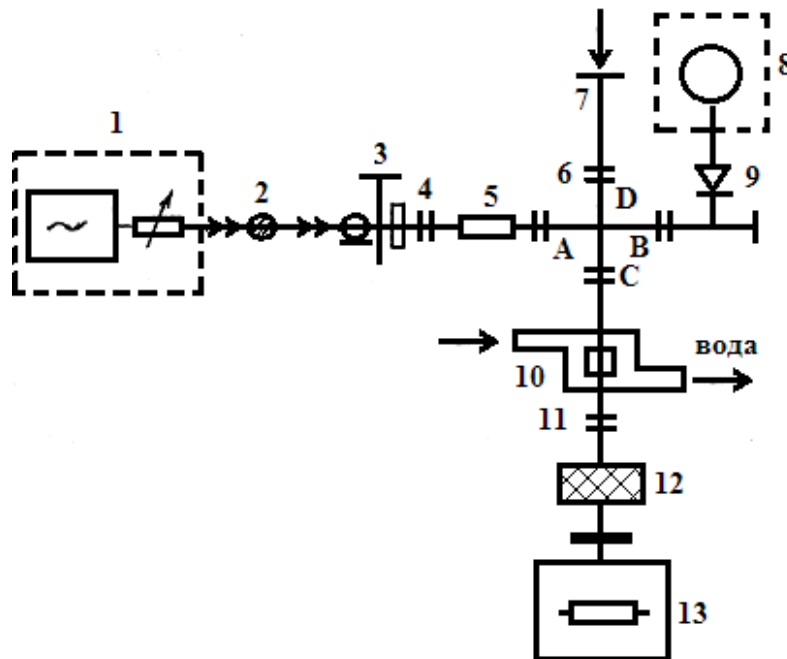


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ с помощью волноводного моста: 1 – СВЧ генератор; 2 – коаксиальный кабель; 3 – волноводно-коаксиальный переход; 4 – фланцевое соединение волноводов; 5 – аттенюатор; 6 – волноводный мост (двойной волноводный тройник); 7 – подвижный реактивный короткозамыкатель; 8 – индикаторный прибор с усилителем; 9 – детекторная головка; 10 – отрезок волновода, охлаждаемый водой; 11 – волноводная короткозамкнутая секция с исследуемым диэлектриком; 12 – исследуемый диэлектрик; 13 – электронагреватель

Габариты образца исследуемого диэлектрика

Частота, МГц	Габариты образца диэлектрика, см		
	a	b	c
2450	9	4,5	3-4
915	22	11	7-10
433	50	25	16-22

Для нагрева исследуемого диэлектрика в установке имеется электронагреватель (печь сопротивления косвенного действия) 13, позволяющая устанавливать и регистрировать заданную температуру. Тепловая развязка волноводного моста 6 и волноводной секции 11, нагреваемой в процессе измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$, осуществляется с помощью отрезка прямоугольного волновода 10, стенки которого охлаждаются проточной водой. Исследуемый диэлектрик размером $a \times b \times c$ размещен по скользящей посадке у короткозамкнутого конца однородного прямоугольного волновода сечением $a \times b$ (таблица). Процедура измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ с помощью этой установки изложена в работах [1, 2].

Если температура T велика и при измерении ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрик должен находиться не в волноводе, показанном на рис. 1, а в футеровке, предназначенной для защиты СВЧ генератора и элементов установки, и если из предназначенного для исследования диэлектрика трудно или не удастся изготовить образец с заданными размерами, то для измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ можно рекомендовать установку, в которой отсутствует контакт СВЧ тракта установки с исследуемым образцом диэлектрика (рис. 2).

В качестве контролируемого (измеряемого) параметра в этой установке используется модуль коэффициента отражения $|I(T)|$ падающей из излучающего рупора 8 на поверхность исследуемого диэлектрика 9 СВЧ электромагнитной волны, измеряемый с помощью рефлектометра 4, детекторных головок 5, 6 и измерительного прибора 7.

Исследуемый диэлектрик размещается в металлическом кожухе 10, выдерживающем рабочие температуры исследуемого диэлектрика (кожух помещен в печь сопротивления 11).

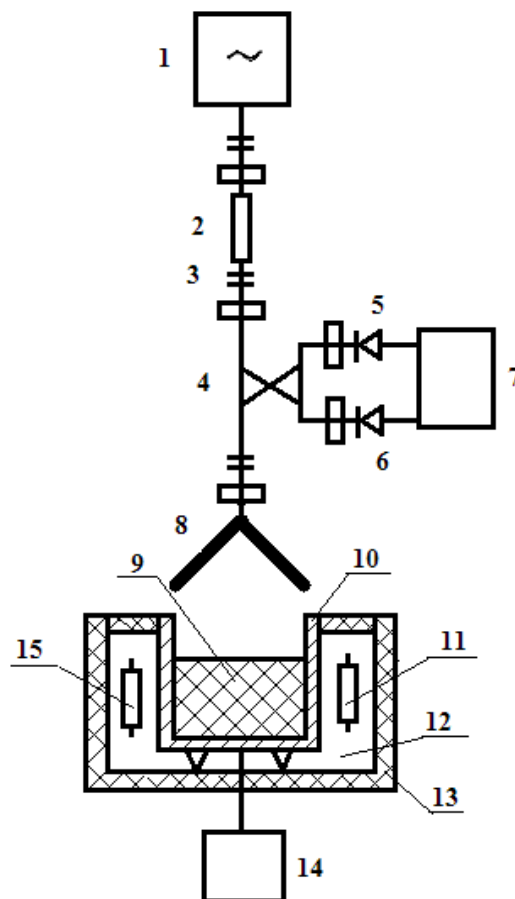


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$: 1 – СВЧ генератор; 2 – аттенюатор (ферритовый вентиль); 3 – фланцевое соединение волноводов; 4 – рефлектометр; 5, 6 – детекторные головки, регистрирующие величины отраженной и падающей волны; 7 – измеритель модуля коэффициента отражения; 8 – излучающий прямоугольный рупор; 9 – исследуемый диэлектрик; 10 – металлический кожух; 11, 15 – нагревательные элементы печи сопротивления; 12 – печь сопротивления; 13 – футеровка; 14 – измеритель температуры

Исследуемый диэлектрик имеет габариты $A \times B \times C$, где $A \times B$ – размер поперечного сечения кожуха, причем $A > a_p$, $B > b_p$, где $a_p \times b_p$ – размеры апертуры излучающего рупора, чтобы стенки кожуха не влияли на распространение СВЧ электромагнитной

волны в исследуемом диэлектрике (обычно $a_p \approx b_p$), причем для частоты СВЧ генератора 2450 МГц $a_p = 10$ см, для частоты 915 МГц $a_p = 30$ см, а для частоты 433 МГц $a_p = 60$ см.

Что касается толщины (глубины) образца исследуемого диэлектрика C , то в зависимости от возможностей программного обеспечения этих измерений $\delta_p \leq C \leq \delta_p$.

На рис. 3 приведены зависимости $\delta_p(\epsilon', \text{tg } \delta)$ для разрешенных к применению в СВЧ электротехнологических установках частот.

Если $C \gg \delta_p$, то можно не учитывать отражение от дна металлического кожуха электромагнитной волны. Тогда

$$|\Gamma_1| = \left| \frac{Z_{\text{oud}} - Z_0}{Z_{\text{oud}} + Z_0} \right|, \quad (5)$$

где $Z_{\text{oud}} = 377 / \sqrt{\epsilon'(1 - \text{tg } \delta)}$, Ом – волновое сопротивление исследуемого диэлектрика; ϵ' , $\text{tg } \delta$ – диэлектрические параметры исследуемого диэлектрика.

Соотношение (5) связывает искомые параметры ϵ' , $\text{tg } \delta$ с измеряемой величиной $|\Gamma|$. Второе соотношение получим для случая, когда между излучающим рупором и исследуемым диэлектриком расположен плоский слой другого диэлектрика толщиной l_δ с параметрами ϵ' , $\text{tg } \delta = 0$ (рис. 4 а).

В этом случае измеренная величина модуля коэффициента отражения от многослойной системы диэлектриков равна

$$|\Gamma_2| = \left| \frac{Z_{\text{ex}} - Z_0}{Z_{\text{ex}} + Z_0} \right|, \quad (6)$$

где Z_{ex} – входное сопротивление системы последовательно проходных СВЧ электромагнитной волной слоев диэлектриков.

Применяя теорию цепей [5], рассчитать Z_{ex} в (6) можно по соотношению

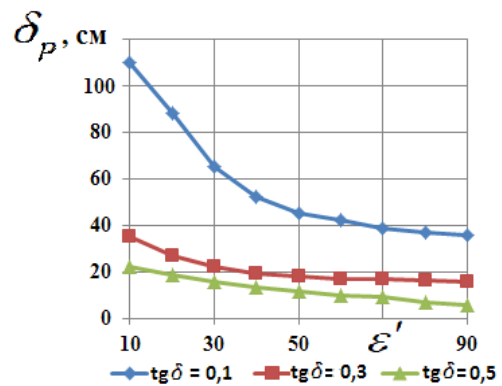
$$Z_{\text{ex}} = Z_{\text{od}} \frac{Z_{\text{ex}} + j Z_{\text{od}} \text{tg } \beta_\delta l_\delta}{Z_{\text{od}} + j Z_{\text{ex}} \text{tg } \beta_\delta l_\delta}, \quad (7)$$

где l_δ – толщина слоя 3 (рис. 4 а);

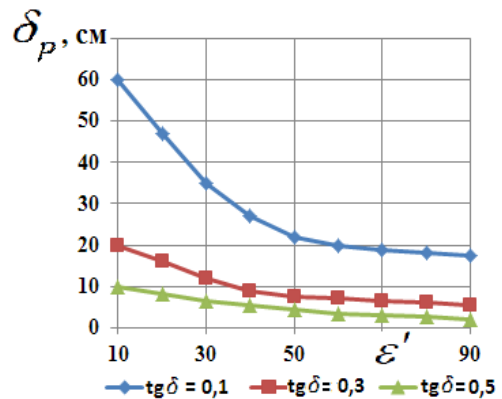
$\beta_\delta = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon'}}{\lambda}$ – постоянная распространения

в слое 3; $Z_{\text{od}} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_\delta}}$ – волновое сопротивление слоя 3; Z_{ex} – входное сопротивление двух других диэлектриков (2 и 1), то есть

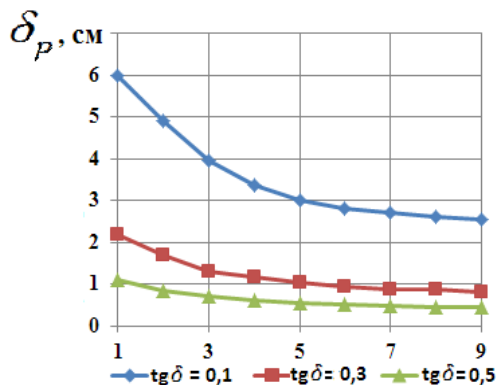
$$Z_{\text{ex}} = Z_0 \frac{Z_{\text{oud}} + j Z_0 \text{tg } \beta_\delta l_\delta}{Z_0 + j Z_{\text{oud}} \text{tg } \beta_\delta l_\delta}. \quad (8)$$



а



б



в

Рис. 3. Зависимости глубины проникновения электромагнитной волны по мощности от диэлектрических свойств: а – 433 МГц; б – 915 МГц; в – 2450 МГц

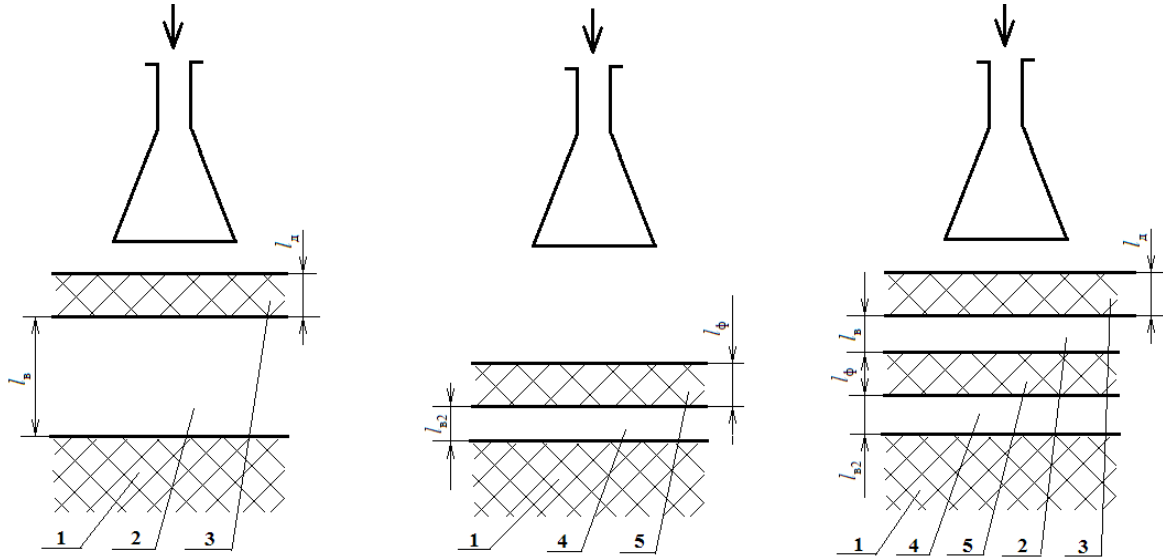


Рис. 4. Структура слоев диэлектрика: а – с дополнительным слоем диэлектрика без футеровки; б – с футеровкой между рупором и исследуемым диэлектриком; в – с дополнительным слоем диэлектрика с футеровкой между рупором и исследуемым диэлектриком (1 – исследуемый диэлектрик; 2 – слой воздуха; 3 – дополнительный диэлектрик; 4 – второй слой воздуха; 5 – слой футеровки)

Здесь l_ϵ – толщина слоя воздуха 2; $\beta_\epsilon = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная электромагнитной волны в слое 2; $Z_{o\epsilon d}$ – входное сопротивление исследуемого диэлектрика 3 (при $C \gg \delta_p$).

Так что соотношения (5) и (6) с учетом (7) и (8) составляют систему уравнений, позволяющую найти искомые ϵ' и $\text{tg } \delta$.

Если температура исследуемого диэлектрика велика настолько, что между этим диэлектриком и рупором требуется футеровка (рис. 4 б), то, используя теорию цепей, исходные соотношения для расчета ϵ' и $\text{tg } \delta$, измерив $|\Gamma_1|$ и $|\Gamma_2|$, можно записать в следующем виде:

$$|\Gamma_1| = \left| \frac{Z_{\epsilon 1} - Z_0}{Z_{\epsilon 1} + Z_0} \right|,$$

$$Z_{\epsilon 1} = Z_{o\phi} \frac{Z_{\epsilon 2} + j Z_{o\phi} \text{th } \gamma_\phi l_\phi}{Z_{o\phi} + j Z_{\epsilon 2} \text{tg } \gamma_\phi l_\phi},$$

$$Z_{\epsilon 2} = Z_0 \frac{Z_{o\epsilon d} + j Z_0 \text{tg } \beta_\epsilon l_{\epsilon 2}}{Z_0 + j Z_{o\epsilon d} \text{tg } \beta_\epsilon l_{\epsilon 2}}, \quad (9)$$

$$|\Gamma_2| = \left| \frac{Z_{\epsilon 2} - Z_0}{Z_{\epsilon 2} + Z_0} \right|,$$

$$Z_{\epsilon 2} = Z_{o\epsilon d} \frac{Z_{\epsilon \phi} + j Z_{o\epsilon d} \text{th } \beta_\epsilon l_\phi}{Z_{o\epsilon d} + j Z_{\epsilon \phi} \text{tg } \beta_\epsilon l_\phi},$$

$$Z_{\epsilon \phi} = Z_0 \frac{Z_{\epsilon 1} + j Z_0 \text{tg } \beta_\epsilon l_\epsilon}{Z_0 + j Z_{\epsilon 1} \text{tg } \beta_\epsilon l_\epsilon}.$$

Здесь $Z_{o\phi} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_\phi (1 - j \text{tg } \delta_\phi)}} -$ волновое

сопротивление слоя футеровки 5; ϵ'_ϕ , $\text{tg } \delta_\phi$ – диэлектрические параметры материала футеровки; l_ϕ – толщина футеровки; $l_{\epsilon 2}$ – толщина слоя воздуха между футеровкой и исследуемым диэлектриком; $\gamma_\phi = \alpha_\phi + j\beta_\phi$ – постоянная распространения в слое футеровки, причем

$$\beta_\phi = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{2\epsilon'_\phi (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_\phi} + 1)}, \quad (10)$$

Наконец, если $C < \delta_p$, то в расчетах $|\Gamma|$ надо учитывать отражения от дна кожуха, в котором находится исследуемый диэлектрик. В этом случае верны соотношения (5)-(9), если $Z_{o\epsilon d}$ заменить на $Z_{o\epsilon d} \text{th } \gamma l$, где l – толщина слоя исследуемого диэлектрика; $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения в исследуемом диэлектрике, расчет которых следует производить по соотношениям (10) при ϵ' и $\text{tg } \delta$.

Расчет диэлектрических свойств по результатам измерений

Исходные данные:

$|\Gamma_1| = 0.313$ – коэффициент отражения (измерение №1 без диэлектрической вставки)

$|\Gamma_2| = 0.12$ – коэффициент отражения (измерение №2 с диэлектрической вставкой)

Начальное приближение

$\epsilon_x := 3$ $\text{tg}\delta_x := 0.14$

Запись системы уравнений

Given

$$|\Gamma_1| = \left| \frac{\frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} - Z_0}{\frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} + Z_0} \right|$$

$$|\Gamma_2| = \left| \frac{\frac{Z_0 \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} + i \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)}{Z_0 + i \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)} - Z_0}{Z_0 + i \cdot \left[\frac{Z_0 \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} + i \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)}{Z_0 + i \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)} \right] \cdot \tan(\beta_D \cdot l_D)} \right|$$

$$|\Gamma_2| = \left| \frac{\frac{Z_0 \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} + i \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)}{Z_0 + i \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)} + Z_0}{Z_0 + i \cdot \left[\frac{Z_0 \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} + i \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)}{Z_0 + i \cdot \frac{377}{\sqrt{\epsilon_x(1-i\text{tg}\delta_x)}} \cdot \tan(\beta_B \cdot l_B)} \right] \cdot \tan(\beta_D \cdot l_D)} \right|$$

Решение системы алгебраических уравнений относительно электрофизических свойств ϵ_x и $\text{tg}\delta_x$ исследуемого диэлектрика

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \text{tg}\delta_x \end{pmatrix} := \text{Find}(\epsilon_x, \text{tg}\delta_x)$$

Результаты расчетов

$\epsilon_x = 3.333$ $\text{tg}\delta_x = 0.32$

Рис. 5. Фрагмент программы расчета диэлектрических свойств в системе MathCAD

На основании приведенной выше методики разработано программное обеспечение в системе MathCAD для расчета ϵ' и $\text{tg} \delta$ диэлектрических материалов на основе

измерений модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$. На рис. 5 показан фрагмент программы расчета диэлектрических свойств в системе MathCAD для случая измерения

диэлектрических параметров с дополнительным слоем диэлектрика между рупором и исследуемым диэлектриком (рис. 4 а). Приведены результаты измерений $|Γ_1|$ и $|Γ_2|$ соответственно без дополнительного диэлектрика и при его наличии, а также вычисленные значения $ε'$ и $tg δ$.

Отметим, предложенная методика измерения диэлектрических параметров $ε'$ и $tg δ$ диэлектрика при высокой температуре обеспечивает полную защиту измерительной СВЧ установки от влияния на нее высокой температуры исследуемого диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.

2. **Брандт А.А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт. М.: Физматгиз, 1963. 403 с.

3. **Тишер Ф.** Техника измерений на сверхвысоких частотах / Ф. Тишер. М.: Физматгиз, 1963. 367 с.

4. **Архангельский Ю.С.** Измерения в СВЧ электротехнологии / Ю.С. Архангель-

ский, С.Г. Калганова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 152 с.

5. **Архангельский Ю.С.** Применение теории цепей при синтезе рабочих камер СВЧ электротермических установок и математическом моделировании термообработки в СВЧ электромагнитном поле / Ю.С. Архангельский // Вопросы электро-технологии. 2015. № 3 (8). С. 9-15.

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

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

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

Svetlana G. Kalganova – Dr.Sc., Head: Department of Power Supply and Electrotechnologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 28.05.17, принята к опубликованию 20.06.17

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 378.147.88

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ДИСЦИПЛИН «ИНФОРМАТИКА» И «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» В ВОЕННОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ

О.В. Раецкая

AN INTERDISCIPLINARY INCORPORATION OF THE COURSES IN INFORMATICS AND ELECTRICAL ENGINEERING AT MILITARY SCHOOLS

O.V. Raetskaya

Рассмотрены вопросы междисциплинарной интеграции в военном образовательном учреждении.

Ключевые слова: информационные технологии в образовании, электротехника, информатика

The article considers the issues relating interdisciplinary incorporation of courses at military educational establishments.

Keywords: information technologies in education, electrical engineering, informatics

Проблема становления, развития и использования информационных технологий (ИТ) обучения в военном вузе – многоаспектная, многогранная проблема. Совершенствованию технологий обучения во все времена уделялось очень большое внимание. Введение в военных образовательных учреждениях дисциплины «Информатика» явилось важнейшим из аспектов будущей ИТ. Ученые-исследователи считают, что информатика, развиваясь под действием потребности общества, имеет общенаучный характер, представляет собой «комплексную или синтетическую дисциплину» и может быть отнесена к метапредмету (А.П. Ершов, В.Ф. Шолохович).

Однако, несмотря на достаточно большой спектр разноплановых исследований, связанных с определением места и роли ИТ в военном образовательном учреждении, практика внедрения ИТ в профессиональном образовании свидетельствует о наличии

явных противоречий между существующими научными предпосылками информатизации образования и недостаточной разработанностью теоретических аспектов внедрения ИТ в процессе обучения курсантов в военном образовательном учреждении.

Внедрение ИТ в процесс обучения курсантов в военном вузе будет эффективным при комплексном соблюдении дидактических условий:

а) процесс обучения с использованием ИТ проектируется с включением программных, технических и методических элементов компьютерных учебных сред;

б) обеспечение высокого уровня информационной компетентности преподавателей для осуществления образовательного процесса с использованием ИТ;

в) осуществление процесса обучения с опорой на междисциплинарную интеграцию в информационной образовательной среде, способствующей обогащению, си-

стематизации и уплотнению знаний из различных военных, научных областей.

Стратегической целью высшего военного образования становится развитие личности курсанта, системы его ценностей: личностных, общечеловеческих, профессиональных. К числу личностных ценностей, формирующихся в процессе обучения, относятся: познавательные интересы и потребности, социальные мотивы, конструктивное творческое мышление, оценочные суждения.

Органическая целостность личности как субъекта образовательного процесса предполагает междисциплинарную интеграцию в образовательном процессе учреждения высшего военного образования.

Говоря о междисциплинарной интеграции, в первую очередь «имеем в виду междисциплинарное интегрированное содержание как основу, питающую и развивающую личность» [1]. Под междисциплинарным интегрированным содержанием понимается взаимопроникновение разнокачественных систем содержания образования. Учебный процесс, построенный на междисциплинарной интегративной основе, способствует повышению уровня мотивации курсантов за счет понимания необходимости, социальной значимости получаемых знаний, стимулирования познавательных интересов и потребностей, стремления к расширению собственного кругозора.

Междисциплинарная интеграция придает личностный смысл одним областям знаний за счет удовлетворения интересов курсантов в других областях знаний. Содержание одной предметной области может выступать ценностным фактором по отношению к другой предметной области. Интегрированное содержание на междисциплинарной основе закладывает возможности для развития творческого мышления с помощью проблемных ситуаций, которые создаются на стыке разнохарактерных знаний и способов деятельности, что присуще междисциплинарному интегрированному содержанию [2]. Стержень междисциплинарных проблем составляют ведущие идеи, общие для смежных курсов, которые могут

также создаваться на стыке противоположных знаний и способов деятельности. Практически в любом интегрированном курсе содержится множество проблемных ситуаций и междисциплинарных проблем различных уровней и различной степени сложности. Но реализация идей междисциплинарной интеграции в образовательном процессе требует изменения педагогического мышления преподавателей, методистов, руководителей учебных заведений.

Учебная дисциплина «Информатика», которая обслуживает внутренние междисциплинарные связи, позволит формализовать учебный материал использованием некоторых общих методов решения проблем. Информатика, соединяясь с другими учебными дисциплинами, обогащает их содержанием, расширяя представление курсанта об ИТ в своей будущей профессиональной деятельности.

В основу проектирования системы формирования компетентного выпускника военного вуза в информационной образовательной среде военного образования положен принцип универсальности содержания учебных дисциплин, освоение которых в ходе процесса обучения требует применения ИТ.

За счет интегрирования учебных дисциплин и информатики происходит расширение информационной образовательной среды, наполнение учебного учреждения современными техническими средствами, дающими полную информацию о появляющихся в педагогическом арсенале новых программных продуктах (software), что создается для оперативного обновления базы учебных программ. Информация в сфере образования выполняет три функции: обеспечивает педагогов сведениями о результатах научных исследований и передовом опыте; создает действенную систему обучения, способствующую овладению современными методами работы; внедряет в практику учреждений начального профессионального образования результаты исследований и передовой педагогический опыт [3].

В Военном учебно-научном центре Военно-воздушных сил «Военно-воздушная

академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (филиал в г. Сызрани) информационные средства представлены компьютерными лабораториями, объединенными локальной компьютерной сетью, что более оправданно и рационально при проведении групповых занятий по автоматизации и спецдисциплинам, чем автономное их использование, комплектом обучающих программ «по предметам профессиональной подготовки (электроматериаловедение, электротехника) программой-оболочкой для создания контрольных тестов разного уровня, прикладной мультимедийной программой, позволяющей автоматизировать выполнение графических работ по черчению, мультимедийной библиотекой с современными электронными учебниками.

Каждому курсанту обеспечивается: доступ в электронную библиотеку, где сосредоточено учебно-методическое обеспечение, выполнение лабораторного практикума в виртуальной лаборатории, тестирование по ряду учебных дисциплин.

По учебному плану для подготовки курсантов учебная дисциплина «Информатика» является общеобразовательной дисциплиной на первом курсе, на который выделено 216 часов. В итоге решаются задачи:

- устранение «компьютерной фобии», возникшей в школе по различным причинам;
- поддержка полученного курсантами в школе уровня компьютерной грамотности, который без практики быстро теряется, а со временем может быть утрачен вообще;
- выравнивание уровня компьютерной подготовки курсантов, у которых в школе отсутствовал предмет «Информатика» или преподавался на устаревшей технике;
- обучение курсантов навыкам работы на компьютере, необходимым для изучения содержания интегрированного спецкурса с использованием новых ИТ;
- развитие интереса и потребности в использовании компьютерной техники для учебной и досуговой деятельности.

Интерес определяется в психологической литературе как осознанная потребность, стремление к познанию объекта

или явления, к овладению каким-либо видом деятельности, которое носит избирательный характер, выступая одним из наиболее существенных стимулов приобретения знаний и расширения кругозора. В итоге содержанию данной учебной дисциплины придавался не узкоспециальный, а общеобразовательный характер.

Содержание дисциплины «Информатика» конструируется с учетом внутри- и междисциплинарных связей, чтобы органично интегрироваться с содержанием специальных дисциплин, дополняя и наполняя их новыми технологиями и способами образовательной деятельности. Поэтому в программе курса значительное место уделяется навыкам практического использования ИТ, которые позволяют сформировать основы информационной культуры будущих военных специалистов и готовность к дальнейшему их применению в профессиональной деятельности.

Таким образом, интегрированная учебная дисциплина «Электротехника» и «Информатика» станет проводником информационной культуры, а интегрированное занятие требует применения новых технологий в комфортных условиях, выявления возможностей применения техники в спецдисциплине.

Средства вычислительной техники, «вмешиваясь» в процесс выполнения преподавателем совокупности функций (предъявление учебной информации, управление процессом обучения, оперативный и объективный контроль усвоения содержания образования), создают информационное пространство, сближающее реалии профессиональной деятельности и образовательного учреждения.

Считаем возможным сконструировать содержание интегрированной учебной дисциплины на основе «Информатики» и «Электротехники» с учетом протекания информационных процессов в военной профессиональной сфере, анализируя имеющийся фонд прикладных и педагогических программных средств, рассматривая требования к информационной подготовке военных специалистов в связи с усложне-

нием техники и технологий, учитывая необходимость выработки обобщенных умений и навыков для возможной диверсификации специальности.

В отличие от традиционной методики (хронологичность, линейность) отбор содержания по принципу «экземпляльность» имеет свои особенности:

- учебный материал излагается не хронологически, а тематически;

- тематический выбор обусловлен степенью важности излагаемой темы, ее фундаментальностью;

- обучение ведется эвристически – курсанты делают свои небольшие «открытия», не ставятся в ситуацию принятия абсолютной веры в истину;

- обучение носит не только теоретический характер в виде получения законченного научного знания, но и имеет своей целью практическую подготовку, развивающую готовность к профессиональной деятельности в условиях информационного общества.

С нашей точки зрения, принцип «экземпляльности» находит свое новое воплощение при внедрении в учебный процесс ИТ. Недостаточность разработанных для профессионального образования педагогических программных средств не позволяет глубоко охватить содержание конкретной учебной дисциплины (все разделы и темы). Однако разработанные и существующие в виде педагогических программных средств наиболее важные темы изначально как бы предполагают следование принципу «экземпляльности», а именно его второй особенности – фундаментальности.

Восприятие и усвоение конкретного содержания обучения курсантами могут быть различными в зависимости от того, какую технологию обучения использует преподаватель. Содержание учебной спецдисциплины было подвергнуто анализу в целях выявления тем учебной программы, изучение которых целесообразно проводить с использованием ИТ. К ним возможно отнести темы, в усвоении содержания которых большую роль играют наглядность, реальность и возможность моделирования про-

цессов профессиональной военной деятельности.

В рамках проблемы отбора содержания обучения педагоги-исследователи (Е.Л. Белкин, В.П. Беспалько, А.М. Сохор и др.) обосновывают необходимость и целесообразность разработки графической модели логической структуры содержания учебного материала в целях повышения эффективности его изложения. Научный подход к совершенствованию содержания, изложенный в этих работах, позволяет выявить взаимосвязь учебных элементов внутри смежных тем интегрированной дисциплины «Электротехника» + «Информатика», содержание которых представлено как на традиционных (учебники, лекции), так и на цифровых носителях информации, с соблюдением последовательности изложения учебного материала.

В результате освоения интегрированного учебного курса «Электротехника» + «Информатика» курсанты могли бы осознать необходимость освоения ИТ в своей будущей профессиональной деятельности и возможность реального их применения в другой научной области, а оба курса становились для них единой важной учебной дисциплиной. Реализовались бы главные задачи обучения: развитие целостного видения мира у студентов, ориентация на овладение методологическими знаниями и способами продуктивной профессиональной деятельности, развитие умений решать проблемные задачи.

По мере изучения дисциплины курсанты разработают схемы, проведут расчеты на практических занятиях по информатике с помощью текстовых и графических редакторов. В итоге объем и качество выполнения работы зависят от уровня знаний курсантов как по электротехнике, так и по информатике.

Итак, междисциплинарные связи детерминируют разработку инновационных образовательных технологий, провоцирующих объединение знаний из различных областей, развивающих способность курсантов к аналитической и проективной деятельности в военной профессиональной сфере.

Междисциплинарные связи разрешают существующее в предметной системе обучения противоречие между разрозненным усвоением знаний и необходимостью их синтеза, комплексного применения в практике, трудовой деятельности и жизни чело-

века. С позиций современных требований к содержанию образования военный специалист должен обладать умениями и профессиональной мобильностью, оперативно реагировать на постоянно возникающие изменения в профессиональной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ершов А.П.** Концепция информатизации образования / А.П. Ершов // Информатика и образование. 2000. № 6. С. 3-31.

2. **Леднев В.С.** Системный подход в педагогике / В.С. Леднев // Метафизика. 2014. № 4 (14). С. 39-51.

3. **Лейзерович Я.Д.** Интегративная методика обучения курсантов военного вуза информатике и информационным техноло-

гиям на основе офисного программирования: дис. ... канд. пед. наук / Я.Д. Лейзерович. Пермь, 2003. 183 с.

4. **Раецкая О.В.** Развитие конкурентоспособности бакалавров средствами информационных технологий в техническом университете / О.В. Раецкая, В.О. Юдина // Фундаментальные исследования. 2014. № 6-4. С. 828-832

Раецкая Ольга Вилоровна – кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры «Математика и естественнонаучные дисциплины» филиала ВУЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» в г. Сызрани

Olga V. Raetskaya – PhD, Senior Lecturer, Department of Mathematics and Science, (Syzran branch) Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy

Статья поступила в редакцию 11.06.17, принята к опубликованию 20.06.17

ЛЕТОПИСЬ

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНОЙ РАБОТЫ В СГТУ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.



Остроумов Игорь Геннадьевич, доктор химических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, проректор по научной работе Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., автор более 140 научных работ по органической, аналитической, общей химии, в том числе 5 патентов и авторских свидетельств, 37 учебников и учебных пособий.

«ВЭ» Игорь Геннадьевич, в начале заканчивающегося учебного года Вы начали работать в СГТУ проректором по научной работе. Как Вы оцениваете состояние научной работы в вузе? По содержанию, объему, достижениям.

О.И.Г. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. представляет собой мощный научно-инновационный центр, имеющий устойчивую структуру научных подразделений, исторически сложившиеся и вновь созданные школы и направления, серьезную материально-техническую базу. И это не преувеличение, а констатация факта. В качестве обоснования этого тезиса логично сравнить наукометрические показатели СГТУ с аналогичными параметрами других вузов Саратова, Приволжского региона или России, однако это было бы не совсем корректно по отношению к нашим коллегам. Поэтому будем основываться на сравнении «себя с собой» в динамике.

Исследования в СГТУ имени Гагарина Ю.А. ведутся по 23 основным научным направлениям высококвалифицированным коллективом, в составе которого 200 док-

торов и более полутысячи кандидатов наук. Общий объем финансируемых НИР и ОКР за прошлый год составил 115 млн руб. В планах 2017 года увеличить этот показатель до 130 млн руб. Каждый год нарастают объемы работ, выполняемых по грантам РФФИ и РНФ. В 2016 г. в СГТУ выполнялись 38 проектов, поддержанных научными фондами, на сумму 55,5 млн руб.

Объем финансирования проектной части госзадания на НИР в 2017 году увеличился на 28%. Вместе с тем, объем привлеченных средств на 100 НИР снизился в связи с завершением финансируемой из госбюджета программы стратегического развития, которая в течение трех лет приносила вузу по 200 млн руб.

В нашем вузе традиционно высоки показатели изобретательской активности. Общее количество действующих патентов достигло 230, ежегодно авторы направляют от 150 до 180 заявок на регистрацию РИД и получают до 100 охранных документов. Однако число лицензионных соглашений все-таки мало.

Показатели публикационной активности в индексируемых базах данных Scopus

и WoS достойны, а вот в РИНЦ активность ученых вуза слабая. В первую очередь, это связано с отсутствием должного внимания самих авторов. Так что есть над чем работать.

В СГТУ проводятся ряд исследований на высоком международном уровне. В качестве примера можно привести работы научного коллектива под руководством проф. Храмова А.Е. в области нейротехнологии, группы ученых, возглавляемых проф. Крысько В.А., касающиеся нелинейной динамики сложных систем. К сожалению, такие прорывные направления единичны.

«ВЭ» Какие задачи Вы ставите перед преподавателями вуза?

О.И.Г. Показатель результативности научных исследований на сегодняшний день является одним из важнейших для оценки деятельности вуза. Так, в мониторинге эффективности организаций высшего образования заложено два десятка количественных параметров, по которым учредитель судит о научном потенциале подведомственного учреждения. Это количество статей в наукометрических базах данных, число цитирований, объемы НИР и НИОКР в расчете на одного НПП, доля доходов от науки в консолидированном бюджете организации, количество издаваемых научных журналов и т.д.

Кроме того, без весомого научного багажа, практического опыта инновационной деятельности можно и не мечтать о вхождении в солидные федеральные программы, получении престижных грантов, победах в конкурсах на получение финансовой поддержки. Отсюда следует очень простой вывод: те подразделения университета (кафедры, институты, обособленные научно-производственные структуры), которые не вносят свой вклад в копилку научно-инновационной деятельности вуза, подлежат упразднению или реорганизации.

Задачи перед преподавателями, исходя из сказанного, выстраиваются сами собой. Кстати, они зафиксированы и в должностной инструкции ППС: преподаватель обязан проводить научные исследования по профилю кафедры. Я бы только уточнил задачу: исследования должны быть резуль-

тативными, воплощаться в научные публикации, результаты интеллектуальной деятельности и объемы привлеченных в университет средств.

«ВЭ» Долгие годы проректором по научной работе в СПИ-СГТУ работал В.Р. Атоян. Он ратовал за создание межкафедральных, межфакультетских научных школ. Одну такую школу, кстати, в области СВЧ электротехнологии, которая получила официальный статус ведущей научной школы РФ в области инженерных и технических наук, ему создать удалось. Как Вы считаете, каждая кафедра должна вести свои научные исследования и сколько таких направлений научной работы на кафедре может быть, или должны быть научные исследования, в которых принимают участие несколько кафедр? А может быть, тема, в которой участвует весь институт (факультет) или даже весь вуз?

О.И.Г. Наверное, оптимально разумное сочетание интегрированных и узконаправленных научных тематик с доминированием первых. Вы уже привели пример успешно действующей школы в области СВЧ электротехнологии. Активно разрабатывается научная тематика в сфере нейротехнологий с участием, помимо ученых СГТУ имени Гагарина Ю.А., специалистов из академических институтов г. Саратова (ИРЭ, ИПТМиУ), СГМУ имени В.И. Разумовского и СНИГУ имени Н.Г. Чернышевского.

Прорабатывается вопрос привлечения специалистов в области теплоэнергетики, электротехнических устройств и автомобильного транспорта к продвижению весьма перспективного научного направления, связанного с разработкой и применением новых наноматериалов и каталитических систем на основе полититанатов калия. Общеизвестно, что именно на стыке наук, в сотрудничестве ученых различных специальностей рождаются серьезные открытия.

Технический университет также выполняет исследования, в которых задействованы буквально все институты, входящие в структуру вуза. Например, в рамках программы развития опорного университета, коим с 2017 года является СГТУ имени Га-

гарина Ю.А., по заказу Правительства области реализуется стратегический проект «Развитие Саратовской агломерации». Проект предусматривает научно-методическое обоснование устойчивого развития Саратовского Поволжья, моделирование Саратовской агломерации, оценку экологических, технических и социальных рисков. Каждая из структур вуза нашла свое место в решении комплекса вопросов в области градостроительства и архитектуры, транспортной и энергетической систем, экологии, социологии, культурологии, туризма.

Вместе с тем в университете есть успешные примеры инициативных, практически индивидуальных научных работ, получающих грантовую поддержку. Они тоже имеют право на существование.

«ВЭ» В СГТУ производятся структурные изменения. Объединяются ряд кафедр, факультетов в институты. Как это скажется на научной работе вуза, какие задачи теперь стоят перед руководителями структурных подразделений?

О.И.Г. Отчасти структурные изменения – это продолжение темы об эффективности работы того или иного подразделения, в том числе в научном плане. Неэффективные структуры теряют место под солнцем, успешные – укрепляются. Ведь изменения проводятся не ради изменений. Жизнь показывает, что большинство реформ оказались позитивными, привнесли новый импульс и образовательной, и научной составляющей деятельности. У руководителей новых структур задача вполне тривиальная: верно оценить и с максимальной отдачей использовать кадровый и материально-технический потенциал для достижения поставленных целей.

«ВЭ» Новый учебный год вуз начнет с существенно меньшим количеством преподавателей, но с прежним количеством учебных направлений и профилей, то есть с прежним объемом учебной работы. Выполнить эту работу можно будет лишь за счет перехода части учебной нагрузки преподавателей на вторую половину рабочего дня, которая до этого в большей части отводилась на научную работу.

Прокомментируйте, пожалуйста, эту ситуацию. Какие задачи в связи с этим стоят перед преподавателями, руководителями кафедр и институтов?

О.И.Г. Штатную численность ППС, соотношение преподаватель-студент определяет учредитель, и в рамках нашей беседы мы не будем давать оценку этих решений. В том случае, если выстраивать учебную и исследовательскую работу по старинке, можно попасть в сложную ситуацию и с учебной нагрузкой, и со второй половиной рабочего дня. Но ведь жизнь не стоит на месте. Появляются новые образовательные технологии, уникальное научное оборудование, новые средства коммуникации, позволяющие найти резерв времени для всех видов деятельности. На то и существуют руководители всех уровней от заведующего кафедрой до ректора и проректора, чтобы с учетом всех требований учредителя выстраивать деятельность так, чтобы не только не потерять качество учебной работы и эффективность НИР и НИОКТР, но и продемонстрировать положительную динамику.

«ВЭ» Для успешной научной работы нужна финансовая поддержка. Гранты, программы, хозяйственные договоры, средства госбюджета, выделяемые на научную работу. Каков процент кафедр, имеющих такую поддержку? Как кафедрам добиваться ее получения?

О.И.Г. В 2017 г. в рамках базовой части государственного задания на выполнение НИР получили поддержку 8 проектов, в проектной части победили 4 темы, финансовое обеспечение предоставлено двум ведущим исследователям и пяти научно-техническим сотрудникам на постоянной основе. Учеными университета выиграно 29 грантов РФФИ, 5 грантов РНФ, получено 6 грантов Президента РФ, 12 грантов прочих грантодателей. С учетом хоздоговорной деятельности больше половины из 47 кафедр сумели в текущем году привлечь средства для обеспечения исследовательских работ. Как добиваться получения финансирования? Работать!

«ВЭ» В последнее время сократилось число бюджетных мест для поступающих в аспирантуру. Чем это вызвано?

О.И.Г. Надеюсь, спад прекратился. На 2018 год вузу выделено на 12% больше бюджетных мест в аспирантуру, чем в текущем году. Однако вопрос не только в количестве бюджетных мест, но и в конкурсе на них. Чем выше конкурс, тем качественнее отбор, тем выше уровень диссертационного исследования, тем больше доля аспирантов, успешно защищающих кандидатскую диссертацию к окончанию срока обучения.

«ВЭ» Чем наш журнал может помочь научной работе, проводимой в СГТУ имени Гагарина Ю.А.?

О.И.Г. Издание журнала чрезвычайно важно и для поддержки профильных научных направлений в вузе, и как средство коммуникации специалистов в области электротехнологии, и для статуса СГТУ имени Гагарина Ю.А. как одного из ведущих научных центров в этой области. Поэтому задача минимум – включение журнала в перечень ВАК, задача максимум – вхождение издания в базу данных научного цитирования Scopus. Я от души желаю коллективу журнала решения обеих этих задач!

«ВЭ» Спасибо большое, Игорь Геннадьевич, за ответы.

К СТОЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ВЛАДИСЛАВА ВАЛЕНТИНОВИЧА ВОЛОГДИНА

В.Б. Демидович

Владислав Валентинович Вологдин родился 24 апреля 1917 года. Его отец – Валентин Петрович Вологдин, талантливейший ученый, в будущем доктор технических наук, профессор, член-корреспондент АН СССР, дважды лауреат Государственной премии, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, разработал и создал новое направление науки и техники – высокочастотная электротехника и электротехнология. В 1917 г. молодой специалист В.П. Вологдин работал техническим директором завода «Дюфлон и Константинович» (Дека). Он строил на заводе машинные генераторы высокой частоты. После Октябрьской революции заводы, в том числе и Дека, остановились, и В.П. Вологдин, чтобы выжить, со всей семьей уехал на малую родину – в Ильинское Пермской области. Владиславу Валентиновичу было в то время полгода.

В.П. Вологдин занялся сельскохозяйственными работами – вспашкой, посевом, уборкой урожая и молотью, сепарированием молока, а также механизацией этих работ. Работы обеспечили семью хлебом в это трудное время.

В сентябре 1918 года В.П. Вологдин получил приглашение и уехал в Нижний Нов-

город для работы в Нижегородской радиолaborатории. Он стал создавать высокочастотные источники питания для радиостанций. Маленький Владислав остался в Ильинском и только в августе 1920 г. семья переехала в Нижний Новгород. В сентябре 1923 года В.П. Вологдин переезжает с семьей в Петроград и начинает работать в Ленинградском электротехническом институте. В.П. Вологдин подготовил курс лекций по высокочастотной электротехнике, а затем организовал кафедру высокочастотной электротермии.

В 1936 году Владислав Валентинович окончил школу и поступил в Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ). В 1939 г. он в числе 7 студентов выбрал новую кафедру по тематике проф. В.П. Вологодина – применение токов высокой частоты в промышленности.

В июне 1941 года этой группе в связи с нападением на нашу страну фашистской Германии выдали диплом без защиты дипломной работы.

Владислав Валентинович был направлен на завод (ныне АО «Климов»), который производил двигатели. Молодой специалист, используя полученные в ЛЭТИ зна-

ния, начал разрабатывать технологию и оборудование пайки и прецизионного литья с использованием индукционного нагрева. Требования к качеству изделий, полученных методом пайки и литья, были чрезвычайно высокими, поэтому работа была весьма ответственной.

В июле 1941 г. завод вместе с оборудованием и специалистами был эвакуирован в Уфу и там всю войну изготавливал и поставлял двигатели для авиационной промышленности. Кроме пайки и литья, Владислав Валентинович занимался на заводе созданием технологии и оборудования для поверхностной закалки инструмента.

После окончания Великой Отечественной войны завод был возвращён в Ленинград. Владислав Валентинович продолжает работать на заводе. Он занимался высокочастотной пайкой, прецизионным литьём, индукционной наплавкой клапанов и биметаллических втулок. Это были пионерские работы и вошли в достижения высокочастотной школы нашей страны.

В 1947 г. В.П. Вологдин после исключительно плодотворной работы во время Великой Отечественной войны на заводах, производивших танки Т-34, ИС и КВ, добился создания Научно-исследовательского института токов высокой частоты (ныне АО «ВНИИТВЧ»). Владислав Валентинович решил перейти во ВНИИТВЧ и сделал это в 1955 г. К этому моменту он стал уже крупным специалистом в области пайки и наплавки. Его первая брошюра «Высокочастотная пайка» вышла в 1954 г. в первом издании библиотечки «Высокочастотник-термист» и с дополнениями неоднократно издавалась до 1989 г.

Владислав Валентинович был назначен заместителем начальника крупнейшего отдела ВНИИТВЧ – отдела индукционного нагрева, а затем начальником лаборатории пайки.

В 1964 г., когда М.А. Спицын незадолго до своей смерти ушёл с поста директора ВНИИТВЧ, на этот пост был назначен Владислав Валентинович Вологдин.

В 1965 году институт стал Всесоюзным научно-исследовательским институтом то-

ков высокой частоты имени В.П. Вологдина, и на него возлагаются функции головного института страны по применению токов высокой частоты в промышленности.

В 1966 г. в состав ВНИИТВЧ вошло Центральное конструкторское бюро ультразвуковых и высокочастотных установок (ЦКБ УВУ). Это было очень важное решение: институт с этого момента стал разрабатывать и изготавливать не только технологические устройства, но комплексные установки, включающие и источники питания высокой частоты, и технологические устройства. Кроме того, ВНИИТВЧ стал развивать не только традиционные направления (индукционная поверхностная закалка; индукционный нагрев перед пластической деформацией, высокочастотная сварка металлов, производство монокристаллического кремния и германия, выращивание оптических кристаллов, высокотемпературных оксидных и других материалов, получение и применение высокочастотной плазмы, нагрев диэлектрических материалов) но и новое – силовой и приборный ультразвук.

И Владислав Валентинович как директор института поддерживал все направления и помогал преодолевать трудности и организационные, и научно-технические, обеспечил передовые позиции института в науке по всем направлениям работ. Не оставил он и научные исследования, которыми занимался всю жизнь в области пайки и наплавки. Осенью 1968 года он обобщил одну из своих работ и защитил диссертационную работу на соискание учёной степени кандидата технических наук на тему «Разработка и исследования нового способа упрочнения гильз цилиндров наплавкой при индукционном нагреве».

Владислав Валентинович уделял большое внимание развитию института. На площадке № 1 (Шуваловский парк) при непосредственном его участии был построен корпус № 3, в котором создано новое опытное производство и лаборатория для испытания технологических устройств по индукционной поверхностной закалке и индукционному нагреву перед пластической деформацией. Лаборатория индукционной поверхностной

закалки и индукционного нагрева обеспечила ускоренное развитие этих направлений. На площадке № 2 (Московский пр., 72) было сооружено уникальное сооружение для испытания ультразвуковых приборов, работающих в условиях высокого давления и предназначенных для батискафов и других глубоководных аппаратов.

Владислав Валентинович многое сделал по созданию музея института, в котором были развернуты экспозиции, рассказывающие об истории создания института, научно-технических достижениях, а также об истории пос. Парголово, Шуваловского парка и дворцов Шуваловых.

В последние годы на посту директора Владислав Валентинович стал уделять внимание перспективам развития института. Был предложен план построения нового квартала зданий для института с возможностью перехода из здания в Шуваловском парке на Московский проспект, 72 и площадку по ул. Л. Толстого, 7. Он обеспечил выделение земли (между станциями Озерки

и Гражданский пр.), разработку проекта здания, заручился выделением средств на строительство Министерства электротехнической промышленности, а также Министерства чёрной и цветной металлургии.

В 1980 году Владислав Валентинович ушёл с поста директора, а в 1981 г. в возрасте 64 лет его не стало.

Владислав Валентинович много сделал для ВНИИТВЧ и для страны. Он является автором многих научных трудов и изобретений. Неоднократно избирался депутатом городского Совета народных депутатов, был заместителем главного редактора журнала «Электротермия», членом Советского национального комитета по электротермии, председателем секции центрального управления НТО «Энергетики и Электротехники», членом диссертационного совета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). Государство высоко оценило труд В.В. Володина, он награжден орденами Трудового Красного Знамени, «Знак Почета» и пятью медалями.

ДВАДЦАТИПЯТИЛЕТНИЕ ПОДГОТОВКИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГОВ В Г. САРАТОВЕ

Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый

К окончанию XX века электротехнологические процессы и установки заняли достойное место среди технологических процессов и установок, применяемых на предприятиях г. Саратова. Этот успех был достигнут в основном благодаря работе специалистов в смежных с электротехнологией областях, так как электротехнологов в саратовских вузах в те годы не готовили.

Но в Саратовском политехническом институте научные исследования в области СВЧ электротехнологии велись с 1968 г. В 1982 г. заведующий кафедрой АСУ факультета электронной техники и приборостроения СПИ защитил докторскую диссертацию по специальности «Электротермические процессы и установки», и ректор профессор Андриященко А.И. перевел его на

энергетический факультет заведующим кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП), а на кафедре была открыта специализация «Электротехнологические процессы и установки». Приветствуя открытие такой специализации, руководители ведущих предприятий г. Саратова обратились к ректору СПИ с просьбой поддержать предложение заведующего кафедрой ЭПП открыть в СПИ электротехнологическую специальность и начать в вузе подготовку инженеров-электротехнологов.

В 1991 г. первый избранный коллективом вуза ректор СПИ профессор Петров В.В. дал согласие на открытие электротехнологической специальности. На кафедре ЭПП была подготовлена необходимая нормативная и учебно-методическая доку-

ментация, Министерство разрешило СПИ подготовку инженеров по специальности «Автоматизированные электротехнологические установки и системы», и приказом ректора профессора Петрова В.В 15 мая 1992 года в СПИ была открыта выпускающая кафедра «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» (АЭУ). В том же году был проведен первый набор студентов на первый курс по новой специальности, а первый выпуск инженеров-электротехнологов состоялся в 1997 г.

Руководство СГТУ (бывший СПИ) выделило средства для оснащения учебных лабораторий кафедры. Так, на кафедре АЭУ была разработана и введена в учебный процесс первая в стране учебная лаборатория по курсу «СВЧ электротехнологические установки и системы» («СВЧ ЭТУ»). Огромную помощь в создании на кафедре учебных лабораторий оказал Завод электротермического оборудования (ЗЭТО, ныне «Сарэлектротерм-93»). Завод стал базой для проведения учебных практик студентов кафедры.

За прошедшие годы кафедра подготовила более 300 инженеров, специалистов, бакалавров и магистров в области электротехнологии по очной и заочной формам обучения.

Первыми преподавателями кафедры АЭУ стали преподаватели кафедры ЭПП Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В., Кожевников В.Ю., Колесников Е.В., из ОКБ ЗЭТО на кафедру перешел Ефимов А.А., все эти годы ведет занятия заведующий лабораторией Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Яфаров Р.К., стали доцентами кафедры АЭУ выпускники кафедры Огурцов К.Н., Лаврентьев В.А., Гришина Е.М., а также окончившая кафедру ЭПП Дунаева Т.Ю.

Всего за прошедшие годы на кафедре АЭУ были защищены 3 докторские и 11 кандидатских диссертаций. Среди них докторские диссертации:

– «Создание системы технико-экономических расчетов и средств для обеспечения максимальной эффективности электротехнологических процессов и установок» (Колесников Е.В., 2006 г.);

– «Автогенераторы на микрополосковых и объемных резонаторах с поликристаллическим ферритовым заполнением и магнитно-режективной перестройкой» (Антонов И.Н., 2006 г.);

– «Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле» (Калганова С.Г., 2009 г.).

Кандидатские диссертации:

– «Влияние СВЧ электромагнитных колебаний на физико-химические свойства полимерного сепарационного материала из полисульфоновой смолы и применение СВЧ электротехнологической установки для обработки сепараторов химических источников тока» (Гильманова В.А., 2000 г.);

– «Разработка низкоэнергетического СВЧ вакуумно-плазменного травления структур микроэлектроники» (Терентьев С.А., 2002 г.);

– «Разработка методов расчета электротермических установок, математического моделирования процессов термообработки диэлектриков с большими объемами и поверхностями» (Огурцов К.Н., 2004 г.);

– «Низкотемпературный синтез и автоэмиссионные свойства композитных углеродных пленок» (Суздальцев С.Ю., 2005 г.);

– «Оптимизация ущерба и резервирование с целью повышения эффективности установок СВЧ диэлектрического нагрева» (Доценко АВ., 2008 г.);

– «Влияние модифицирующего нетеплового воздействия СВЧ электромагнитных колебаний на физико-механические свойства полимерного волокнистого материала» (Слепцова С.К., 2008 г.);

– «Рабочие камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок для модификации диэлектриков» (Гришина Е.М., 2009 г.);

– «Влияние СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства эпоксидного компаунда» (Лаврентьев В.А., 2009 г.);

– «Обеспечение конкурентоспособности СВЧ электротермических установок и мероприятия по ее повышению на стадиях проектирования и эксплуатации» (Дунаева Т.Ю., 2009 г.);

– «Электротехнологическая установка конденсационного типа для сушки лесосеменного сырья с применением термоэлектрического эффекта» (Алексеев В.С., 2013 г.);

– «Совершенствование технологии создания устройств микро- и нанoeлектроники с использованием неравновесной СВЧ плазмы низкого давления» (Шаныгин В.Я., 2015 г.).

Главным научным направлением кафедры АЭУ была СВЧ электротехнология. На кафедре была разработана теория камер лучевого типа и методы математического моделирования в таких камерах технологических процессов, предложены процедура технико-экономической оптимизации структуры и параметров СВЧ электротехнологического оборудования, работающего в разных режимах, способ повышения конкурентной способности СВЧ электротермического оборудования и технико-экономическая оптимизация ущерба и разного рода резервирования в СВЧ электротермии. Сейчас ведутся работы в области математического моделирования технологических процессов в СВЧ электромагнитном поле, возможности применения в СВЧ электротермических установках широкополосных, перестраиваемых по частоте в процессе термообработки электровакуумных приборов, разработка методов расчета транспортных систем методических СВЧ электротехнологических установок и их электроприводов.

За прошедшие годы преподаватели кафедры издали следующие книги:

– «СВЧ электротермия» (Архангельский Ю.С., 1998 г.);

– «СВЧ электротермические установки лучевого типа» (Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В., 2000 г.);

– «Эффективность электротехнологических установок» (Толстов В.А., Архангельский Ю.С., 2002 г.);

– «Элементная база СВЧ электротермического оборудования» (Архангельский Ю.С., Воронкин В.А., 2003 г.);

– «Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки» (Архангельский Ю.С., 2003 г.);

– «Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и устано-

вок» (Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В., 2006 г.);

– «Проектирование электротехнологических установок» (Колесников Е.В., 2006 г.);

– «Измерения в СВЧ электротехнологических установках» (Архангельский Ю.С., Калганова С.Г., Яфаров Р.К., 2008 г.);

– «Установки диэлектрического нагрева, СВЧ установки» (Архангельский Ю.С., 2008 г.);

– «Проектирование и эксплуатация электротехнологических установок» (Колесников Е.В., Архангельский Ю.С., 2008 г.);

– «Измерения в СВЧ электротехнологии» (Архангельский Ю.С., Калганова С.Г., 2008 г.);

– «Камеры лучевого типа в электротехнологических установках» (Архангельский Ю.С., Огурцов К.Н., Гришина Е.М., 2010 г.);

– «Ущерб и резервирование в СВЧ электротермии» (Архангельский Ю.С., Доценко А.В., 2010 г.);

– «Установки сверхвысокочастотного нагрева. Учебник» (Архангельский Ю.С., 2010 г.);

– «Меандровые системы в СВЧ электротехнологии» (Архангельский Ю.С., Огурцов К.Н., Гришина Е.М., 2011 г.);

– «Справочная книга по СВЧ электротехнологии» (Архангельский Ю.С., 2011 г.);

– «СВЧ модификация полимеров» (Архангельский Ю.С., Гришина Е.М., Лаврентьев В.А., Слепцова С.К., 2012 г.);

– «Электрофизические методы СВЧ обработки» (Архангельский Ю.С., Гришина Е.М., Огурцов К.Н., Яфаров Р.К., 2014 г.);

– «Камеры с бегущей и со стоячей волной» (Архангельский Ю.С., Колесников Е.В., 2015 г.);

– «Камеры лучевого типа» (Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В., 2017 г.).

В учебной и научной работе кафедра АЭУ сотрудничала с филиалами кафедры на ФГУП «Саратовский агрегатный завод» и с Саратовским филиалом Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

В 2006 г. научная школа СГТУ, работающая в области СВЧ электротехнологии, была признана ведущей научной школой РФ в области инженерных и технических наук (НШ – 9553. 2006.8).

В конце 2016 г. в рамках структурных изменений в СГТУ имени Гагарина Ю.А.

кафедры АЭУ и ЭПП были объединены в новую кафедру «Электроснабжение и электротехнология» (ЭЛЭТ). Новая кафедра продолжает подготовку бакалавров и магистров в области электротехнологии по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

Архангельский Ю.С., профессор кафедры ЭЛЭТ СГТУ имени Гагарина Ю.А., заведующий кафедрой АЭУ с 1992 по 2011 гг.

Тригорный С.В., доцент кафедры ЭЛЭТ СГТУ имени Гагарина Ю.А., заведующий кафедрой АЭУ с 2014 по 2016 гг.

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 (937) 224-08-05 – Вырыханов Денис Александрович (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.

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. Пачина, Ю.Л. Жупилова
Перевод на английский язык А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 26.06.2017
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 15,5 Уч. изд. л. 7,5
Тираж 500 экз. Заказ 41 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 2017 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: 26.06.2017
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 15,5 Publication base sheet 7,5
Circulation: 500 printed copies Order 41 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*