

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

**№ 1 (18)
Март 2018**

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ТРИГОРЛЫЙ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ	д.т.н., профессор, 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
С.В. ТРИГОРЛЫЙ	к.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, КТИ, Камышин
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (18)
March 2018

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals,
recommended for publications by the Higher Attestation Commission

Editor-in-Chief:

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH

Assistant to the Editor-in-Chief:

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

Chief Executive Officer

TRIGORLY SERGEI VIKTOROVICH

Editorial Board Members

Yu.S. ARKHANGELSKY

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

N.V. BEKRENEV

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

Yu.V. GULYAEV

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

V.B. DEMIDOVICH

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

L.S. ZIMIN

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

S.G. KALGANOVA

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

V.A. KOLOMEITSEV

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

V.N. LYASNIKOV

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

A.N. MAKAROV

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

G.A. MOROZOV

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

Yu. P. PERELIGIN

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

A.F. REZCHIKOV

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

I. V. RODIONOV

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

V.P. RUBTSOV

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

F.N. SARAPULOV

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

Yu.B. TOMASHEVSKY

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

S.V. TRIGORLY

PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

G.G. UGAROV

Dr.Sc., Professor, Kamishin Institute of Technologies, (branch) Volgograd State Technical University, Kamishin

V.N. KHMELEV

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

V.A. TSAREV

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Тригорлый С.В., Захаров В.В.** Численное моделирование процессов СВЧ плавления диэлектриков..... 5
- Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Абрамов А.Д.** Ультразвуковая консолидация тонколистовых металлов..... 11
- Швыдкий Е.Л., Сокунов Б.А., Бычков А.С., Соколов И.В.** Электромагнитное перемешивание кристаллизующегося слитка индуктором с неравномерной линейной нагрузкой 20
- Юдина В.О., Архангельский Ю.С.** Электропривод методических СВЧ электротермических установок 27

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

- Менщиков И.А.** Система диагностики силовой цепи управления магистрального тепловоза серии 2ТЭ116У..... 30
- Голубцов В.М.** Асинхронный тяговый привод в процессе эксплуатации и модернизации отечественных электровозов..... 37
- Менщиков И.А.** Алгоритмы идентификации диагностической информации в электромеханических транспортных системах с помощью адаптивных цифровых фильтров..... 40

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

- Глухов Д.А., Титов Д.Е., Угаров Г.Г.** Использование данных синхронизированных векторных измерений для мониторинга состояния изоляции воздушных линий электропередачи 46
- Должикова А.С., Степанов С.Ф.** Устройство диагностики и мониторинга электротехнического комплекса и алгоритм его работы 53
- Ларин Е.А., Ялов С.В.** Эффективность производства электроэнергии в системах транспорта природного газа с использованием низкотемпературных рабочих тел..... 57

ЭЛЕКТРОНИКА

- Тищенко О.Д., Тищенко А.А., Зоркин А.Я.** Исследования вторично-эмиссионных свойств катодов электровакуумных приборов 63
- Перинская И.В.** Перспективы использования ионно-лучевых методов в монолитно-интегральной технологии микроэлектроники СВЧ..... 66
- Миргородская Е.Е., Колчев В.А., Митяшин Н.П., Карнаухов Е.Д.** Стабилизация параметров выходного напряжения многоуровневых инверторов..... 70

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Мезенцов С.А., Родионов И.В.** Формирование карбидных и карбонитридных покрытий на титане методом электроискрового легирования 80

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Федоров А.В., Архангельский Ю.С., Митяшин Н.П., Миргородская Е.Е.** Системы управления установок СВЧ диэлектрического нагрева с перестраиваемой частотой 85

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

- Перинский В.В.** Управление интеллектуальной собственностью при коммерциализации высокоинтеллектуальных технологий 93
- Раецкая О.В.** Междисциплинарные связи в системе формирования компетенций обучающихся военных вузов 95

ЛЕТОПИСЬ

- Алексей Васильевич Бозриков** 106
- Костяев Э.В.** Некоторые страницы биографий руководителей СПИ-СГТУ имени Гагарина Ю.А. 107
- Архангельский Ю.С.** К вопросу о «тепловой смерти» Вселенной..... 122
- К сведению авторов** 126

CONTENTS

ELECTROTHERMY

Trigorly S.V., Zakharov V.V. Numerical simulation of microwave melting of dielectrics	5
Khmelev V.N., Slivin A.N., Abramov A.D. Ultrasonic consolidation of thin-sheet metals	11
Shvidkiy E.L., Sokunov B.A., Bichkov A.S., Sokolov I.V. Electromagnetic stirring of crystalline ingots by inductors with nonuniform linear loading	20
Yudina V.O., Arkhangelskiy Yu.S. Electric drives of continuous microwave electric heaters.....	27

ELECTROMECHANICS

Menshikov I.A. Diagnostics system for the power control circuit in the mainline locomotive series 2ТЭ116Y.....	30
Golubtsov V.M. Asynchronous traction drives in operation and modernization of domestic electric locomotives	37
Menshikov I.A. Identification algorithms for diagnostic information in electromechanical transport systems using adaptive digital filters	40

ELECTRIC POWER SUPPLY

Glukhov D.A., Titov D.E., Ugarov G.G. Using the synchronized vector measurement data for monitoring the insulation condition of air transmission lines	46
Dolzhikova A.S., Stepanov S.F. Devices for diagnostics and monitoring electrotechnical systems and their operation algorithms...	53
Larin E.A., Yalov S.V. Power production efficiency in the natural gas transportation systems using low boiling working substances	57

ELECTRONICS

Tishchenko O.D., Tishchenko A.A., Zorkin A.Ya. Research of secondary	
---	--

emission properties of cathodes of electric vacuum devices.....	63
Perinskaya I.V. Perspectives for the ion-beam method utilization in monolithic and integrated technologies of microwave microelectronics	66
Mirgorodskaya E.E., Kolchev V.A., Mityashin N.P., Karnaukhov E.D. Stabilization of output voltage parameters of multilevel inverters.....	70

MATERIALS SCIENCE

Mezentsov S.A., Rodionov I.V. Formation of carbide and carbon nitride coatings over titanium by the spark alloying method.....	80
---	----

CONTROLLING SYSTEMS

Fedorov A.V., Arkhangelskiy Yu.S., Mityashin N.P., Mirgorodskaya E.E. Control systems for installations of microwave dielectric heating with tunable frequency.....	85
--	----

SOCIAL ASPECT

Perinsky V.V. Intellectual property management under commercialization of high-hume technologies	93
Raetskaya O.V. Interdisciplinary communication within the system of competence formation of trainees in military universities	95

CHRONICLE

Aleksei V. Bozrikov	106
Kostyaev E.V. Pages of Biographies Heads of Administration at Saratov Polytechnic Institute – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov	107
Arkhangelsky Yu.S. The issues of death heat of the Universe	122
Information for Authors	126

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.365.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВЧ ПЛАВЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

С.В. Тригорлый, В.В. Захаров

NUMERICAL SIMULATION OF MICROWAVE MELTING OF DIELECTRICS

S.V. Trigorly, V.V. Zakharov

Рассмотрено численное моделирование процессов СВЧ плавления диэлектрических материалов в камерах лучевого типа. Предложена математическая модель решения задач электродинамики и теплопроводности с учетом фазового перехода при СВЧ плавлении диэлектриков, электрофизические свойства которых изменяются в зависимости от температуры. Методика моделирования может быть использована при разработке СВЧ электротехнологических установок для плавления диэлектрических материалов на стадии выбора мощности и частоты СВЧ генератора.

Ключевые слова: математическое моделирование, СВЧ плавление, диэлектрики, электродинамика, уравнение теплопроводности, граничные условия, фазовые переходы, температурное поле

Сверхвысокочастотное (СВЧ) плавление диэлектриков имеет перспективы применения в различных технологических процессах: получение строительных материалов методом экструзии, сварка пластмассовых материалов, размораживание грунта, нанесение диэлектрических композитов на металлические подложки, плавление битума, плавление жира (в пищевой промышленности). Развитие методов численного моделирования процессов СВЧ термообработки диэлектриков с учетом фазовых переходов и изменения тепло- и электрофизических

Numerical simulation of microwave melting processes of dielectric materials in the radiation type chambers is considered. A mathematical model is proposed for solving the problems of electrodynamics and heat conduction, taking into account the phase transition in the microwave melting of dielectrics whose electrophysical properties vary with temperature. The modeling technique can be used in the development of microwave electrotechnological installations for melting dielectric materials at the stage of power and frequency selection of a microwave generator

Keywords: mathematical modeling, microwave melting, dielectrics, electrodynamics, heat equation, boundary conditions, phase transitions, temperature field

свойств материалов в зависимости от температуры позволит расширить области применения СВЧ энергии в промышленных технологиях. Это даст возможность реализовать известные преимущества СВЧ нагрева, связанные с объемным характером тепловыделения в существующих технологиях, что отразится на повышении качества готовой продукции, производительности и энергоэффективности электротехнологических установок.

Задачи плавления относятся к классу задач теплопроводности с фазовыми пе-

реходами вещества (задача Стефана) [1]. Такого рода задачи являются нелинейными, поскольку граница фазового перехода является неизвестной функцией координат и времени, а теплофизические свойства, как правило, зависят от температу-

ры. В данной работе рассмотрено численное моделирование процессов СВЧ плавления материалов в камерах лучевого типа [2]. На рис. 1 схематично показано расположение антенны и объекта термообработки.

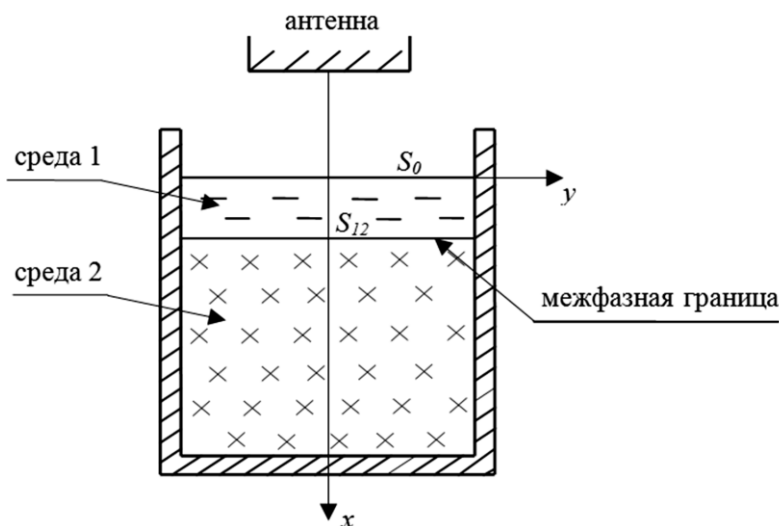


Рис. 1. Геометрическая модель СВЧ установки для плавления диэлектрика

Задача СВЧ плавления диэлектрика представляет собой связанную задачу электродинамики и теплопроводности с учетом фазового перехода. Задача электродинамики для волновых процессов сводится к решению уравнения Гельмгольца относительно вектора напряженности электрического поля E [1]:

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

Здесь где μ_r – относительная магнитная проницаемость; $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ε'_r – относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть); $\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_r$ – электрическая проводимость; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; ε_0 – электрическая постоянная; ε''_r – эффективный коэффициент потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости); f – частота электромагнитного поля.

Граничные условия сопряжения задачи электродинамики на границах раздела сред имеют вид:

$$\begin{aligned} [H_2 - H_1, n] &= 0, [n, E_2 - E_1] = 0, \\ n(D_2 - D_1) &= 0, n(B_2 - B_1) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где n – единичный вектор нормали к поверхности; H_1, H_2, E_1, E_2 – векторы напряженности магнитного и электрического поля; D_1, D_2, B_1, B_2 – векторы электрической и магнитной индукции для сред 1 и 2 соответственно.

Если среда является идеальным диэлектриком (например, металлическая емкость, в которой расположен диэлектрик), то граничные условия принимают следующий вид:

$$[n, E] = 0, nB = 0. \quad (3)$$

Задача плавления описывается уравнением теплопроводности с учетом фазового перехода:

$$\text{div}(\lambda \text{grad } T) + q_v(x, y, z, t) = \rho \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; $q_v(x, y, z, t)$ – мощность внутренних источников теплоты, обусловленных СВЧ энергией в функции координат

x, y, z и времени t ; ρ – плотность; H – энтальпия.

На границе воздух – диэлектрик действует граничное условие третьего рода:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = -h(T - T_c), \quad (5)$$

где h – коэффициент теплоотдачи с поверхности S_0 ; T_c – температура окружающей среды.

На межфазной границе S_{12} действует граничное условие четвертого рода (условие Стефана):

$$\rho r(\mathbf{v} \times \mathbf{n}) = (q_1 - q_2) \times \mathbf{n}, \quad (6)$$

где r – скрытая теплота плавления; $\mathbf{v}$ – скорость перемещения межфазной границы; q_1, q_2 – тепловые потоки к межфазной границе из жидкой (среда 1) и твердой (среда 2) фаз.

В первом приближении рассмотрим одномерную математическую модель СВЧ плавления для случая падения плоской электромагнитной волны на плоский диэлектрик. При этих условиях волновое уравнение (1) примет вид

$$\frac{d^2 E_n}{dx^2} = k_n^2 E_n, \quad (7)$$

где E_n – комплексная функция напряженности электрического поля в слое диэлектрика с номером n ; k_n – постоянная распространения; x – координата в направлении распространения электромагнитной волны.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для жидкой и твердой фаз с номерами n имеет вид

$$\lambda_n \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} \right) + q_v(x) = c_n \rho_n \frac{\partial T_n}{\partial t}, \quad (8)$$

где c_n – удельная теплоемкость.

Уравнение (8) записано без учета конвекции тепла в жидкой фазе. Граничные условия на границе раздела фаз имеют вид:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right) - r \rho \frac{dx}{dt} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right) \text{ на } S_{12}. \quad (9)$$

Здесь $\frac{dx}{dt}$ – скорость перемещения границы раздела фаз.

В результате решения волнового уравнения (7) по методике, изложенной в [2], получаем распределение мощности внутренних источников теплоты в нагреваемом диэлектрике:

$$q_v(x) = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg} \delta |E|^2, \quad (10)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Для решения задачи теплопроводности воспользуемся методом тепловых балансов, который широко используется при численном интегрировании уравнения теплопроводности [3]. Разобьем диэлектрик на элементарные объемы с номерами $i = 1, 2, \dots, N$ с шагом Δx . Предполагаем, что теплофизические свойства каждого объема постоянны и сосредоточены в центральной узловой точке. В основе вывода расчетного алгоритма для каждой узловой точки положен фундаментальный закон сохранения. Уравнение теплового баланса для i -й узловой точки имеет вид

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 \quad (11)$$

или

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{i-1} - T_i) F \Delta t + \\ & + \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{i+1} - T_i) F \Delta t + q_v \Delta x F \Delta t = \\ & = \left[\frac{c \rho F \Delta x (T'_i - T_i)}{\Delta t} + \frac{\rho F \Delta x r}{\Delta t} \right] \Delta t. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь Q_1, Q_2 – количество теплоты, подводимое за счет теплопроводности с двух сторон к рассматриваемому узлу; Q_3 – количество теплоты, которая выделяется в элементарном объеме $V = \Delta x F$; Q_4 – изменение энтальпии вещества в элементарном объеме (первое и второе слагаемые в правой части уравнения (12)); F – площадь поверхности, перпендикулярной направлению теплового потока; Δt – шаг по времени. Из уравнения (12) определим температуру для внутренних узлов T'_i в конце интервала времени Δt для начала нагрева, когда температура диэлектрика меньше температуры плавления и фазовых превращений не происходит:

$$T'_i = T_i + \frac{\Delta t \left[q_v \Delta x - \frac{\lambda}{\Delta x} (T_i - T_{i-1}) - \frac{\lambda}{\Delta x} (T_i - T_{i+1}) \right]}{c \rho \Delta x}. \quad (13)$$

Для элементарных объемов, граничащих с поверхностью теплообмена, необходимо учитывать граничные условия (5). Тогда в левой части уравнения теплового баланса (11) вместо Q_1 или Q_2 появится тепловой поток, обусловленный теплообменом с окружающей средой:

$$Q_5 = h(T - T_C)F \Delta t. \quad (14)$$

В этом случае соотношение (13) примет вид

$$T'_i = T_i + \frac{\Delta t \left[q_v \Delta x - \frac{\lambda}{\Delta x} (T_i - T_{i-1}) - \frac{(T_i - T_C)}{\frac{\Delta x}{2\lambda} + \frac{1}{h}} \right]}{c \rho \Delta x}. \quad (15)$$

Уравнения (13) и (15) используем для расчета температур внутренних и внешних узлов, имеющих температуру T_i , отличную от температуры плавления. При достижении узлом i температуры плавления его температура не изменяется до тех пор, пока весь элементарный объем не расплавится. В этом случае из уравнения (12) с учетом $T'_i = T_i$ можно определить время плавления элементарного объема:

$$\Delta t_n = \frac{r \rho \Delta x}{\theta_{\infty} \Delta x + \frac{\lambda}{\Delta x} (T_i - T_{i-1}) - \frac{\lambda}{\Delta x} (T_i - T_{i+1})}. \quad (16)$$

Данный алгоритм расчета СВЧ плавления реализован в среде MathCAD с учетом изменения электрофизических свойств диэлектрика от температуры. В качестве примера рассмотрен процесс СВЧ плавления льда. При моделировании принимались следующие исходные данные: толщина льда $d = 2$ см; температура окружающей среды $T_C = 18^\circ\text{C}$; начальная температура льда $T_0 = -20^\circ\text{C}$; теплофизические свойства льда: $\lambda = 2,25$ Вт/(м·К); $c = 2027$ Дж/(кг·К); $\rho = 917,5$ кг/м³. Электрофизические свойства льда в зависимости от температуры определены по [4]. Мощность СВЧ генератора составляет 2,5 кВт, частота 2450 МГц, средняя плотность мощности 17,86 кВт/м².

В результате моделирования электродинамической задачи установлено, что изменение электрофизических свойств льда $\varepsilon'(T)$ и $\text{tg } \delta(T)$ существенно влияет на характер распределения напряженности электрического поля и внутренних источников теплоты вдоль распространения электромагнитной волны $q_v(x)$ (см. рис. 2, 3). Волновой характер данного распределения обусловлен отражением электромагнитной волны от нижней металлической стенки СВЧ камеры (рис. 1), в которой происходит процесс плавления.

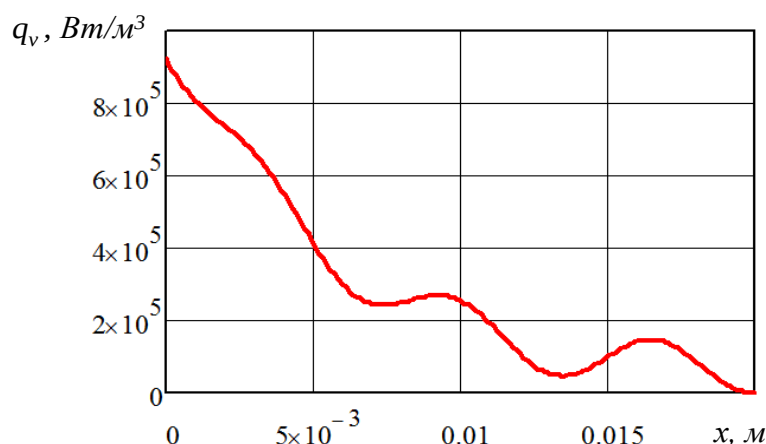


Рис. 2. Распределение мощности внутренних источников теплоты по толщине диэлектрика при температуре -100°C , $\varepsilon' = 80$, $\text{tg } \delta = 0,375$

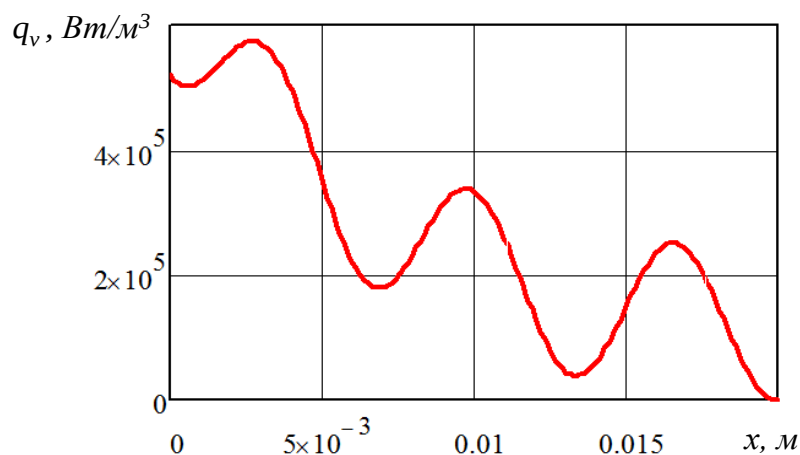


Рис. 3. Распределение мощности внутренних источников теплоты по толщине диэлектрика при температуре 0°C , $\epsilon' = 82,5$, $\text{tg } \delta = 0,255$

В этой связи в алгоритме решения самосогласованной задачи электродинамики (7), (8) учтены температурные зависимости $\epsilon'(T)$ и $\text{tg } \delta(T)$. Результаты моделирования представлены в виде распределения температуры по толщине диэлектрика для различных моментов времени (рис. 4). Для начального периода СВЧ нагрева вид распределения тем-

пературы по толщине льда (рис. 4) качественно совпадает с распределением внутренних источников теплоты $q_v(x)$ (рис. 2). В дальнейшем происходит выравнивание температуры по толщине льда за счет теплопроводности (рис. 4). При заданной мощности СВЧ генератора плавление льда происходит за время около 140 с.

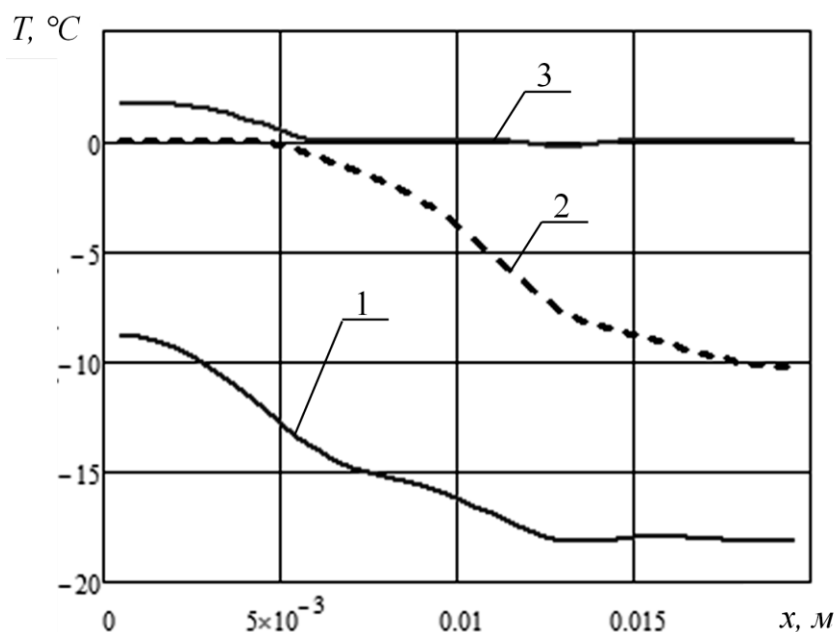


Рис. 4. Распределение температуры по толщине диэлектрика в различные моменты времени: 1 – 10 с; 2 – 40 с; 3 – 143 с

Таким образом, предложенная численная модель СВЧ плавления диэлектриков позволяет учитывать изменения электрофизических свойств от температуры в процессе нагрева и может быть исполь-

зована при разработке СВЧ электротехнологических установок для плавления диэлектрических материалов на стадии выбора мощности и частоты СВЧ генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карташов Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. М.: Высш. шк., 1985. 480 с.

2. **Архангельский Ю.С.** Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. 212 с.

3. **Дульнев Г.Н.** Методы расчета тепловых режимов приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.

4. Диэлектрические потери [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mybiblioteka.su/tom2/3-148269.html>. 29.03.2018.

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 05.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОНСОЛИДАЦИЯ ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов

ULTRASONIC CONSOLIDATION OF THIN-SHEET METALS

V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov

Представлены результаты исследований по ультразвуковой консолидации тонколистовых металлов. Проведенные теоретические исследования позволили изучить влияние предела текучести, модуля сдвига, частоты ультразвуковых колебаний и величины ультразвуковой энергии на консолидацию двух листов тонколистовых металлов, таких как медь, алюминий, титан. Создан стенд для консолидации тонколистовых металлов методом ультразвуковой сварки, позволивший исследовать влияние усилия прижима тонколистовых металлов к сварочному инструменту, времени ультразвукового воздействия, амплитуды ультразвуковых колебаний на прочность формирования соединения тонколистовой меди.

Ключевые слова: ультразвук, сварка, консолидация, металлы, стенд, оптимизация

Ультразвуковая сварка является одним из наиболее эффективных способов соединения изделий, изготавливаемых из полимеров и металлов. В связи с развитием аддитивных технологий ультразвуковая сварка может стать перспективным направлением соединения тонколистовых металлов.

Её применение для получения однородных материалов обусловлено возможностью формирования сварного соединения отличающихся по свойствам и толщине металлов. При этом сварка реализуется без предварительной подготовки поверхностей, без снятия оксидных плёнок и загрязнений.

Применение современных способов управления ультразвуковыми аппаратами для сварки тонколистовых металлов позво-

The article presents the results of theoretical and pilot studies on ultrasonic consolidation of thin-sheet metals. The conducted theoretical analysis allowed to investigate the influence of the yield point, rigidity modulus, and frequency of ultrasonic oscillations, and to determine the size of ultrasonic energy taking into account the losses necessary for consolidating two sheets of thin metals, such as copper, aluminum, and titanium. A stand was used for consolidation of thin-sheet metals by the method of ultrasonic welding, and allowed to investigate the influence of clipping thin-sheet metals to the welding tool, the time of ultrasonic impact, and the amplitude of ultrasonic fluctuations on the joint durability of thin-sheet copper.

Keywords: ultrasound, welding, consolidation, metals, stand, optimization

ляет реализовать управление энергетикой процесса [1, 2], вводить определенное количество энергии, достаточное для формирования качественных сварных швов при соединении различных металлов.

Ультразвуковая сварка металлов основана на использовании энергии механических колебаний, формируемых в свариваемых материалах сварочным инструментом колебательной системы, совершающим возвратно-поступательное движение с ультразвуковой частотой 15-50 кГц и амплитудой до 100 мкм.

При этом энергия ультразвуковых колебаний вводится в свариваемые металлы из сварочного инструмента при обеспечении статического сварочного усилия прижима

сварочного инструмента к поверхности листов. Процесс формирования сварного соединения тонколистовых металлов между собой происходит за счёт возникающих в металлах знакопеременных напряжений и деформаций, а также в результате сложного взаимодействия множества различных явлений, возникающих под воздействием ультразвуковых колебаний:

- уплотнения микро- и макронеровностей на поверхности свариваемых металлов и сварочного инструмента;

- механического удаления и выгорания окислов и оксидных плёнок на внешней поверхности тонколистовых металлов;

- сближения свариваемых поверхностей на близкие к межатомным расстояния за счёт обеспечения статического сварочного усилия прижима;

- повышения температуры и пластичности металлов в зоне сварки за счёт процессов деформации и трения с высокой частотой;

- консолидации локальных участков сварного шва на микро- и макроуровнях.

Основная часть энергии, выделяемой в зоне сварки, обуславливается процессами внешнего и внутреннего трения. При этом, внешнее трение определяется основным источником энергии ультразвуковых колебаний – сварочным инструментом. Величина энергии ультразвуковых колебаний, выделяемой в свариваемых материалах, зависит от амплитуды и частоты колебаний, механических и термических свойств материалов и влияет на знакопеременные напряжения и деформации, которые возникают в свариваемых материалах в зоне сварки. В результате упругопластической деформации происходит активация поверхностного слоя металлов, механическое удаление и выгорание оксидных плёнок, молекулярное адгезионное сцепление. Ультразвуковое воздействие обеспечивает превращение в однородную структуру, то есть консолидацию тонких слоев металлов.

При этом сварка происходит на локальных участках сварного шва, и консолидация материалов происходит последовательно, сначала в тех зонах, где максималь-

ный контакт и максимальное выделение энергии, повышение температуры, и, как следствие, повышение пластичности металлов.

Процессы внутреннего трения в настоящее время являются малоизученными. Однако очевидно, что в результате повышения пластичности происходит ряд явлений (движение дислокаций, включений, зерен, и т.п.), влияющих на образование однородного соединения (сварного ультразвукового шва). Диффузионно-вязкая ползучесть кристаллических структур оказывает влияние на процесс внутреннего трения и формирование сварного шва. Таким образом, основной вклад в величину вводимой в соединяемые металлы энергии вносят процессы внешнего трения сварочного инструмента и тонколистовых металлов.

Для выявления оптимальных условий и режимов реализации консолидации тонколистовых металлов с помощью ультразвуковой сварки необходимо решить следующие частные задачи.

1. Построить модель процесса формирования соединения, провести анализ процесса для выявления значений ультразвуковой энергии, необходимой и достаточной для формирования сварного шва определенных размеров для различных тонколистовых металлов.

2. Для подтверждения возможности практической реализации процесса консолидации провести экспериментальные исследования процесса ультразвуковой сварки тонколистовых металлов.

3. Основываясь на результатах теоретических и экспериментальных исследований, определить оптимальные параметры ультразвукового воздействия для формирования сварного шва определенных размеров для различных тонколистовых металлов.

Теоретические исследования были проведены для различных по свойствам тонколистовых металлов. В качестве объектов исследований были выбраны наиболее часто применяемые металлы, такие как медь, алюминий, титан. В табл. 1 представлены основные физические свойства исследуемых материалов [3].

Таблица 1

Физические свойства исследуемых материалов

Материал	Предел текучести $\sigma_m \cdot 10^6$, Н/м ²	Модуль сдвига $G \cdot 10^{10}$, Н/м ²	Температура плавления T , °С	Теплоемкость C , Дж/кг°С	Удельная теплота плавления $\lambda \cdot 10^5$, Дж/кг	Плотность ρ , кг/м ³
Медь	115	4,55	1083	400	2,1	8900
Алюминий	55	2,6	660	920	3,9	2712
Титан	310	4,14	1668	530	3,1	4500

Целью проведения теоретических исследований было определение значений тепловой и ультразвуковой энергий, необходимых для нагрева и расплавления определенного участка металлических листов, соответствующего месту формирования сварного шва.

На рис. 1 представлена модель процесса формирования шва (схема стенда для экспериментальных исследований), на которой показано, как осуществляется ввод ультразвуковых колебаний в свариваемые металлы [4].

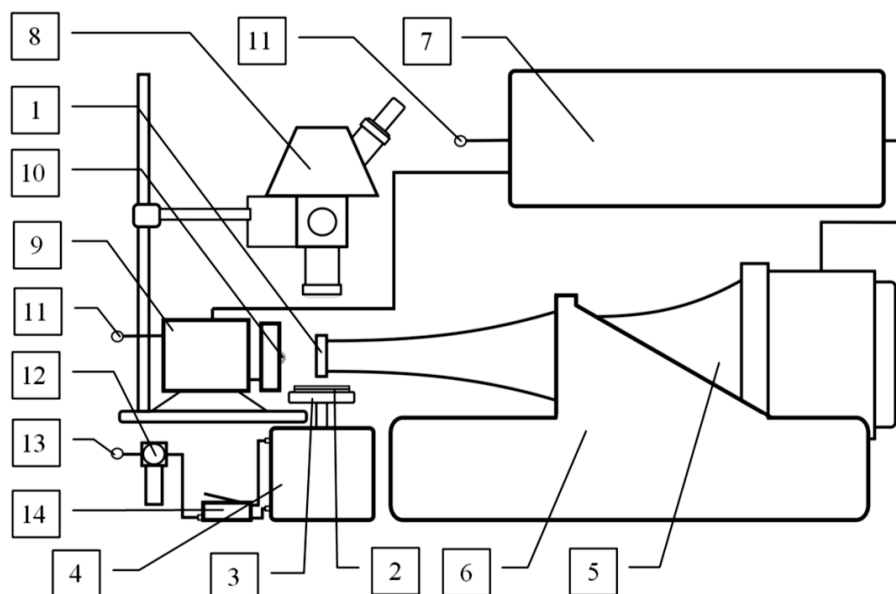


Рис. 1. Структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований

Толщина сварного шва устанавливалась равной 100 мкм, ширина сварного шва $2,5 \cdot 10^{-3}$ м, длина сварного шва $5 \cdot 10^{-3}$ м, площадь формируемого сварного шва $12,5 \cdot 10^{-6}$ м².

При проведении анализа процесса распространения колебаний для предварительной оценки величины энергии осуществлялся расчёт значения тепловой энергии, необходимой для нагрева зоны сварки до температур плавления участка металлов, соответствующего сварному шву:

$$Q_1 = C\rho\Delta T V_1, \quad (1)$$

где C – теплоемкость, Дж/кг°С; ΔT – разность между комнатной температурой и температурой плавления, °С; ρ – плотность кг/м³; V_1 – объем зоны нагрева, м³.

Энергия, необходимая для расплавления участка металлических листов Q_2 сварного шва, и энергия с учетом тепловых потерь Q_3 вне зоны сварки равны

$$Q_2 = \lambda\rho V_2, \quad (2)$$

$$Q_1 = C_p \Delta T V_3, \quad (3)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (4)$$

где λ – удельная теплота плавления; V_2 – объем зоны плавления в материалах; V_3 – объем зоны тепловых потерь; Q_3 – потери энергии.

Известны результаты теоретических исследований процесса ультразвукового воздействия на поверхность металлов, позволившие установить зависимость между амплитудой деформации поверхности металлов и свойствами металлов, амплитудой и частотой ультразвуковых колебаний, а также зависимость скорости выделения энергии ультразвуковых колебаний (скорости диссипации) в зоне сварки металлов [5]. Особое внимание при этом было уделено влиянию процессов ультразвукового трения рабочей поверхности сварочного инструмента на скорость выделения ультразвуковой энергии в процессе воздействия.

Влияние предела текучести, модуля сдвига, частоты и амплитуды механических ультразвуковых колебаний позволяет определять скорость диссипации энергии УЗ колебаний в зоне сварки $P_{св}$, причем

$$P_{св} = (4 \div 9) \frac{f \sigma_T^2 \delta S_{св}}{G}, \quad (5)$$

где f – частота, c^{-1} ; σ_T – предел текучести, H/m^2 ; G – модуль сдвига, H/m^2 ; δ – толщина зоны формирования сварного шва, м; $S_{св}$ – площадь сварного шва, м.

Учитывается, что колебания сварочного инструмента направлены тангенциально к поверхности свариваемых материалов и вызывают механические деформации и сдвиг локальных участков материалов в зоне сварки с ультразвуковой частотой.

В табл. 2 представлены результаты расчёта значений энергий, необходимых для формирования сварного шва двух уложенных внахлест листов меди толщиной по 100 мкм.

Таблица 2

Значения тепловых и ультразвуковой энергий для сварки различных материалов

Материалы	Энергия на нагрев Q_1 , Дж	Энергия на плавление, Q_2 , Дж	Энергия потерь, Q_3 , Дж	Энергия сварки сумм. Q , Дж	Скорость диссипации энергии УЗ сварки $P_{св}$, Дж/с
Медь	4,7	2,3	153,8	160,8	59
Алюминий	2	1,3	107,8	111,1	23,6
Титан	4,9	1,7	103	109,6	471,2

Значение величины Q позволяет осуществлять оценку тепловой энергии, необходимой для формирования сварного шва. Потери энергии Q_3 учитывают рассеяние тепловой энергии вне зоны сварки в сварочный инструмент, в опору, в листы свариваемых материалов за зону сварки [2].

Скорость диссипации энергии ультразвуковых колебаний в зоне сварки $P_{св}$ позволяет оценить величину энергии, которую необходимо выделить в зоне шва при помощи ультразвуковых колебаний, для консолидации двух листов тонколистовых металлов толщиной по 100 мкм, с площадью формируемого сварного шва $12,5 \cdot 10^{-6}$ м. При этом скорость диссипации энергии

ультраульковых колебаний зависит от механических свойств материалов, предела текучести, модуля сдвига, частоты УЗ колебаний.

Для подтверждения правильности теоретического определения параметров сварки была разработана структурная схема и практически реализован стенд для проведения экспериментальных исследований по консолидации тонколистовых металлов методом ультразвуковой сварки. На рис. 2 представлено фото стенда для проведения исследований.

Экспериментальные исследования процесса ультразвуковой сварки осуществлялись для двух тонколистовых пластин из

меди, толщиной по 100 мкм. Введение ультразвуковой энергии в пластины осуществлялось при помощи сварочного инструмента 1. Пластины тонколистового металла 2 укладывались внахлест на стальную опору 3, которая при помощи пневмоцилиндра 4 обеспечивает статическое усилие прижима свариваемых пластин к сварочному инструменту.

В состав ультразвукового стенда для проведения исследований входит ультра-

звуковая пьезоэлектрическая колебательная система 5, жестко закрепленная на станине 6 в определенном месте, для уменьшения влияния величины статического усилия прижима на демпфирование и уменьшение значения амплитуды ультразвуковых колебаний.

Электрическая энергия промышленной сети преобразуется в ультразвуковые колебания при помощи электронного блока ультразвукового генератора 7.

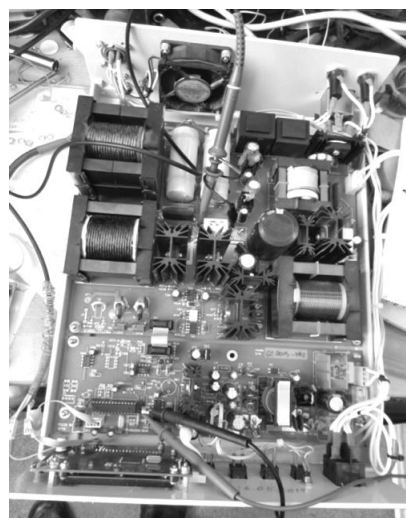


Рис. 2. Стенд для исследований процесса ультразвуковой сварки металлов

В состав электронного блока входят системы, необходимые для обеспечения определенных режимов работы ультразвукового оборудования. Это система согласования колебательной системы с генератором и обратной связи, система фазовой автоподстройки резонансной частоты, система стабилизации амплитуды колебаний, задающий генератор, контроллер управления, система индикации, блоки питания. При проведении экспериментальных исследований осуществлялся контроль амплитуды колебаний сварочного инструмента в процессе ультразвукового воздействия на тонколистовые металлы. Для контроля амплитуды использовался стробоскопический метод контроля [6], включающий применение микроскопа 8 со шкалой, имеющей цену деления 7 мкм, и блок электронного стробоскопа 9 с источником стробоскопического освещения 10, синхронизируемый с электронным блоком ультразвукового ге-

нератора. Блок электронного микроскопа и электронный блок ультразвукового генератора подключаются к промышленной сети 220 В 11. Для контроля значения статического усилия свариваемых пластин металла к поверхности сварочного инструмента использовался пневматический регулятор с манометром 12, подключаемый к пневмосети 13. Для обеспечения статического усилия прижима при помощи пневмоцилиндра использовалась пневмопедаль 14.

Для проведения экспериментальных исследований по определению прочности соединений были изготовлены специальные образцы, фото одного из которых представлено на рис. 3. Длина образцов составляла 150 мм, ширина – 15 мм.

Для выявления оптимальных условий и режимов сварки были проведены экспериментальные исследования прочности сварных швов тонколистовых металлов на разрыв [7]. На рис. 4 представлен образец тон-

колистовой меди со сварным швом после проведения исследований прочности шва на разрыв.

В результате исследований были установлены режимы и условия формирования неравномерного по площади ввода ультразвуковых колебаний сварного шва. Схватывание и консолидация тонколистовых металлов меди происходит на локальных участках, составляющих примерно 70-75% площади свариваемых пластин. Это было

установлено при растяжении свариваемых тонких листов друг относительно друга и визуальном осмотре сформированного сварного шва.

Возможно, неравномерное схватывание на локальных участках связано с наличием неровностей, отличием амплитуд деформации и сдвига в слоях металлов, приводящих к неравномерным значениям температур и возникновению неравномерной пластичности металлов.



Рис. 3. Образец тонколистовой меди для проведения исследований и внешний вид сварного шва при растяжении сваренных листов друг относительно друга



Рис. 4. Образец тонколистовой меди со сварным швом после проведения исследований прочности соединения

Для выявления условий формирования шва с максимальной однородностью были исследованы образцы, полученные при различных режимах воздействия. Результаты испытаний позволили выявить наилучшие условия формирования швов. Эти результа-

ты представлены в виде зависимости средней прочности сварных швов образцов в зависимости от значения статического усилия прижима свариваемых пластин к сварочному инструменту (рис. 5).

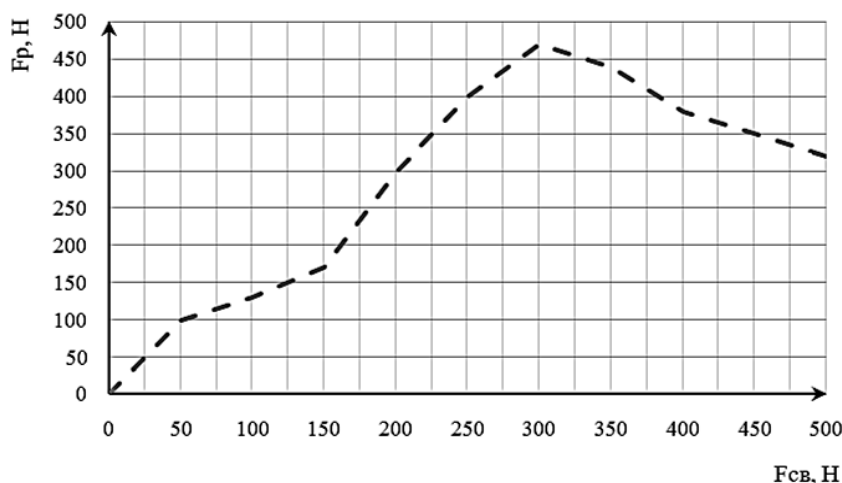


Рис. 5. Зависимость прочности сварного шва от значения статического усилия прижима тонколистовых металлов к сварочному инструменту

Установлено, что максимальная прочность сварных швов составляет 470 Н при обеспечении усилия прижима опоры и материалов к сварочному инструменту в процессе сварки в 300 Н и обеспечении амплитуды продольных колебаний сварочного инструмента 75 мкм.

Дальнейшие экспериментальные исследования по обеспечению максимальной прочности сварных швов образцов позволили установить зависимость прочности получаемого сварного шва тонколистовых металлов от времени УЗ воздействия (рис. 6).

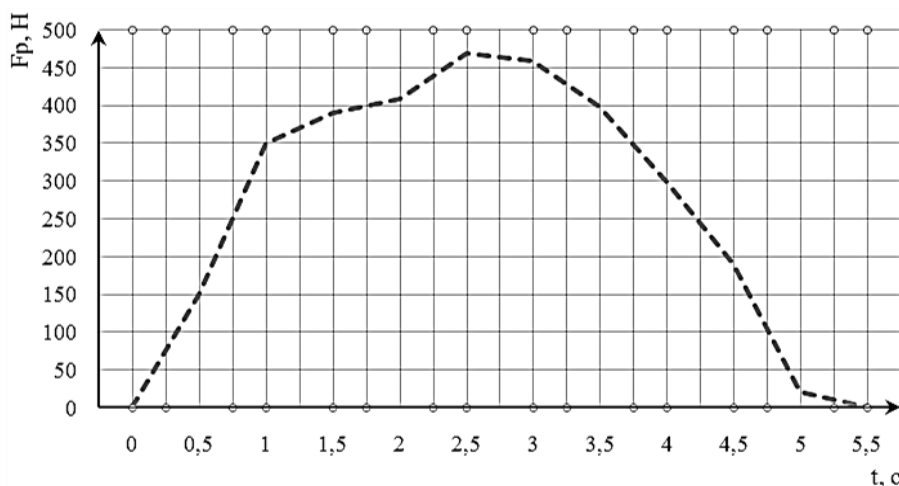


Рис. 6. Зависимость прочности сварного шва от значения времени ультразвукового воздействия

Оптимальное время ультразвукового воздействия для получения сварного шва двух листов тонколистовой меди толщиной по 100 мкм составило 2,5 с. При этом проч-

ность сварных швов при проведении испытаний на разрыв в среднем составила 470 Н.

Установлено, что увеличение времени ультразвукового воздействия больше опти-

мального приводит к уменьшению толщины сварного шва, разрушению меди в зоне сварки и, как следствие, уменьшению прочности сварного шва.

При уменьшении времени ультразвукового воздействия величины ультразвуковой энергии было недостаточно, что приводило к образованию сварного шва недостаточной прочности.

Таким образом, результаты исследований позволили установить, что оптимальная скорость диссипации ультразвуковой энергии для двух листов меди должна составлять 59 Дж/с, что при воздействии в течение 2,5 секунды позволяет выделить в материалах 147,5 Дж энергии.

Это соответствует необходимому для образования сварного шва значению тепловой энергии.

В результате экспериментальных исследований установлено, что оптимальное время ультразвукового воздействия для листов меди составляет 2,5 с, а оптимальное усилие прижима свариваемых материалов к рабочему инструменту должно быть 300 Н.

Проведенные теоретические исследования позволили изучить влияние на сварку предела текучести, модуля сдвига, частоты УЗ колебаний. Было установлены оптимальные значения ультразвуковой энергии с учетом потерь, необходимой для консолидации двух листов тонколистовых металлов, таких как медь, алюминий, титан толщиной 100 мкм при площади формируемого сварного шва $12,5 \cdot 10^{-6}$ м.

Для проведения экспериментальных работ и подтверждения результатов теоретических исследований был разработан и реализован стенд для консолидации тонколистовых металлов методом ультразвуковой сварки, позволяющий управлять основными параметрами процесса [8, 9], такими как усилие прижима тонколистовых металлов к сварочному инструменту, время ультразвукового воздействия, амплитуда ультразвуковых колебаний.

Проведенные экспериментальные исследования прочности полученных образцов тонколистовой меди позволили установить оптимальные параметры усилия прижима, времени сварки при амплитуде продольных колебаний сварочного инструмента 75 мкм.

Для создания промышленного оборудования для консолидации тонколистовых металлов установлена необходимость обеспечения высокой точности изготовления рабочей поверхности сварочного инструмента, обеспечения дополнительных концентраторов напряжения и деформаций в виде специальной накатки и выступов на поверхности сварочного инструмента. Создаваемое промышленное оборудование должно исключить возникновение перекоса рабочей поверхности и свариваемых листов металла при обеспечении усилия прижима в процессе сварки. Кроме того, должны быть максимально исключены потери ультразвуковой и тепловой энергии из зоны сварки в опору, сварочный инструмент и воздушную среду вблизи и на удаленных точках от сварного шва.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Khmelev V.N.** Model of process and calculation of energy for a heat generation of a welded joint at ultrasonic welding polymeric thermoplastic materials / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // 8th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'07 – Proceedings 2007 8th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'07. Russian Foundation of Basic Researches (RFBR). 2007. P. 316-322.

2. Theoretical Investigations of Continuous Ultrasonic Seam Welding of Thermoplastic Polymers and Fabrics / V.N. Khmelev, A.V. Lehr, A.N. Slivin, A.D. Abramov // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2010. P. 341-344.

3. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братовский и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

4. Investigation of Ultrasonic Surface Treatment of Metals / A.N.Slavin, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, S.S. Khamriteliy / International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2010. P. 363-369.

5. **Холопов Ю.В.** Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю.В. Холопов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 224 с.

6. Способ измерения амплитуды колебаний: пат. № 2292530 РФ / Г.В. Леонов, В.Н. Хмелёв, Д.С. Абраменко, И.И. Савин. Заявл. 14.04.2005.

7. Ультразвуковая сварка термопластичных материалов / В.Н. Хмелёв,

А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов, С.С. Хмелёв. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. 281 с.

8. **Хмелёв В.Н.** Повышение эффективности энергетического воздействия при ультразвуковой сварке / В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 278-281.

9. **Хмелёв В.Н.** Совершенствование ультразвуковой сварки и создание аппаратов для её реализации / В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Известия Томского политехнического университета. 2013. № 4. С. 152-157.

Хмелёв Владимир Николаевич – доктор технических наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Сливин Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерения и автоматизации» Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Абрамов Алексей Дмитриевич – инженер Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Vladimir N. Khmelev – Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Research, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Alexey N. Slivin – Ph.D., Associate Professor, Department of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Alexey D. Abramov – Engineer, Biysk Technological Institute of Polzunov Altai State Technical University

Статья поступила в редакцию 10.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

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.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГОСЯ СЛИТКА ИНДУКТОРОМ С НЕРАВНОМЕРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Е.Л. Швыдкий, Б.А. Сокунов, А.С. Бычков, И.В. Соколов

ELECTROMAGNETIC STIRRING OF CRYSTALLINE INGOTS BY INDUCTORS WITH NONUNIFORM LINEAR LOADING

E.L. Shvidkiy, B.A. Sokunov, A.S. Bichkov, I.V. Sokolov

Рассмотрен один из способов повышения эксплуатационных свойств индукционных устройств, воздействующих на кристаллизующийся металл. Анализ электромагнитных, тепловых и гидродинамических полей произведен методом конечных элементов с учетом изменения электропроводности в зависимости от температуры и агрегатного состояния слитка. Полученные численные результаты позволили получить равномерное распределение магнитной индукции на границе жидкого металла и повысить интенсивность перемешивания жидкого металла.

Ключевые слова: бегущее магнитное поле; электромагнитное перемешивание; кристаллизация; экранирующий эффект; численный анализ

Индукционные электротехнологические установки, обеспечивающие электромагнитное воздействие на жидкие металлы, весьма разнообразны: плавильные печи, установки для транспорта и дозирования жидкого металла, устройства электромагнитного (бесконтактного) перемешивания жидкой фазы слитка в процессе кристаллизации.

Установки электромагнитного перемешивания (ЭМП) можно разделить на устройства для воздействия при литье цветных и черных металлов. Это связано, в первую очередь, со скоростью вытягивания слитка, которая при литье цветных металлов весьма низкая, что сказывается на

The article considers one of the ways of increasing the efficiency of induction devices acting on crystalline metals. Analysis of electromagnetic, thermal and hydrodynamic fields was carried with account for the changes in electrical conductivity depending on the temperature and aggregate state of the ingot. The obtained numerical results made it possible to obtain a uniform distribution of the magnetic flux density at the liquid metal core surface and increase the blending rate of the liquid metal.

Keywords: traveling magnetic field; electromagnetic stirring; crystallization; shielding effect; numerical analysis

глубине лунки жидкой фазы и формы застывающего металла в объеме кристаллизатора скольжения.

Идея ЭМП не нова. В работе [1] приводится некоторое обобщение по применению таких устройств при кристаллизации. Необходимо отметить, что описанные устройства ЭМП были выполнены в промышленном варианте, и было установлено, что необходимо поддерживать жидкий металл в движении для улучшения качества литой структуры.

Анализ способов размещения устройств ЭМП относительно кристаллизатора скольжения приведен в работе [2], где подчеркивается, что определенной проблемой

является экранизирующее действие гильзы и корпуса кристаллизатора и относительно большой зазор между индуктором ЭМП и жидкой фазой слитка в кристаллизаторе.

Экспериментальные исследования физических моделей, полупромышленных и промышленных образцов устройств ЭМП показывают, что существует ряд факторов оказывающих влияние на образование структуры слитка [3-8]:

- направление бегущего магнитного поля относительно направления вытягивания слитка;

- схемы включения катушек обмотки устройства ЭМП, определяющих распределение нормальной и аксиальной составляющих индукции в рабочей зоне;

- частоты питания сети, определяющие синхронную скорость бегущего магнитного поля;

- величина зазора между устройством ЭМП и жидкой фазой слитка.

Экспериментальные оценки на начальных образцах устройств ЭМП не позволяют оценить, как ведет себя электромагнитное поле на границе «жидкая и твердая фазы» кристаллизующегося слитка.

Ориентировочная оценка на натуральных образцах затухающего электромагнитного поля с «размазанной по затору электропроводностью» [9] не дает достаточно точного ответа на поставленный вопрос.

Анализ математических моделей с применением численного расчета дает возможность решать полевые гидродинамические и тепловые задачи в зоне границы фазового перехода слитка.

В работе приводятся результаты исследования математической модели с применением пакета Comsol Multiphysics при условии, что индукция магнитного поля неизменна по всей длине границы «жидкая и твердая фаза». Это возможно реализовать увеличением линейной нагрузки по пазовым делениям индуктора ЭМП (сверху вниз), за счет увеличения расчетной плотности тока в пазах.

Анализ проводился с помощью численной модели, созданной в Comsol Multyphysics. Модель представляет собой совместное

решение электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач с учетом фазового перехода методом конечных элементов. Алгоритм взаимосвязи задач представлен на рис. 1. Разработанная ранее математическая модель показала хорошие результаты решения электромагнитной задачи, подтвержденные экспериментально [3, 8, 10]. Однако гидродинамические течения, вызванные воздействием переменного магнитного поля, имеют явно выраженный турбулентный характер [10, 11]. Таким образом, расчет течений жидкого металла был улучшен путем использования $k - \omega$ модели турбулентности.

Электромагнитный перемешиватель представляет собой цилиндрическую индукционную машину со схемой соединений обмотки AAZZBBXXCCYY (рис. 2), медные катушки которой уложены в 12 пазов магнитопровода и генерируют бегущее электромагнитное поле, направленное вверх относительно направления вытягивания слитка. В электропроводной жидкой фазе слитка наводится вихревой ток, взаимодействие этих токов с магнитным полем индуктора порождают электромагнитные усилия. Жидкий металл под действием этих объемных сил начинает движения и циркуляцию в замкнутом объеме.

Задача решалась в осесимметричной постановке и в частотной области. Электропроводность слитка была задана функцией представленной на рис. 3. Ступенчатый характер функции описывает плавление алюминиевого слитка при температуре 660°C.

Оценим уровень индукции на границе жидкая – твердая фаза кристаллизующегося слитка. При затвердевании расплава в кристаллизаторе скольжения жидкая фаза имеет форму усеченного конуса и, следовательно, по высоте кристаллизатора затвердевший металл будет иметь форму цилиндра с обратным конусом по отношению к лунке жидкого металла. Помимо естественного затухания электромагнитного поля, будет иметь место экранирующее действие закристаллизовавшейся части металла.

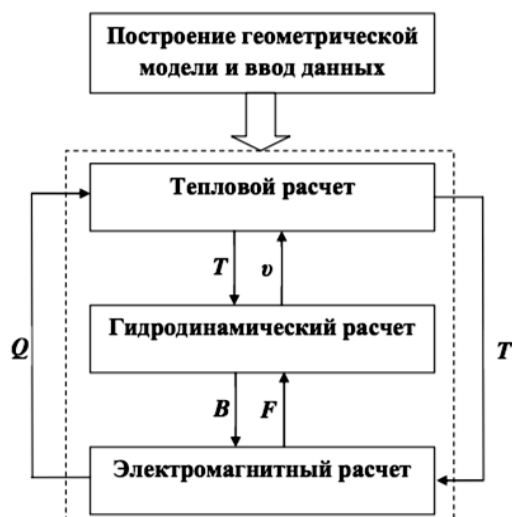


Рис. 1. Схема расчета: T – температурное поле; v – поле скоростей; B – доля жидкой фазы; F – усилия; Q – количество теплоты

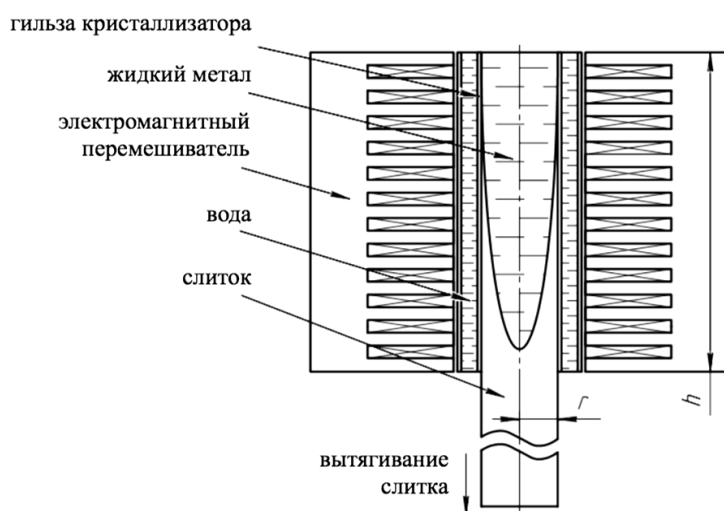


Рис. 2. Устройство ЭМП с кристаллизующимся слитком

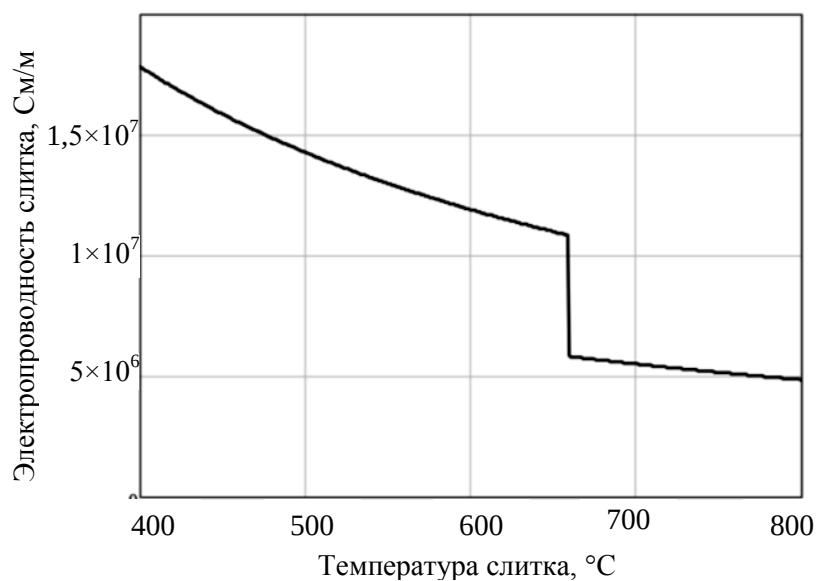


Рис. 3. Зависимость удельной электропроводности алюминиевого слитка от температуры

На рис. 4 представлена удельная электропроводность кристаллизующегося слитка. Наглядно продемонстрировано, что расплав, находящийся в центральной области слитка, имеет форму лунки. Электропроводность жидкой фазы меньше уже закристаллизовавшегося металла по бокам и в нижней части слитка. Более того, слой затвердевшего металла по бокам нижней части лунки имеет большую толщину, и величина магнитной индукции в нижней части лунки будет значительно снижена. Представляет интерес распределение электромагнитного поля и поля электромагнитных сил при создании условий, когда на границе жидкой и твердой фаз магнитная индукция будет одинакова.

Для устранения вышеописанного эффекта предлагаются 2 варианта пропорционального увеличения тока в нижних пазах индуктора в соответствии с табл. 1, чтобы значение магнитной индукции значительно не изменялось на всей поверхности жидкого металла.

Для рассматриваемых случаев на рис. 5 а приведены графики распределения магнитной индукции по границе фронта кристал-

лизации. Как видно из кривой 1, имеет место сильный экранирующий эффект в нижней части лунки, значение индукции уменьшилось в 2 раза относительно величины индукции в верхней области ($x > 0,1$).

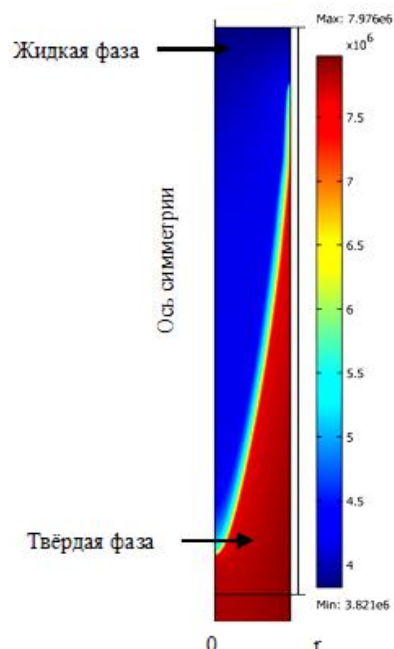


Рис. 4. Удельная электропроводность слитка, Ом/м

Таблица 1

Распределение тока по пазам индуктора в предлагаемых вариантах

Номер паза	Сила тока в пазах индуктора		
	Равномерное распределение линейной нагрузки	вариант № 1	вариант № 2
1	$I_{ном}$	$I_{ном}$	$I_{ном}$
2	$I_{ном}$	$I_{ном}$	$I_{ном}$
3	$I_{ном}$	$I_{ном}$	$I_{ном}$
4	$I_{ном}$	$I_{ном}$	$I_{ном}$
5	$I_{ном}$	$1,036 \cdot I_{ном}$	$I_{ном}$
6	$I_{ном}$	$1,125 \cdot I_{ном}$	$1,125 \cdot I_{ном}$
7	$I_{ном}$	$1,188 \cdot I_{ном}$	$1,25 \cdot I_{ном}$
8	$I_{ном}$	$1,25 \cdot I_{ном}$	$1,375 \cdot I_{ном}$
9	$I_{ном}$	$1,313 \cdot I_{ном}$	$1,5 \cdot I_{ном}$
10	$I_{ном}$	$1,375 \cdot I_{ном}$	$1,75 \cdot I_{ном}$
11	$I_{ном}$	$1,438 \cdot I_{ном}$	$1,875 \cdot I_{ном}$
12	$I_{ном}$	$1,5 \cdot I_{ном}$	$2 \cdot I_{ном}$

Как следствие, изменится и наведенное поле скоростей в жидкой фазе слитка (рис. 6), а оценка увеличения скорости у фронта кристаллизации приведена на рис. 7, из которой видно, что в нижней, глубинной части лунки можно развивать

скорость до двух раз выше в случае неравномерной линейной нагрузки ЭМП. Это играет немаловажную роль, потому что на конечную структуру влияет именно скорость движения металла непосредственно у фронта кристаллизации.

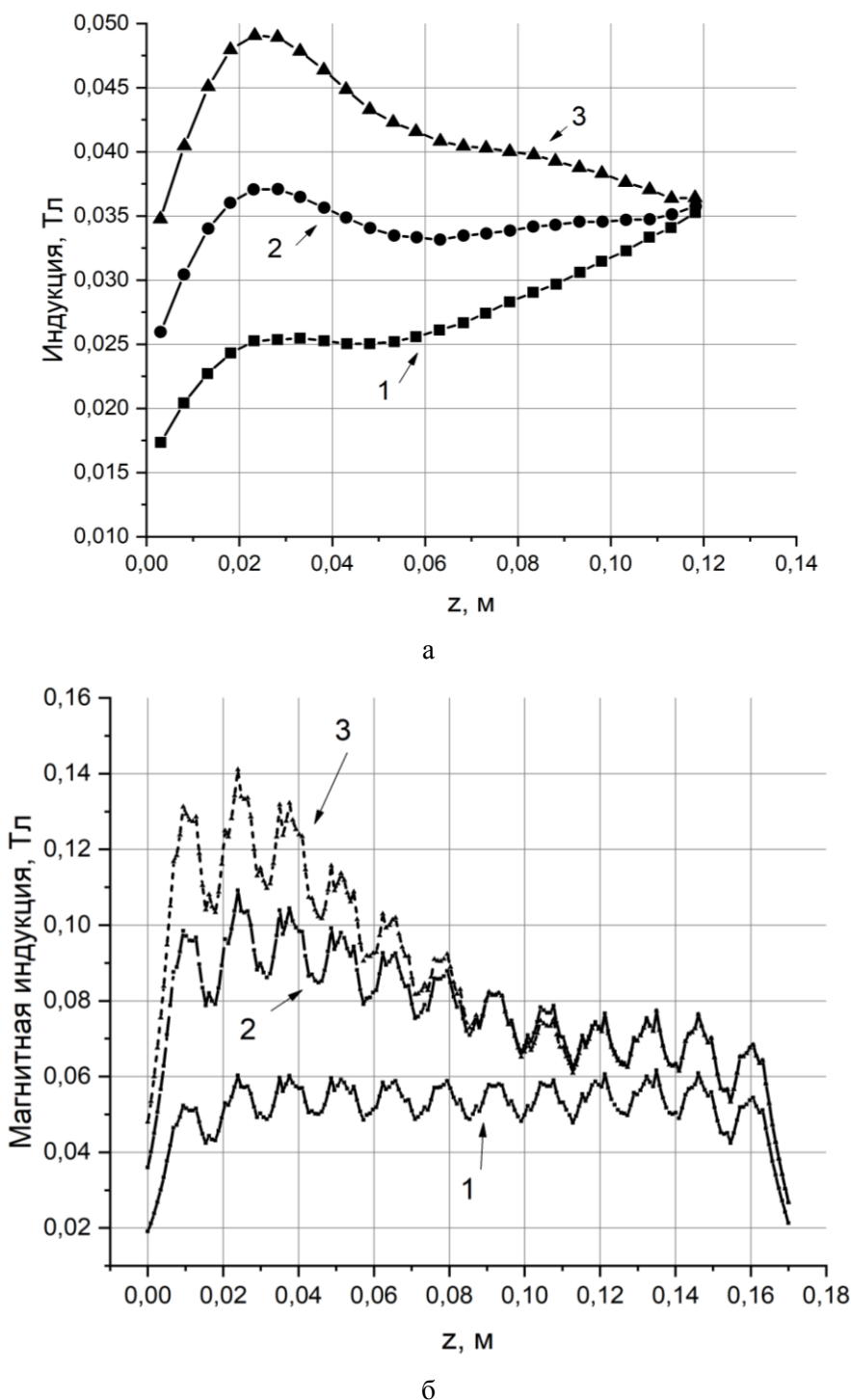


Рис. 5. Распределения магнитной индукции: *а* – по фронту кристаллизации; *б* – в зазоре на расстоянии 4 мм от ЭМП (1 – стандартное распределение тока в пазах индуктора; 2 – предлагаемый вариант № 1; 3 – предлагаемый вариант № 2; *z* – аксиальный размер индуктора и фронта кристаллизации)

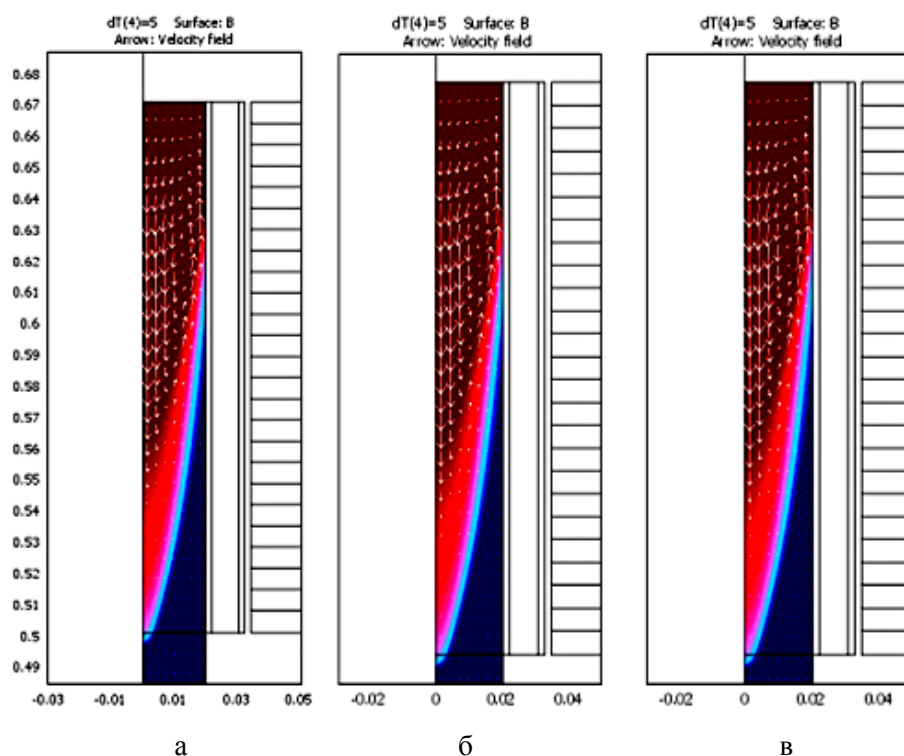


Рис. 6. Поле скоростей в жидкой фазе слитка при различных распределениях тока в пазах индуктора: а – стандартное распределение тока в пазах индуктора; б – предлагаемый вариант № 1; в – предлагаемый вариант № 2

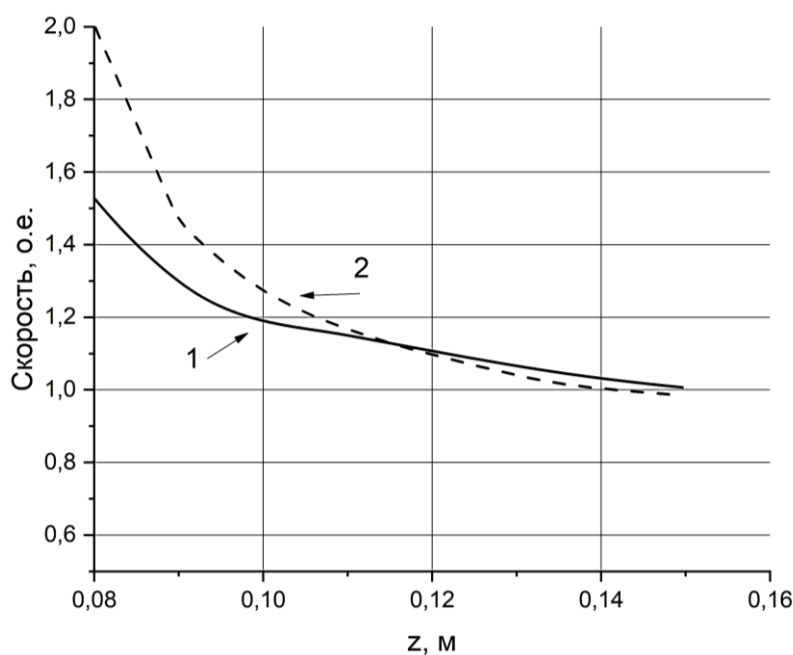


Рис. 7. Относительная величина скорости жидкой фазы слитка у фронта кристаллизации относительно ЭМП с равномерной линейной нагрузкой (1 – предлагаемый вариант № 1; 2 – предлагаемый вариант № 2)

Итак, данное исследование подтвердило предположения о возможности повышения эффективности ЭМП кристаллизующегося слитка. Так, объемная скорость увеличилась

на 2,8 и 3,4%, а полный ток индуктора – на 18,8 и 32,1% соответственно. Однако, заметим, имеет место достаточно большое потребление энергии.

1. **Германн Э.** Непрерывное литье / Э. Германн. М.: Металлургиздат, 1961. 815 с.
2. **Ефимов В.А.** Специальные способы литья / В.А. Ефимов. М.: Машиностроение, 1991. 436 с.
3. Simulation of continuous casting process with electromagnetic influence to the ingot liquid phase / E.L. Shvidkiy, B.A. Sokunov, I.A. Uskov, I.A. Smolyanov // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016, P. 685-688.
4. **Сидоров О.Ю.** Динамика теплообмена при затвердевании металлического расплава в бегущем электромагнитном поле / О.Ю. Сидоров, С.Ф. Сарапулов, Б.А. Сокунов // Промышленная энергетика. 2015. № 7. С. 7-11.
5. Электромагнитный модификатор структуры алюминиевого слитка для роторной литейной машины / В.Н. Тимофеев, А.А. Авдулов, С.А. Бояков и др. // Электротехнология. 2015. № 2. С. 25-31.
6. Математическая модель и численное моделирование процесса литья и кристаллизации алюминия в магнитном поле с учетом свободной поверхности / А.В. Минаков, М.В. Первухин, Д.В. Платонов, М.Ю. Хацаюк // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55. № 12. С. 2094.
7. Формирование структуры и свойств алюминиевых слитков в условиях магнито-гидродинамического воздействия / С.Ю. Хрипченко, В.М. Долгих, С.А. Денисов, И.В. Колесниченко, Л.В. Никулин // Цветные металлы. 2013. № 4 (844). С. 70-73.
8. **Швыдкий Е.Л.** Обзор современных математических моделей процесса электромагнитного воздействия на жидкую фазу кристаллизующего слитка / Е.Л. Швыдкий, И.А. Усков, К.Ю. Бодрова // ЭКСИЭ'05. 2016. С. 118-121.
9. **Вольдек А.И.** Индукционные магнито-гидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А.И. Вольдек. Л.: Энергия, 1970. 272 с.
10. **Швыдкий Е.Л.** Моделирование процесса непрерывного литья с электромагнитным воздействием на жидкую фазу слитка / Е.Л. Швыдкий, Б.А. Сокунов, В.А. Дмитриевский // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. Т. 1. С. 244-249.
11. Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field: Part I. Implementation and verification of model / S. Spitans, A. Jakovics, E. Baake, B. Nacke // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2013. № 44 (3). P. 593-605.

Швыдкий Евгений Леонидович – аспирант Уральского федерального университета

Сокунов Борис Александрович – кандидат технических наук, доцент Уральского федерального университета

Бычков Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент Уральского федерального университета

Соколов Игорь Владимирович – аспирант Уральского федерального университета

Evgeny L. Shvidkiy – Postgraduate, Ural Federal University

Boris A. Sokunov – PhD, Associate Professor, Ural Federal University

Sergei A. Bichkov – PhD, Associate Professor, Ural Federal University

Igor V. Sokolov – Postgraduate, Ural Federal University

Статья поступила в редакцию 03.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕТОДИЧЕСКИХ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский

ELECTRIC DRIVES OF CONTINUOUS MICROWAVE ELECTRIC HEATERS

V.O. Yudina, Yu.S. Arkhangelskiy

Описаны основные требования, предъявляемые при выборе электродвигателя транспортных систем методических СВЧ электротермических установок/

Ключевые слова: методическая СВЧ электротермическая установка, электропривод, электродвигатель, электрический преобразователь, обрабатываемый объект, передаточное устройство, регулирование

Методические СВЧ электротермические установки (СВЧ ЭТУ) при прочих равных условиях выгодно отличаются от периодических СВЧ ЭТУ большей производительностью из-за отсутствия затрат времени на периодические загрузки и выгрузки обрабатываемого диэлектрика. Характерным элементом методической СВЧ ЭТУ является транспортная система, обеспечивающей перемещение нагреваемого объекта внутри рабочей камеры. Транспортная система состоит из входного и выходного шлюзов, транспортного канала, являющимися составными элементами рабочей камеры, и электропривода, обеспечивающего движение обрабатываемого объекта по транспортному каналу.

Из многочисленных вариантов транспортных систем, используемых в электротермии, в СВЧ ЭТУ обычно используются толкательные, протяжные, конвейерные, барабанные и гидравлические системы [1]. При проектировании СВЧ ЭТУ габариты транспортного канала рассчитываются в рамках решения задачи синтеза рабочей камеры, шлюзы транспортной системы раз-

The article describes the main requirements in selecting electric drives of the transport systems for continuous microwave electric heaters.

Keywords: continuous microwave electric heater, electric drive, electric motor, electric converter, processed unit, transfer device, regulation

рабатываются экспериментально. Что касается электропривода, то в работах по СВЧ электротермии (СВЧ диэлектрическому нагреву) сведения о нем практически отсутствуют.

Электропривод – это высокотехнологичная автоматизированная электромеханическая система, состоящая из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительные органы рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса, а в нашем случае – для перемещения обрабатываемого объекта внутри рабочей камеры методической СВЧ ЭТУ (рис. 1). На структурной схеме электрического привода показан электрический преобразователь (эл. преобразователь), он предназначен для преобразования электрической энергии сети в регулируемое

напряжение постоянного или переменного тока. Электродвигатель (ЭД) преобразовывает электрическую энергию в механическую энергию, кроме классических двигателей вращательного движения, могут использоваться линейные двигатели, подвижная часть которых движется линейно. Передаточное устройство (ПУ) необходимо для передачи механической энергии от электродвигателя к рабочему органу (РО),

преобразования видов движения, согласования скоростей, моментов, усилий, это может быть редуктор, электромагнитная муфта, ременная передача и другое. Рабочий орган непосредственно выполняет полезную работу, а именно перемещение обрабатываемого объекта, это может быть толкатель, конвейер, насос или барабан в зависимости от вида транспортной системы методической СВЧ ЭТУ.

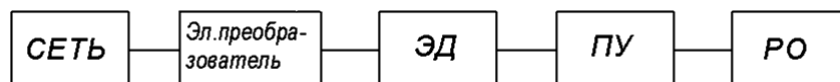


Рис. 1. Структурная схема электропривода: ЭД – электродвигатель; ПУ – передаточное устройство; РО – рабочий орган

Особенностями современного электропривода являются:

- широкое использование полупроводниковых преобразователей энергии для регулирования скорости электроприводов;
- применение микропроцессорных контроллеров для реализации задач управления электроприводами.

При выборе электродвигателей и способов регулирования для методических СВЧ ЭТУ, нужно учитывать ряд технических требований. Основными из них являются: плавность и диапазон регулирования, простота и надежность управления, стабильность скорости.

Применение двигателей недостаточной мощности ведет к уменьшению производительности механизма, выходу из строя двигателя. Использование завышенной мощности приводит к увеличению затрат, снижению электрических показателей электропривода, уменьшению КПД в двигателях постоянного и переменного тока, ухудшению коэффициента мощности.

Для электропривода производственного механизма следует выбирать наиболее простой двигатель по устройству и управлению, надежный в эксплуатации, имеющий наименьшую массу, габариты, стоимость. Выбирая тип двигателя в зависимости от мощности механизмов и характера нагрузки, нужно руководствоваться следующими данными. При длительной постоянной и

переменной нагрузках мощностью до 100 кВт наиболее экономичны асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором [2]. При выборе мощности ЭД исходными являются условия нагрева и мгновенная перегрузочная способность

$$\lambda_{\mu} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}},$$

где λ_{μ} – перегрузочная способность двигателя; $M_{\max}$, $M_{\text{ном}}$ – максимальный и номинальный моменты электродвигателя.

Для асинхронных двигателей перегрузочная способность может быть ограничена критическим моментом $M_{\text{кр}}$ и для двигателей длительного режима работы устанавливается равной 1,7÷2,2. Номинальная мощность ЭД определяется допустимой температурой нагрева обмоток, зависящей от применяемого класса изоляции. Срок службы изоляции в условиях нормальной эксплуатации принимают равным 15÷20 годам. В работах [3-7] подробно рассказывается о расчете мощности электродвигателей транспортных систем методических СВЧ установок.

При повторно-кратковременной и кратковременной нагрузках используют чаще всего асинхронные двигатели с повышенным скольжением.

Технико-экономические расчеты и практический опыт показывают, что в большинстве случаев наиболее экономичны

двигатели с частотой вращения 1500 об/мин. Число таких двигателей в сельском хозяйстве превышает 90%.

Диапазон температуры окружающей среды, где может быть установлен привод, довольно широк и составляет от минус 40°C до плюс 50°C.

Степень защиты от пыли – пылезащищенное, так как возможно некоторое попадание пыли вовнутрь, однако это не нарушает работу устройства. Степень защиты

от влаги – защита от брызг, вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на работу двигателя.

Исходя из данных требований наиболее подходящим для СВЧ ЭТУ будет трехфазный асинхронный двигатель на базе серии 5А, степень защиты IP54, климатическое исполнение и категория размещения У2, режим работы – продолжительный (S1).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Юдина В.О.** Транспортные системы СВЧ электротермических установок, работающих в методическом режиме / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 3 (12). С. 10-13.

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

3. **Онищенко Г.Б.** Электрический привод / Г.Б. Онищенко. М.: Изд. центр «Академия», 2006.

4. **Юдина В.О.** Конвейерные СВЧ электротехнологические установки на базе камеры лучевого типа / В.О. Юдина,

Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 5-7.

5. **Архангельский, Ю.С.** Толкательная СВЧ электротермическая установка на базе камеры с бегущей волной / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 14-19.

6. **Юдина В.О.** СВЧ электротермические установки для термообработки жидкости в потоке / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2016. № 2 (11). С. 8-13.

7. **Юдина В.О.** Барабанные СВЧ электротермические установки / В.О. Юдина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2 (15). С. 25-29.

Юдина Виолетта Олеговна – 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.

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

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

Статья поступила в редакцию 26.02.18, принята к опубликованию 28.03.18

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 681. 171. 5

СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВОЙ ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТЕПЛОВОЗА СЕРИИ 2ТЭ116У

И.А. Менщиков

DIAGNOSTICS SYSTEM FOR THE POWER CONTROL CIRCUIT IN THE MAINLINE LOCOMOTIVE SERIES 2ТЭ116У

I.A. Menshikov

Приведены результаты оценки технического состояния цепи управления магистрального тепловоза серии 2ТЭ116У с тяговым электроприводом постоянного тока типа ЭД-118А. Повышение эксплуатационной надежности электрооборудования электромеханических транспортных систем во многом обеспечивается внедрением современных средств автоматизированного контроля и технической диагностики силовых цепей управления. Одной из существенных задач построения автоматизированной системы диагностики технического состояния силовой цепи управления магистрального грузового тепловоза серии 2ТЭ116У является выбор информативных диагностических параметров. Выбор наиболее информационных диагностических параметров контроля технического состояния силовой цепи управления предложено проводить с помощью параметрического моделирования и табличных методов выбора параметров. С помощью параметрической модели цепи управления тепловоза 2ТЭ116У были получены энергетические диагностические параметры, с помощью которых можно непрерывно контролировать наличие неисправностей и отказов контакторов, вспомогательных электрических машин в силовых цепях управления дизелем тепловоза.

Ключевые слова: магистральный тепловоз, силовая цепь управления, техническая диагностика

The assessment results of the technical condition relating the control circuit of the mainline locomotive series 2ТЭ116У with the DC traction electric drive ED-118A are presented. An increase in operational reliability of electric equipment of electromechanical transport systems is to a large extent provided through introducing advanced means of automated control and technical diagnostics of the power control chains. A key objective in developing an automated diagnostics system for the technical condition of a power control chain to the main cargo locomotive of the 2ТЭ116У series is the choice of information-based diagnosing parameters. The choice of the most information-bearing diagnostic parameters to control the technical conditions of the power control circuit can be made using parametric modeling and tabular methods for the choice of parameters.

Using the parametric model of the locomotive control circuit 2ТЭ116У, we obtained the energy diagnostics parameters which help to continuously monitor the faults and failures in contactors, auxiliary electric machines in the power control circuits of diesel locomotives.

Keywords: main locomotive, power control circuit, technical diagnostics

Магистральный двухсекционный тепловоз 2ТЭ116 мощностью 2×3060 л.с., предназначенный для грузовой службы на железных дорогах России, сконструирован Ворошиловградским тепловозостроительным заводом (ныне Луганским) в содружестве с заводами: тепловозостроительным им. Куйбышева (г. Коломна), транспортно-

го машиностроения им. Малышева, Электротяжмаш им. Ленина, «Электромашина» (г. Харьков) и отраслевыми институтами тепловозостроения (ВНИТИ) и Министерства путей сообщения ЦНИИ МПС (ныне ВНИИЖТ).

Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ116У представлен рис. 1.



Рис. 1. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ116У

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

Сочетание в системе распознавания алгебраических методов и параметрических моделей обеспечивает единство обработки первоначального описания, принятого в системе распознавания образов.

При использовании только математических методов описания объекта диагностирования с помощью дифференциальных уравнений и набора взаимосвязанных линейных и нелинейных звеньев в процессе диагностирования возникают трудности, связанные с различием, дифференцированием состояний объектов и локализацией неисправностей. Эти методы не дают воз-

можности проводить различительный анализ событий.

В качестве подходящего математического аппарата моделирования целесообразно использовать аппарат, базирующийся на понятиях теории графов с рассмотрением отношений на множестве свойств функционирования объекта контроля, на множестве его параметров либо на множестве функциональных элементов [1-3].

Для выбора минимального числа диагностических параметров, достаточного для контроля исправности электрооборудования или размещения контрольных точек, необходимо составить блочную функциональную модель, блоки которой имеют входные и выходные связи.

Представим эту схему управления в виде ориентированного графа (рис. 2), вершины которого есть элементы и по своему физическому смыслу представляют диагностические параметры. Теория графов позволяет минимизировать эту совокупность параметров.

Для построения параметрической модели цепи управления тепловоза 2ТЭ116У как сложного объекта контроля на первом этапе выберем наиболее общие свойства функционирования, которые затем свяжем в единую систему [4, 5].

В процессе функционирования цепи управления под воздействием различных

факторов изменяются её параметры, что может привести к нарушению изоляции электрических цепей, следовательно, процесс изменения свойств изоляции электрической цепи можно рассматривать как динамическую систему.

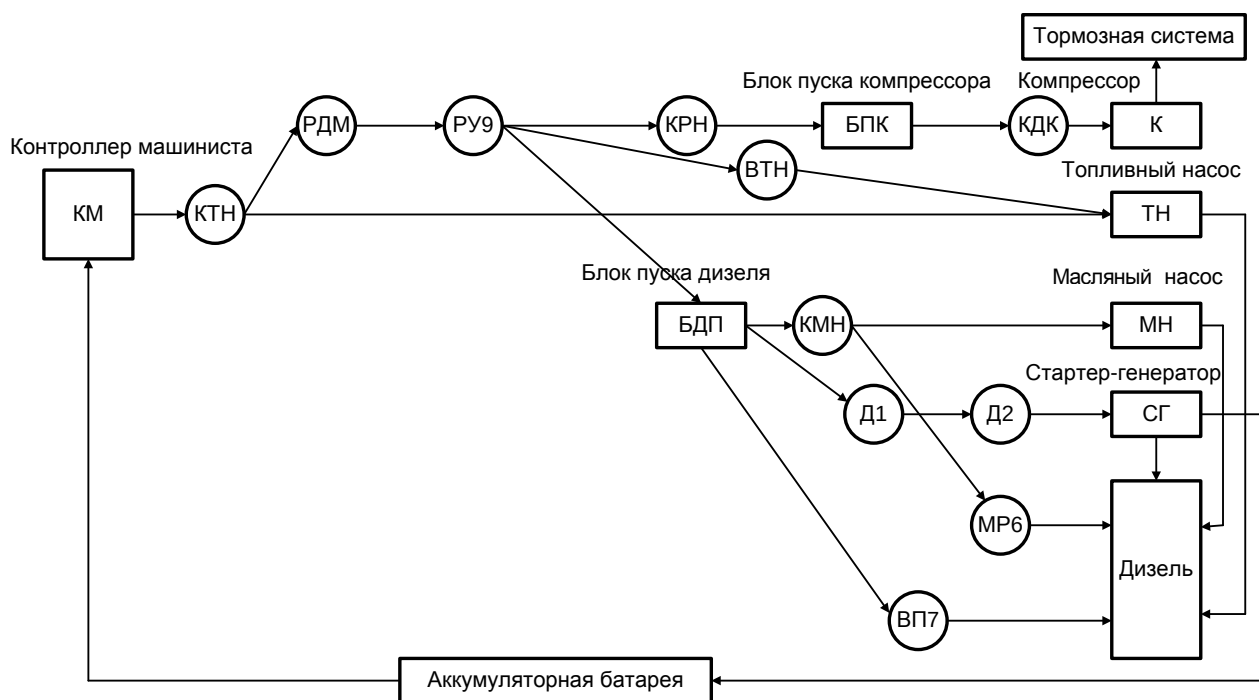


Рис. 2. Функциональная схема цепи управления тепловоза 2ТЭ116У

Первоначальная параметрическая модель является основой для построения конкретизированной первичной модели, которая получается путем дополнения модели множеством параметров функционирования цепи управления и определяющих тем самым интенсивность и характер различных неисправностей.

Список возможных основных дефектов сформулирован по данным статистики отказов и на основании анализа влияния различных факторов на состояние тягового электропривода. Совокупность элементов такой статистики образует множество дефектов $D = (d_1, \dots, d_p)$, подлежащих распознаванию.

Параметрическая модель цепи управления тепловоза 2ТЭ116У в пространстве параметров содержит множество вершин

S , обусловленных замыканием $\{M\}$ множества внутренних параметров.

Операция замыкания множества M обуславливает наличие в параметрической модели параметров других объектов и параметров внешней среды [6].

В вершины параметрической модели могут попасть параметры, не обладающие достаточной информативностью относительно дефектов. Поэтому их следует исключить из дальнейшего рассмотрения, то есть удалить некоторые вершины. В результате получается рабочая параметрическая модель (рис. 3).

Рабочая параметрическая модель элементов цепи управления представляет собой объединение компонентов достижимости вершин S_i структурных параметров, соединяющих эту вершину с другими вершинами графа.

упрощения повторяются до тех пор, пока простая параметрическая модель не поддается дальнейшему упрощению. Затем в

конфигурации параметрической модели находят те вершины, в которые дуги только входят.

Состояние параметров модели определяющих техническое состояние цепи управления тепловоза 2ТЭ116У

S _{ij}	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	ТН	МН	К	СГ	Диз	ΣS	D
S1	X	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	Д:2,ТН
S2	0	X	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	Д:1,3
S3	1	0	X	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	Д:2,4,5,6
S4	1	1	1	X	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3	Д:7,9,10
S5	1	1	0	1	X	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	Д:3,8
S6	1	1	0	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	Д:3, ТН
S7	1	1	1	1	1	1	X	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	Д:12,МН
S8	1	1	1	1	1	1	1	X	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	Д:13
S9	1	1	1	1	1	1	1	1	X	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Д:11
S10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	0	1	Д:Диз
S11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	X	1	1	1	1	1	0	1	1	Д:СГ
S12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	X	1	1	1	1	1	0	1	Д:Диз
S13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	X	1	1	0	1	1	1	Д:К

После минимизации совокупности параметров контроля проводится ранжировка с точки зрения выявления их эффективности.

Для этого принимаем, что состояние цепей электрооборудования характеризуется совокупностью m взаимосвязанных параметров S_i , $1 \leq i \leq m$; $P(S_i)$ – вероятность того, что все параметры модели в норме; $C(S_i)$ – стоимость проверки всех параметров в совокупности; $Q(S_i)$ – цена потерь от неполноты контроля; $\tau_d(S_i)$ – среднее время диагностирования i -го параметра [7].

Оптимизация алгоритма ранжировки с одновременной минимизацией средних затрат или среднего времени возможна на основании информационной модели.

Энтропия моделируемого объекта из $n = 21$ вершины

$$H(S) = - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i. \quad (1)$$

Потеря работоспособности или энтропии цепей электрооборудования зависит от времени эксплуатации и в каждый промежуток времени цепи электрооборудования имеет определенное состояние, а каждая из

проверок S несет информацию о работоспособности цепи управления в объеме:

$$I = \log [P(S / S_i) / P(S)], \quad (2)$$

где $P(S)$ – априорная вероятность пребывания тягового электропривода в работоспособном состоянии;

$$P(S / S_i) = \frac{P(S) \cdot P(S_i / S)}{P(S) \cdot P(S_i / S) + P(0) \cdot P(S_i / 0)}.$$

Здесь $P(S_i / S)$ – условная вероятность того, что S работоспособна; $P(0) = 1 - P(S)$ – вероятность отказа параметра.

Если принять, что погрешности в системе диагностирования отсутствуют, тогда $P(S_i / S) = 1$ и соответственно условная вероятность пребывания цепи управления в исправном состоянии будет составлять

$$P(S / S_i) = \frac{P(S)}{P(S) + P(0) - P(0) \cdot P(S_i / 0)}. \quad (3)$$

Тогда

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{1 - P(0) \cdot P(S_i / 0)} \right). \quad (4)$$

Учитывая, что для сопоставления должно быть проведено n проверок,

функция предпочтения проверок по $\max$ принимает вид

$$I_{\max} = \left[\sum_{i=1}^n P(0) \cdot P(S_i / 0) \right]. \quad (5)$$

Из матрицы состояний следует, что $\max[P_i(0) \cdot P(S_i / 0)]$ соответствует максимальному числу нулей в соответствующей строке, то есть выражению

$$\max = \sum P_i(0) \leq 0_i. \quad (6)$$

Если вероятности состояний отдельных параметров оказываются неизвестными, то функция предпочтения упрощается и предпочтение отдается тому параметру, в строке которого больше нулей.

Процедура выбора совокупностей контролируемых параметров для автоматизации контроля технического состояния цепей электрооборудования заключается в анализе матрицы (таблицы) состояний, в которой столбцы соответствуют возможным состояниям системы S_j , а строки – всем возможным влияниям внутренних параметров на состояние системы.

Для каждой строки матрицы вычисляется функция предпочтения W и выбирается та, в которой $W \rightarrow \max$.

Для автоматизации контроля технического состояния цепи управления выбира-

ются наиболее информативные параметры, то есть параметры, в максимальной степени уменьшающие остаточную неопределенность на каждом шаге выбора. Процесс заканчивается, когда остаточная энтропия становится равной нулю.

В результате анализа таблицы состояния параметров по максимальным значениям функции предпочтения W выявлены следующие параметры контроля работоспособности цепи управления тепловоза серии 2ТЭ116У: неисправность РДН (D2) в цепи компрессора К; неисправность КТН (D1), неисправность РУ9 (D3) в цепи блока пуска дизеля; неисправность РДМ, БДП, КРН, ВТН (D2, D4, D5, D6) в цепи пуска компрессор и топливного насоса; неисправность ВТН, Д1, ВП7 (D7, D9, D10,) в цепи пуска масляного насоса, стартера-генератора, дизеля.

Для автоматизации контроля технического состояния цепи управления необходимо разработать автоматизированную систему технической диагностики.

На рис. 4 показана принципиальная схема устройства диагностирования цепи управления стартер-генератором тепловоза 2ТЭ116У, выполненного на интегральных микросхемах, что позволяет состыковывание с микропроцессорными устройствами.

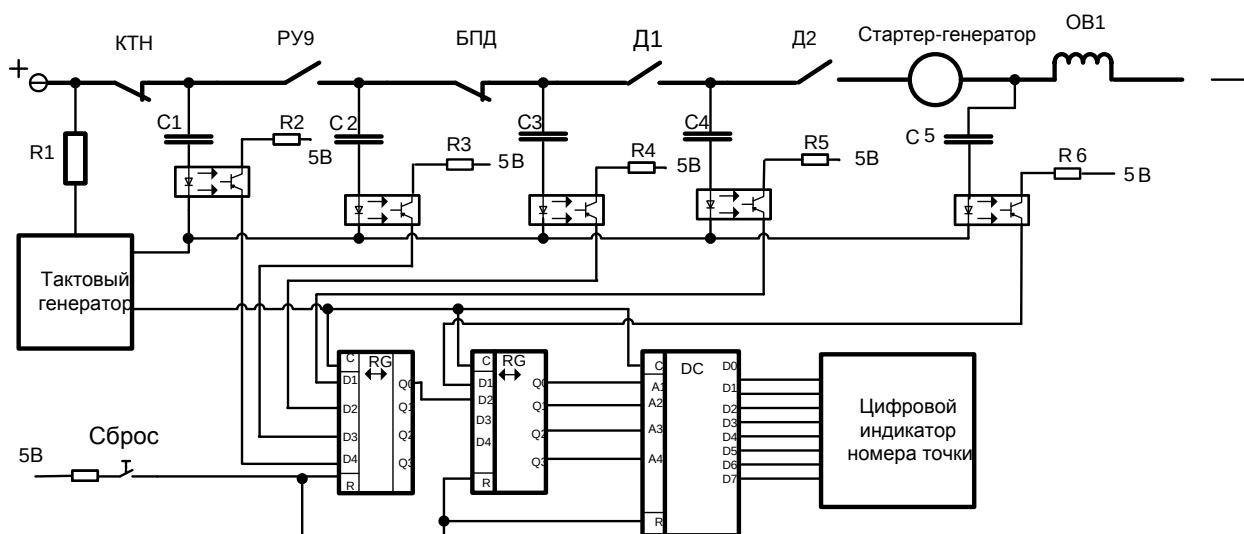


Рис. 4. Принципиальная схема прибора диагностирования цепи управления стартер-генератором тепловоза 2ТЭ116У

Устройство диагностики цепи управления стартер-генератором состоит из генератора тактовых импульсов на логических микросхемах, регистров, дешифратора и схемы индикации. Конденсаторы С1-С6 исключают взаимное влияние цепи управления и прибора диагностирования. Алгоритм диагностирования должен обеспечивать строгую очерёдность срабатывания тех или иных электрических аппаратов.

Для отыскания неисправности в диагностируемой цепи прибор приводится в рабочее состояние, выбирается нужный блок и посылается тестовый сигнал. Сигнал в виде одиночных импульсов с генератора тактовых импульсов амплитудой 5 В, пройдя через замкнутые контакты, разделительные конденсаторы С1-С6, поступает на входы регистров. Регистры запоминают кодовую последовательность поступающих импуль-

сов и выходной сигнал с выхода Q, запускается дешифратор и цифровой индикатор. Считывание точек идёт параллельно с прохождением тестового сигнала по диагностируемой цепи. В случае отсутствия электрического контакта в цепи индикатор высвечивает номер этой контрольной точки.

Если в проверяемой цепи окажется более двух отказов, то после устранения первого отказа устройство возвращают в исходную позицию, нажимают кнопку «Сброс», происходит повторный обход контрольных точек до отыскания второго отказа. Проверяется качество устранения первого отказа и последующих.

Контрольные точки диагностируемой цепи соединяют с прибором разъёмами, что даёт возможность использовать прибор для контроля сопротивления изоляции электрических проводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Калявин В.П.** Основы теории надежности и диагностики / В.П. Калявин. СПб.: Элмор, 1998. 172 с.

2. **Волков А.К.** Повышение эксплуатационной надёжности тяговых двигателей / А.К. Волков, А.Г. Суворов. М.: Транспорт, 1988. 128 с.

3. **Гольдберг О.Д.** Надёжность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. М.: Академия, 2010. 288 с.

4. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2006. 757 с.

5. **Уидроу Б.** Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз. М.: Радио и связь, 1982.

6. **Степанов А.В.** Методы компьютерной обработки сигналов систем радиосвязи / А.В. Степанов, С.А. Матвеев. М.: СОЛОН-Пресс, 2003.

7. **Сапожников В.В.** Основы технической диагностики / В.В. Сапожников, В.В. Сапожников. М.: Маршрут, 2004. 318 с.

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

Igor A. Menshikov – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Power supplies of industrial enterprises, Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 15.03.17, принята к опубликованию 28.03.18

УДК 681.171.5

АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ПРИВОД В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В.М. Голубцов

ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVES IN OPERATION AND MODERNIZATION OF DOMESTIC ELECTRIC LOCOMOTIVES

V.M. Golubtsov

Рассматриваются вопросы применения и эксплуатации бесколлекторных электродвигателей в составе тяговых приводов отечественных электровозов. В процессе работы электровоза переходные режимы, связанные с разгоном и замедлением, должны учитывать эквивалентный момент инерции в уравнении движения поезда. Различия в массогабаритных характеристиках и, в особенности, передаточных числах электроприводов влияют на динамику поезда.

Ключевые слова: бесколлекторные тяговые двигатели, мощность НТА-1200, тяговые характеристики, регулирование асинхронного тягового привода, максимальная частота выходного преобразователя, диапазоны сил тяги и скорости, электротехническая сталь, зубцовый слой, лобовые части обмоток, эквивалентная масса

Бесколлекторные тяговые двигатели НТА-1200 за счет большей осевой мощности позволяют увеличить конструкционные скорости электровоза и обеспечивать необходимую силу тяги во всем диапазоне скоростей вплоть до конструкционной. Технические возможности подвижного состава обеспечиваются заложенными тяговыми характеристиками для скоростей от 0 до 160 км/ч, имеющими ограничения по сцеплению $F_1 = 500$ кН и по току $F_2 = 375$ кН для часового или длительного режима. При создании пассажирских электровозов с конструкционной скоростью до 160-200 км/ч принимаются следующие технические решения: на электровозах с кон-

The article is devoted to the usage and maintenance of commutatorless electric motors in the traction drives of domestic electric locomotives. When in operation, the locomotive transient modes associated with acceleration and deceleration should take into account the equivalent inertia point in the equation relating the motion of the train. The differences in the mass and size characteristics, and in particular the transfer numbers of electric drives, affect the dynamics of the train.

Keywords: commutatorless traction motor, power NTA-1200, traction characteristics, regulation of asynchronous Traction drives, maximum frequency converter output, traction force and speed dimensions, electrical steel, branch layer, frontal part of the winding, equivalent weight

струкционной скоростью до 160 км/ч применяют бандажные колеса, на более скоростных – цельнокатаные с диаметром по среднему кругу катания $D_{\sigma} = 1250$ мм в обоих случаях.

Оговоренные технические параметры учитываются в выражениях, используемых для регулирования асинхронного тягового привода в представленных широких диапазонах сил тяги и скорости:

$$V = 1,8 \frac{D}{\mu} \omega = 0,188 \frac{D}{\mu} \frac{60 f_L}{\rho} (1 - S) \approx C_I f_L ;$$

$$F_I = \frac{2\mu}{D} M \eta_3 = C_2 M .$$

Аналогичная конструкция может быть применена как для грузовых, так и для пассажирских электровозов с максимальной скоростью до 200 км/ч.

Так как тяговый привод электровоза ЭП10, ЭП20 является унифицированным и так как он разрабатывался также для электровоза ЭП1, элементы этих машин имеют одни и те же технические решения. Существует ряд соотношений количества зубьев зубчатого колеса и шестерни: 85:23; 85:26; 85:25. Соответственно передаточные числа тяговых редукторов равны $\mu_1 = 3,69565$; $\mu_2 = 3,26923$ и $\mu_3 = 3,40000$.

Более ранними историческими примерами конструктивных отличий электровозов, применяемых в грузовом и пассажирском движении, являются различные передаточные числа серий ВЛ60. Так, для ВЛ60к и ВЛ60р передаточное число $\mu = 3,826$, а для ВЛ60пк $\mu = 2,73$. Экипажная часть ранее созданных электровозов не удовлетворяла высоким требованиям, тем более с выполненным облегчением на 4-5 т для размещения дополнительного электрического оборудования.

Естественно, что для существующих максимальных скоростей движения $V_{\max}$ и проектируемых в дальнейшем необходимо учитывать максимальную частоту $f_{1\max}$ выходного преобразователя. При неизменном числе пар полюсов p_1 , $2p_1 = 6$ для НТА-1200 другие значения $V_{\max}$, передаточного числа μ , а также диаметра бандажа по кругу катания D_6 связаны соотношением

$$f_{1\max} = \frac{p_1 \mu V_{\max}}{3,6\pi D_6}.$$

Электровоз двойного питания ЭП10 с последующей модернизацией был предназначен для эксплуатации на дорогах, электрифицированных переменным током 25 кВ, 50 Гц и постоянным током 3 кВ, рассчитан для вождения пассажирских и почтово-багажных поездов, составностью до 24 вагонов на участках дорог с уклонами до 12%, а также составностью до 20 вагонов на участках с уклонами до 16%.

Анализируя выражение для эквивалентной массы

$$m_y = m_y = \sum m_o \frac{\rho_o^2}{R_o^2} + \sum m_n \frac{\rho_n^2}{R_n^2} + \sum m_o \frac{\rho_y^2 \mu^2}{R_o^2}$$

можно учесть влияние модернизации тягового электропривода. Особенности самого асинхронного тягового привода заключаются в отсутствии массивного вращающегося коллектора и с точки зрения эквивалентной массы компенсируются увеличенными размерами обмоток ротора и другими специфическими отличиями, указанными ниже.

Основные параметры ротора

Диаметр, мм:

– наружный	634
– внутренний	390
Длина пакета, мм	285
Высота паза в штампе, мм	30,1
Ширина паза в штампе	9,3
Число пазов	88
Число проводников в пазу	1
Проводник, мм	9,0-25,0
Вентиляционные каналы: 2 ряда, 48 отверстий диаметром, мм	21
Зубцовый шаг, мм	22,6

При аналитическом расчете моментов инерции вращающихся частей необходимо определить значения радиусов инерции. Для этого рекомендуется принять следующие средние значения отношений радиусов инерции к радиусам внешних окружностей: для движущих колесных пар $\rho/r = 0,75 \dots 0,80$; для зубчатых колес – примерно 0,8; для якорей тяговых двигателей 0,65...0,75. Как видно, диапазон выбираемых значений достаточно широкий и имеет приближенный характер. Различные кинематические схемы тягового привода могут потребовать уточнения рекомендуемых соотношений. Это в большей мере относится к тяговому приводу электровоза ЭП10 с удлинненным карданным валом и полым якорем тягового двигателя и односторонней зубчатой передачей (аналогичный применяется на тепловозах, пассажирских электровозах серии ЧС).

В процессе работы при расцентровке хвостовика редуктора геометрической осью якоря удлинненный карданный вал поворачивается, и при этом меняется его эквивалентный момент инерции. Суммирование

энергии в соответствии со знаками сумм распространяется на все колесные пары, колеса и якоря тяговых двигателей, которые могут быть разных типов.

Пользуясь числовыми данными, моменты инерции отдельных элементов рассчитываются по соотношению

$$J = m_{\epsilon} \rho_{\epsilon}^2,$$

где m_{ϵ} – масса вращающихся частей; ρ_{ϵ} – радиус инерции.

Например, учет наружного и внутреннего диаметров ротора и длины его пакета электротехнической стали с учетом геометрии вертикальных каналов зубцового слоя позволяет определить массу стали спинки ротора $m_{cp} = 260$ кг, зубцового слоя $m_{zc} = 80$ кг и массу меди обмотки также 80 кг. Спинка ротора и вентиляционные каналы представляют собой пустотелые цилиндры или цилиндры, моменты инерции которых определены относительно собственных осей вращения или оси вращения ротора, причем

$$J_{\epsilon k} = \sum_{i=1}^{4\epsilon} m_{\epsilon i} \rho_{\epsilon i}^2 + \sum_{i=1}^{4\epsilon} m_{\epsilon 2} \rho_{\epsilon 2}^2.$$

Например, если известен радиус внешней окружности ротора, то расчеты по известному соотношению для радиуса инерции [1] дают расхождение только по одному этому параметру в 13...15%.

Среди других основных параметров ротора, влияющих на это соотношение: внутренний диаметр r_{ϵ} и длина пакета электротехнической стали 2412-05. Конструкция пазов ротора требует учета как массы стали, так и меди обмотки. Проводники размером 9,0×25,0 мм уложены по одному в $n = 88$ пазов. Высота паза в штампе

$h = 30,1$ мм ширина $b_n = 9,3$ мм, зубцовый шаг $b_{\text{ш}} = 22,6$ мм.

Вентиляционные каналы должны быть учтены при определении масс ротора. Диаметр канала $d_k = 21$ мм, их количество $k = 48$. Расположены они в 2 ряда. Зубцовый слой разбивается достаточно равномерно на пустоты и материал с плотностью электротехнической стали 24112-0,5, поэтому здесь рассчитывается пустотелый цилиндр половинной массы указанного материала. Проводники в пазах представлены пустотелым цилиндром относительно оси ротора с массой 80 кг. В данном случае необходимо учитывать наличие лобовых частей обмоток.

В справочных разделах литературы приводятся сравнительные данные массы и моментов инерции некоторых типов тяговых приводов. Момент инерции «пустот», образованных такими важными элементами, как вентиляционные каналы и зубцовый слой, учитывается вычитанием из момента инерции тела простой геометрической формы, то есть полого цилиндра:

$$J = m_{\epsilon} \frac{R^2 - r^2}{2}.$$

В каждом отдельном случае необходимо принимать во внимание плотность материала (сталь, медь, воздух, изоляция, др.).

Итак, аналитический расчет рассмотренных элементов может быть доведен до высокой точности, переходя от простой геометрической формы деталей к более сложной. Подтверждением правильности расчетов обычно служат эксперименты, заключающиеся в реализации, например, метода выбега, когда фиксируется время от определенной скорости до полной остановки вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. М.: Транспорт, 1983.
2. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов. М.: Транспорт, 1991.
3. Журнал «Локомотив». 2002. № 10.

4. Голубцов В.М. Подготовка исходных данных для исследования коэффициента инерции вращающихся частей модели тягового привода / В.М. Голубцов // Высшее профессиональное заочное образование на железнодорожном транспорте: настоящее и будущее: сб. тр. Междунар. конф. М., 2001.

5. **Голубцов В.М.** Лабораторный стенд для исследования тягового привода электроподвижного состава / В.М. Голубцов // Высшее профессиональное заочное образо-

вание на железнодорожном транспорте: настоящее и будущее: сб. тр. Междунар. конф. М., 2001.

Голубцов Валентин Михайлович – доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Академии транспорта РУТ

Valentin M. Golubtsov – Associate Professor, Department of Traction Equipment, Academy of Transport of the Russian University of Transport

Статья поступила в редакцию 16.02.18, принята к опубликованию 28.03.18

УДК 681.171.5

АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

И.А. Менщиков

IDENTIFICATION ALGORITHMS FOR DIAGNOSTIC INFORMATION IN ELECTROMECHANICAL TRANSPORT SYSTEMS USING ADAPTIVE DIGITAL FILTERS

I.A. Menshikov

Рассмотрены вопросы разработки принципов создания автоматизированных систем технической диагностики электромеханических комплексов.

Ключевые слова: *электромеханическая система, техническая диагностика, автоматизированная адаптивная диагностическая система контроля*

При поиске оптимальных алгоритмов обработки диагностических сигналов в электромеханических транспортных системах (ЭМС) неизбежно приходится опираться на некоторые имитационные статистические модели сигналов и шумов. Чаще всего при формировании имитационных моделей используются концепции линейности, стационарности и нормальности. Однако пе-

The article considers the issues relating the development principles of computer-aided systems for diagnosing electromechanical units.

Keywords: *electromechanical system, technical diagnostics, computer-aided adaptive diagnostic control system*

речисленные принципы далеко не всегда выполняются на практике, а от адекватности выбранной модели в значительной мере зависит качество идентификации диагностической информации. Возможным решением проблемы является использование адаптивных фильтров, которые позволяют системе подстраиваться под статистические параметры входного диагностического сиг-

нала, не требуя при этом задания каких-либо моделей [1-4].

Схема микропрограммного идентификатора входных и выходных диагностических сигналов состоит из регистра команд (РК), регистра адресов микрокоманд (РАМК), дешифратора (ДШ), блока проверки логических операций (ПЛУ), формирователя адресов микрокоманд (ФАМК) и формирователя микрокоманд (ФМК) (рис. 1).

Регистр команд предназначен для записи кодов команд, поступающих от тактового генератора. Код команды, записанный в регистр команд, определяет номер выполняемой АИ микрокоманды. Код команды, поступающий в регистр команд, может изменяться только после выполнения соответствующей ему микрокоманды. Регистр

адресов микрокоманд служит для запоминания адресов микрокоманд, входящих в выполняемую микрокоманду.

Дешифратор ДШ имеет две группы входов, на которые подаются сигналы с выходов регистров РК и РАМК, и осуществляет дешифрацию поступающих на него кодов, при этом в каждый момент времени на его выходах появляется сигнал только на той шине, на которой номер соответствует поступившим на его входы кодам.

На входы блока проверки логических условий поступают значения логических условий $P_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ и выходные сигналы дешифратора. На выходах ПЛУ формируются сигналы тех логических условий, которые определяются поступающими от дешифратора сигналами.

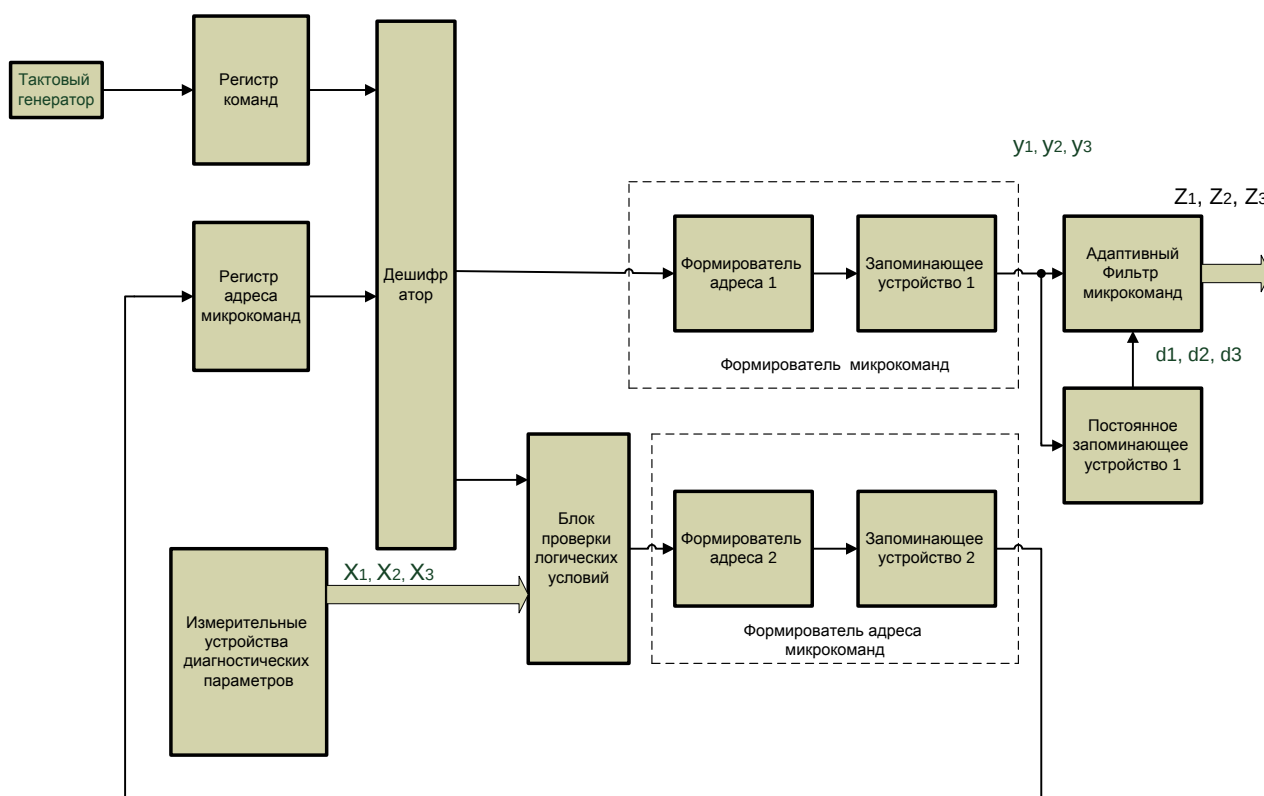


Рис. 1. Структурная схема микропрограммного идентификатора входных и выходных диагностических сигналов

Выходные сигналы ПЛУ выдаются парафазным кодом. Формирователь адресов микрокоманд ФАМК состоит из формирователя адреса (ФА₂) и запоминающего устройства кодов микрокоманд (ЗУ₂). Под

воздействием сигналов, поступающих от блока ПЛУ и ДШ, формирователь адреса включает одну из шин ЗУ₂, в результате чего производится считывание адреса оче-

редной микрокоманды, входящей в выполняемую микрокоманду.

Формирователь микрокоманд ФМК, так же как и ФАМК, состоит из формирователя адреса (ФА₁) и запоминающего устройства (ЗУ₁). При поступлении сигнала с выхода дешифратора формирователь адреса ФА₁ включает одну из шин ЗУ₁ и на выходе автомата формируется совокупность микроопераций, составляющих микрокоманду.

Работа МИ начинается после поступления с тактового генератора кода очередной команды в регистр команд. Выходные сигналы регистра команд поступают на входы дешифратора, в результате чего открывается один из его выходов. Выходной сигнал дешифратора поступает на входы форми-

рователя микрокоманд (ФК) и вход блока проверки логических условий (БПЛУ). В соответствии с выходными сигналами БПЛУ формирователь адреса микрокоманд (ФАМК) формирует адрес очередной микрокоманды, который записывается в регистратор адреса микрокоманд (РАМК), после чего цикл работы АИ повторяется. После окончания выполнения микрокоманды, соответствующей коду поступившей команды, в АИ формируется микрокоманда «Стоп», работа АИ прекращается.

Адаптивные фильтры (рис. 2) помогают диагностической системе подстраиваться под статистические параметры входного сигнала, не требуя при этом заданий каких-либо моделей.

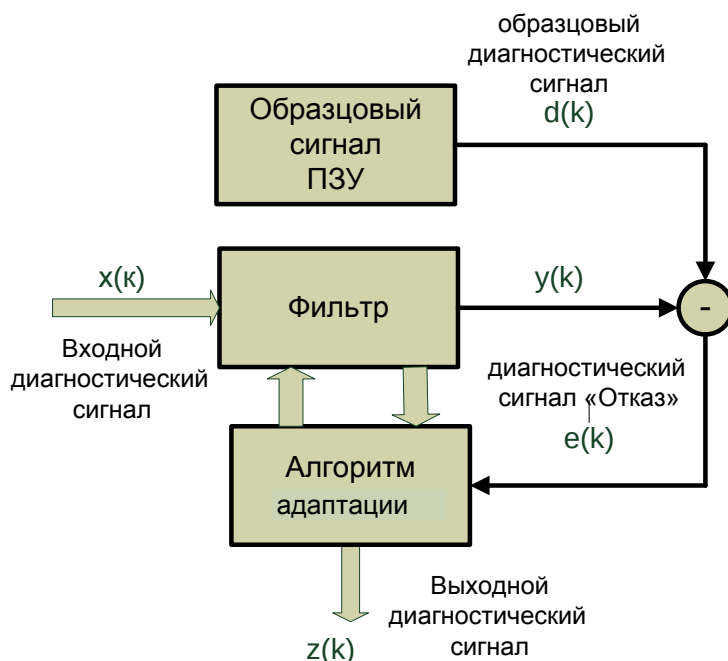


Рис. 2. Структура адаптивного фильтра стратегического идентификатора диагностических параметров

Поскольку $e(k)$ является случайным процессом, в качестве меры ее величины следует принять среднеквадратичное отклонение величины $\overline{e^2(k)}$ следовательно, оптимизируемая функция примет вид

$$j(\{\omega_n\}) = \overline{e^2(k)} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Для определения значений коэффициентов фильтра $\{\omega_n\}$ обозначим вектор-столбец коэффициентов фильтра как W ,

а вектор-столбец содержимого линии задержки фильтра на k -м шаге как $x(k)$, так что

$$W = \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ \omega_N \end{bmatrix}, \quad x(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-1) \\ x(k-N) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

С учетом матричного обозначения коэффициентов фильтра

$$e(k) = d(k) - x^T(k)W. \quad (3)$$

Квадрат ошибки диагностирования можно определить как

$$\begin{aligned} e^2(k) &= (d(k) - x^T(k)W)^2 = \\ &= d^2(k) - 2d(k)x^T(k)W + (x^T(k)W)^2 = \\ &= d^2(k) - 2d(k)x^T(k)W + \\ &\quad + W^T x(k)x^T(k)W, \end{aligned} \quad (4)$$

так что соотношение (1) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} j(W) &= \overline{e^2(k)} = \overline{d^2(k)} - \\ &- 2\overline{(d(k)x(k))^T W} + W^T \overline{x(k)x^T(k)} W, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\overline{d^2(k)}$ – средний квадрат образцового сигнала (устойчивое функционирование ЭМС). Он представляет собой отдельное слагаемое, обозначим данную величину как σ_d^2 . Далее $2\overline{(d(k)x(k))^T}$ – вектор-столбец взаимных корреляций между k -м отсчетом образцового сигнала и содержимого линии задержки фильтра на k -м шаге [2-4]. Будем считать случайные $x(k)$ и $d(k)$ совместно стационарными, тогда вектор взаимных корреляций не зависит от номера шага k и этот вектор обозначим как P :

$$P = \begin{bmatrix} \overline{d(k)x(k)} \\ \overline{d(k)x(k-1)} \\ \vdots \\ \overline{d(k)x(k-N)} \end{bmatrix}.$$

$\overline{x(k)x^T(k)}$ – квадратичная матрица размером $(N-1) \times (N+1)$, являющаяся корреляционной матрицей диагностического сигнала [3, 4]. Для стационарного случайного диагностического процесса корреляционная матрица имеет вид матрицы Теплица, вдоль диагонали которой стоят значения корреляционной функции:

$$R = \begin{bmatrix} R_x(0)R_x(1)R_x(2)\dots\dots R(N) \\ R_x(1)R_x(0)R_x(1)\dots\dots R(N-1) \\ R_x(2)R_x(1)R_x(0)\dots\dots R(N-2) \\ \vdots \\ R_x(N)R_x(N-1)R_x(N-2)\dots R(0) \end{bmatrix},$$

где $R_x(\Delta k) = \overline{x(k)x(k-\Delta k)}$ – корреляция входного сигнала.

С учетом введенных обозначений оптимизируемая функция примет вид:

$$j(w) = \sigma_d^2 - 2p^T w + w^T R w. \quad (6)$$

Данное выражение представляет собой квадратичную форму относительно w и поэтому при невырожденной матрице R имеет единственный минимум, для нахождения которого необходимо приравнять к нулю вектор градиента:

$$\nabla j(w) = -2p + 2Rw = 0. \quad (7)$$

Из выражения (7) получим уравнение Винера – Хопфа:

$$R w = p. \quad (8)$$

Умножив обе части соотношения (8) на обратную корреляционную матрицу R^{-1} , получим искомое решение для оптимальных коэффициентов фильтра:

$$w = R^{-1} p. \quad (9)$$

Подстановка (6) в (4) дает минимальную достижимую дисперсию сигнала ошибки (отказа электротехнического оборудования). Такой фильтр называется фильтром Винера:

$$\overline{e^2(k)}_{\min} = \sigma_d^2 - p^T R^{-1} p. \quad (10)$$

Если $\overline{e(k)y(k)} = 0$ и $\overline{e(k)x(k)} = 0$, сигнал ошибки для фильтра Винера некоррелирован со входным и выходными сигналами фильтра.

В качестве примера рассмотрим распознавание технического состояния ЭМС с помощью адаптивной фильтрации входного диагностического сигнала, поступающего с измерительного блока на вход адаптивного фильтра. Входной сигнал, имитирующий отказ элементов ЭМС и имеющий четырехэлементную импульсную характеристику $\{h_k\} = \{-2, -1, 4, 5, 6, 3\}$, подается на вход адаптивного фильтра, с корреляционной функцией $\{R(\Delta k)\} = \{95, 56, 24, -6, -9\}$, $\Delta k = 0, 1, 2, 3$. Адаптивный фильтр будет представлять собой нерекурсивный фильтр 32-го порядка. Образцовый сигнал представим как задержанную копию входного сигнала:

$$d(k) = x(k - \Delta k) .$$

В линии задержки фильтра на k -м шаге находятся отсчеты сигнала, несущие информацию об отказе электротехнического оборудования

Имитационная испытательная модель адаптивного фильтра микропрограммного

автомата представлена на рис. 3. На рис. 4 представлена спектральная характеристика диагностических сигналов на выходе адаптивного RLS фильтра при неустойчивом режиме функционирования электромеханической системы.

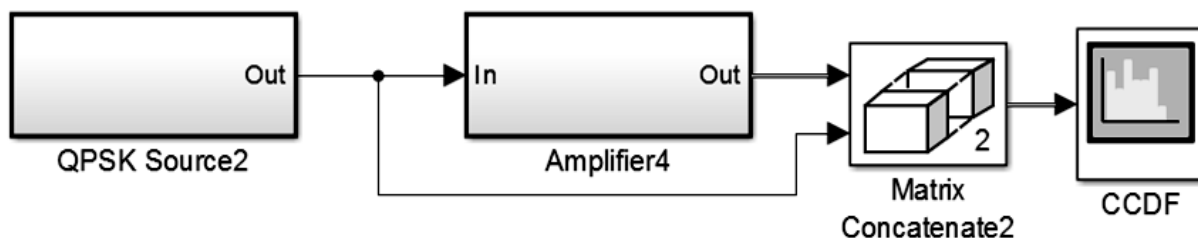


Рис. 3. Имитационная испытательная модель адаптивного фильтра RLS микропрограммного автомата

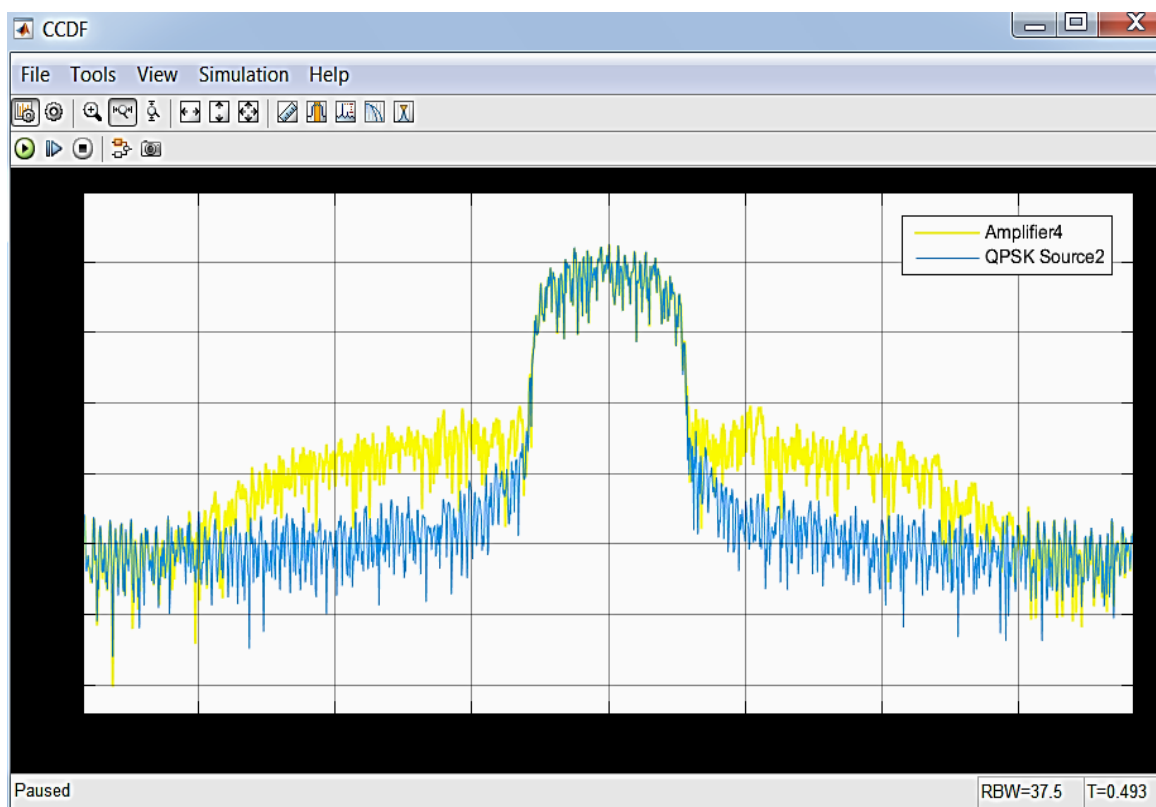


Рис. 4. Спектральная характеристика диагностического сигнала на выходе адаптивного RLS фильтра при неустойчивом режиме функционирования электромеханической системы

Итак, представленная структурная схема микропрограммного автомата с помощью адаптивного цифрового фильтра позволяет наиболее эффективно определять первичные признаки диагностических параметров, что повышает надежность и устойчивость функционирования электромеханических транспортных систем.

При поиске оптимальных алгоритмов обработки диагностической информации наиболее целесообразно использовать адаптивные фильтры с алгоритмом LMS и RLS, с помощью которых диагностическая система подстраивается под статистические параметры входного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лайоне Р.** Цифровая обработка сигналов / Р. Лайоне. М.: Бином-Пресс, 2009. 656 с.: ил.

2. **Гадзиковский В.И.** Теоретические основы цифровой обработки сигналов / В.И. Гадзиковский. М.: Радио и связь, 2004.

3. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование,

проектирование, испытания / А.Н. Адаменко, А.Г. Ашеро́в, И.Л. Бердников и др. М.: Машиностроение, 1993.

4. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. СПб.: Питер, 2008. 751 с.

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

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

Статья поступила в редакцию 01.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.311, 621.315

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Д.А. Глухов, Д.Е. Титов, Г.Г. Угаров

USING THE SYNCHRONIZED VECTOR MEASUREMENT DATA FOR MONITORING THE INSULATION CONDITION OF AIR TRANSMISSION LINES

D.A. Glukhov, D.E. Titov, G.G. Ugarov

Предложен метод оценки состояния изоляции воздушных линий электропередачи с использованием данных синхронизированных векторных измерений, приведено обоснование необходимых диагностических параметров.

Ключевые слова: мониторинг, оценка, изоляция, воздушные линии электропередачи, рискоориентированный подход

Согласно [1] основной причиной отказов электрооборудования (ЭО) за 2016 год является износ (более 20%), при этом основной причиной износа ЭО является старение и загрязнение изоляции. Сводные данные о причинах нарушений надежности электросетевого комплекса (ЭСК) приведены на рис. 1. Стоит отметить, что отказ изоляции происходит не только вследствие старения, но и вследствие стихийных явлений (16,7% отказов), недостатков эксплуатации (13,3%), связанных с несвоевременными или некачественными работами по выявлению и устранению загрязнений и дефектов изоляции. Отказ изоляции происходит и вследствие других причин, также приведенных на рис. 1. Часть отказов воздушных линий (ВЛ) из-за атмосферных перенапряжений также вызваны плохим состоянием изоляции.

The proposed method for estimating the insulation condition of overhead power transmission lines is based on using the synchronized vector measurement data, and the necessary diagnostic parameters.

Keywords: monitoring, assessment, insulation, overhead transmission lines, risk oriented approach

Приведенные факты являются причиной применения планово-предупредительного подхода к осмотру, замене и чистке изоляции. Согласно [2], в ЭСК намечен переход от системы планово-предупредительного оказания воздействия на активы к рискоориентированному управлению активами (РОП). В связи с этим, на сегодня не выясненными остаются вопросы оценки риска возникновения отказов и оценки последствий таких отказов.

Рискоориентированный подход к управлению ЭО. РОП представляет собой методологию, обеспечивающую целевое воздействие надзорных функций на объекты контроля, основанные на анализе состояния технических устройств, риска их аварий и инцидентов в соответствии с значимостью последствий таких аварий и инцидентов. Под риском понимается со-

бытие, которое может произойти в будущем с определенной вероятностью и нанести определенный ущерб. Риск может быть результатом как действия, так и бездействия.

В соответствии с РОП сформировались два основных направления исследований: исследования в области создания методологии оценки вероятности отказа и исследова-

нования с целью создания методик оценки последствий таких отказов.

Оценка последствий отказов должна включать экономические показатели ущерба, основным фактором которой является длительность перерывов электроснабжения потребителей. Такая статистика по ЭСК ПАО «Россети» за 2016 год приведена на рис. 2 [1].



Рис. 1. Причины нарушений надежности работы ЭСК в 2016 году [1]

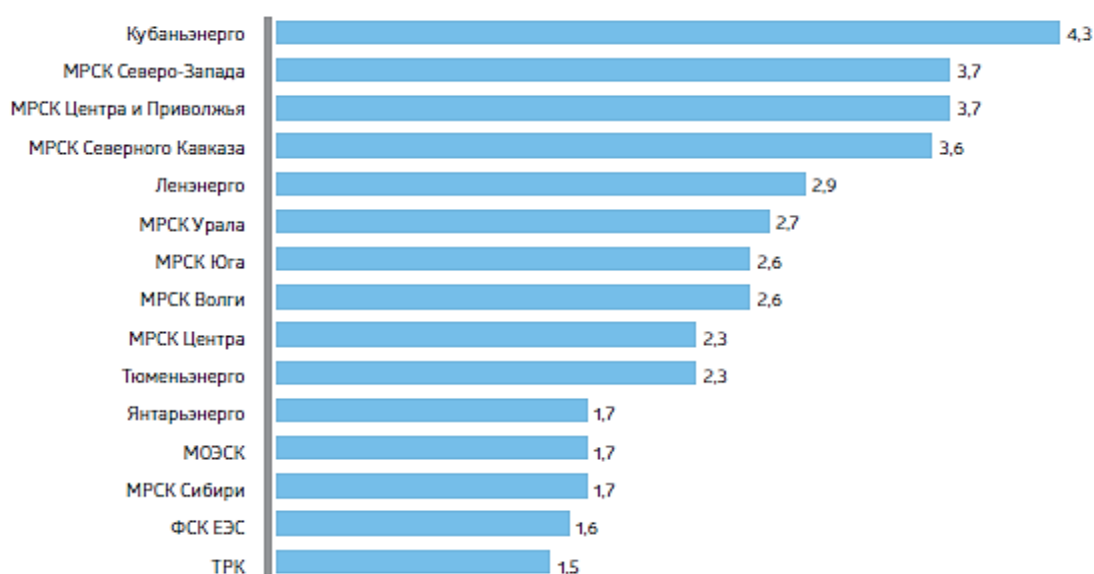


Рис. 2. Средняя длительность перерывов электроснабжения потребителей в сети 6 кВ и выше в результате технологических нарушений

Как видно из рис. 2, наиболее длительные перерывы в электроснабжении наблюдались в Центральной, Южной частях Рос-

сии и в Поволжье. Концепция РОП на примере использования данных, представленных на рис. 2, предполагает увеличение

плановых затрат на противоаварийные мероприятия в тех дочерних сетевых компаниях ПАО «Россети», в которых продолжительность перерывов электроснабжения выше всего.

Методология оценки вероятности отказов должна строиться на основании статистики отказов, а также на основании результатов мониторинга состояния ЭО. Мониторинг при этом должен подразумевать непрерывный неразрушающий контроль.

Проблема оценки состояния изоляции воздушных линий электропередачи. На сегодняшний день основными методами диагностики состояния изоляции воздушных линий электропередачи являются:

- визуальный осмотр;
- тепловизионный контроль;
- рентгенографическая диагностика;
- ультрафиолетовая диагностика;
- периодические высоковольтные испытания изоляции;
- непрерывный мониторинг посредством измерения токов утечки.

Все из перечисленных мероприятий являются локальными методами обследования состояния изоляции. Для их применения необходимо сначала определить объект контроля ВЛ, а также место проведения превентивной диагностики. В масштабах ЭСК выбрать первоочередной объект для диагностики бывает затруднительно. Более того, учитывая, что наиболее информативным на сегодня параметром, отображающим состояние изоляции, является ток утечки, такой вид контроля состояния изоляции как визуальный осмотр зачастую малоэффективен.

Стоит отметить, что на сегодня нет готовых инструментов косвенной оценки увеличения тока утечки в какой-то из ВЛ. Однако увеличение тока утечки в изоляции ВЛ можно определить на основании оценки параметров схемы замещения. В соответствии со схемой замещения токоведущие части ВЛ электрически связаны с землёй поперечной проводимостью Y , следовательно, суммарный ток утечки, протекающий по контурам фаза – земля – нейтраль и

фаза – земля – фаза зависит от величины этой проводимости.

Применяемыми сегодня стандартными средствами оценки состояния на основании данных телеметрической информации невозможно определить поперечную проводимость ВЛ, однако в связи с масштабным внедрением в ЕЭС России системы синхронизированных векторных измерений (СВИ) появилась возможность высокоточной оценки состояния ВЛ, а следовательно и оценки ее поперечной проводимости. Для формирования методики такой оценки необходимо определить главные измеряемые посредством СВИ параметры и математическую модель поперечной проводимости на основании данных СВИ.

Современное состояние и перспективы развития систем синхронизированных векторных измерений. Современные системы мониторинга переходных режимов (СМПР) в России состоят из устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) и концентраторов синхронизированных векторных данных (КСВД). Сбор информации для задач оперативно-диспетчерского и автоматического управления ЭЭС осуществляется в двух режимах: on-line и off-line. Создание системы мониторинга переходных режимов в России было инициировано ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС» в 2005 году в рамках проекта «ТЭО синхронного объединения энергосистем УСТЕ и ЕЭС/ОЭС» [3, 4]. В 2006 году на 16 энергообъектах ЕЭС была введена в эксплуатацию первая очередь СМПР. В 2015 году количество оснащенных энергообъектов составляло уже 69, а общее количество УСВИ достигло 400. На 2017 год комплексами СМПР оснащены 85 объектов, количество УСВИ составляет 551 [5]. Диаграмма оснащённости СМПР ЕЭС России приведена на рис. 3. Наибольшее количество объектов, оснащенных СМПР, находится в ОЭС Урала (29 объектов, 156 УСВИ), наименьшая оснащённость СМПР – в ОЭС Востока (2 объекта, 6 УСВИ). Общее количество КСВД по ЕЭС России на 2017 год составляет 47 устройств.

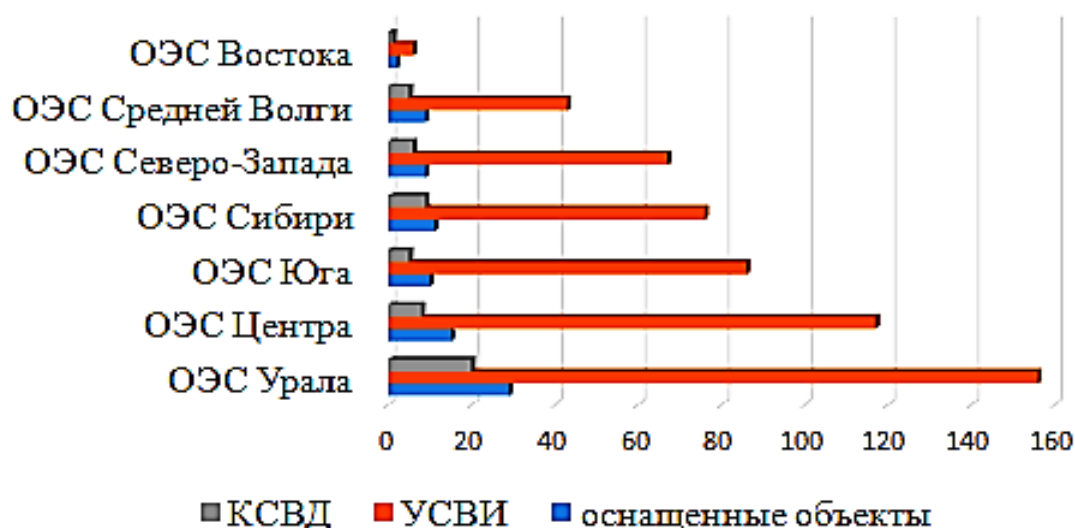


Рис. 3. Оснащённость СМПР ЕЭС России на 2017 год [5]

Согласно [6] к 2020 году планируется оснастить СМПР порядка 200 объектов. Концепция предполагает на первом этапе оснастить СМПР все ПС классом напряжения 500 кВ и выше, а также электрические станции установленной мощностью 500 МВА и выше [7].

По мере развития СМПР в России сложились предпосылки к нормированию характеристик УСВИ. Сегодня существует Стандарт АО «СО ЕЭС» [8], устанавливающий:

- требования к функциональности УСВИ;
- требования к составу измеряемых параметров УСВИ;

– требования к метрологическому обеспечению УСВИ;

– требования к синхронизации измерений УСВИ;

– порядок и методику сертификационных испытаний УСВИ, а также минимальный перечень документов и информации по УСВИ, подлежащих представлению заявителем на рассмотрение органу по добровольной сертификации.

Все вновь разрабатываемые и модернизируемые УСВИ в ЕЭС России должны соответствовать указанному стандарту. В таблицу сведены данные по точности действующих в мире УСВИ.

Сводные данные по точности существующих промышленных УСВИ

УСВИ	SMART-WAMS (Россия)	BEN6000 (Бельгия)	SEL 421 (США)	RES 521 (Швеция)	Arbiter (США)
U , кВ	$\pm(0,3-0,5)\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,02\%$
Фазовый угол	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,3^\circ$
I_{ij} , А	$\pm(0,3-0,5)\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,03\%$
Угол ϕ_{ij} между I_{ij} и U_i	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$
Частота, Гц	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$\pm 0,01$	$\pm 0,002$	$\pm 0,005$

Как видно из таблицы, применяемые в ЕЭС России УСВИ являются наиболее точными в части замера углов векторов, а также частоты. Согласно [8], для синхронизации

УСВИ должны использоваться приемники сигналов глобальных навигационных систем с точностью синхронизации не хуже 1 мкс, что соответствует погрешности из-

мерений 0,018 эл. градусов. Стоит отметить, что современные спутниковые системы имеют точность 15 нс, что соответствует точности 0,00027 эл. градусов.

На основании указанных данных стоит отметить возможность измерения векторов токов и напряжений по концам ВЛ с достаточно высокой точностью. Используя указанные данные, можно производить косвенную оценку состояния изоляции ВЛ с целью выявления наиболее рискованного

элемента электрической сети. Для формирования методики такой оценки необходимо определить главные измеряемые посредством СВИ параметры и математическую модель поперечной проводимости на основании данных СВИ.

Определение диагностических параметров для оценки состояния изоляции с использованием данных СВИ. На рис. 4 приведены принципиальная схема и П-образная схема замещения ВЛ.

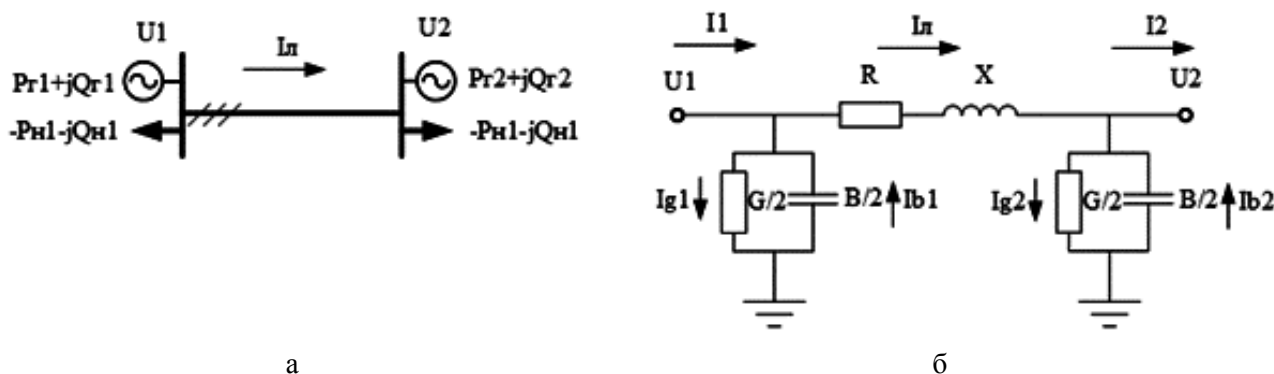


Рис. 4. Однолинейная схема ВЛ: а – принципиальная; б – П-образная схема замещения

Приведенная на рис. 4 схема является универсальной для обозначения ВЛ, соединяющей две части энергосистемы вне зависимости от количества источников питания. Приняв за нулевое значение генерацию $P_{g2} + jQ_{g2}$, можно получить схему замещения для тупиковой ВЛ. В любом случае, эквивалентная схема замещения выглядит еще более упрощенной, поскольку в передающем конце ВЛ суммарный баланс потребления/генерации можно изобразить эквивалентной генерацией, а в приемном – эквивалентной нагрузкой.

Ток, протекающий по участку цепи, зависит от разности модулей напряжений и от угла δ сдвига фаз по концам ВЛ. При этом разность модулей напряжения формирует переток реактивной мощности, а фазовый сдвиг (разность углов фазы по концам ВЛ) формирует переток активной мощности.

Обратимся к векторной диаграмме ВЛ (рис. 5), построенной для схемы замещения, представленной на рис. 4, в фазных значениях напряжений.

Из рис. 5 видно, что падение напряжения (геометрическая разность напряжений

по концам ВЛ) зависит от тока линии $\underline{I}_l$ и продольного сопротивления ВЛ. Однако ток линии $\underline{I}_l$ невозможно измерить, поскольку эта величина имеет место лишь в П-образной схеме замещения (рис. 4 б). Применительно к указанной схеме имеется возможность непосредственного измерения векторов тока $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ по концам ВЛ.

Имея синхронизированные векторы тока по концам ВЛ и зная параметры поперечной проводимости, можно определить ток $\underline{I}_l$ на основании схемы замещения и векторной диаграммы ВЛ (рис. 4 б, рис. 5):

$$\underline{I}_l = \underline{I}_2 + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{g2} = \underline{I}_1 - \underline{I}_{b1} - \underline{I}_{g1}, \quad (1)$$

где $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$ – синхронизированные векторы токов по концам ВЛ, $\underline{I}_{b1}$, $\underline{I}_{g1}$, $\underline{I}_{b2}$, $\underline{I}_{g2}$ – векторы токов поперечной проводимости для схемы на рис. 3, причем

$$\underline{I}_{bn} = \underline{U}_n \phi \frac{jB}{2}, \quad (2)$$

$$\underline{I}_{gn} = \underline{U}_n \phi \frac{G}{2}, \quad (3)$$

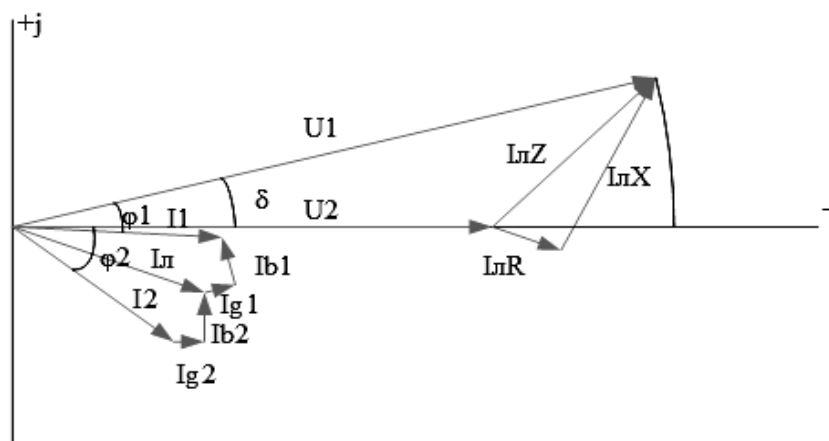


Рис. 5. Векторная диаграмма ВЛ

где I_{bn} – ток реактивной проводимости конца ВЛ; I_{gn} – ток активной проводимости конца ВЛ; $U_{n\phi}$ – фазный вектор напряжения конца ВЛ.

Запишем (1) с учетом (2) и (3):

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{U}_2 \frac{jB}{2} + \underline{U}_2 \frac{G}{2} + \underline{U}_1 \frac{jB}{2} + \underline{U}_1 \frac{G}{2}, \quad (4)$$

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = (\underline{U}_1 + \underline{U}_2) \left(\frac{jB}{2} + \frac{G}{2} \right). \quad (5)$$

Поскольку $jB + G = Y$, запишем выражение для полной поперечной проводимости Y , используя (5):

$$Y = \frac{2(\underline{I}_1 - \underline{I}_2)}{(\underline{U}_1 + \underline{U}_2)}. \quad (6)$$

В комплексной форме (6) примет вид

$$Y = \frac{2(I_1 \cdot e^{j\chi_1} - I_2 \cdot e^{j\chi_2})}{(U_1 \cdot e^{j\chi_3} + U_2 \cdot e^{j\chi_4})}, \quad (7)$$

где I_1, I_2, U_1, U_2 – измеренные модули токов и напряжений по концам ВЛ; $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$ – фазовые углы векторов.

Таким образом, искомыми параметрами для определения поперечной проводимости являются $I_1, I_2, U_1, U_2, \chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$.

Поскольку в (7) использованы фазные значения напряжений и токов, проводимость Y можно определить для каждой фазы, а это значит, что можно не только выявить ВЛ с ухудшенными изоляционными свойствами, но и выявить фазу, что упрощает задачу диагностики состояния изоляторов.

Итак, можно сделать следующие выводы.

1. Проведен анализ аварийности электросетевого комплекса. Выявлено, что одной из основных причин отказов электрооборудования, в частности ВЛ, является отказ изоляции.

2. Предложен метод оценки риска отказа изоляции ВЛ путем анализа данных синхронизированных векторных измерений по концам ВЛ.

3. Проведен анализ современного состояния и перспектив развития систем синхронизированных векторных измерений в ЕЭС России.

4. Сформирована математическая модель оценки поперечной проводимости фазы ВЛ на основании данных СВИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годовой отчет ПАО «Россети» за 2016 год // ПАО «Россети». 2017. 206 с.
2. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политики в электросетевом комплексе» // ПАО «Россети». М., 2017. 196 с.

3. Аюев Б.И. О системе мониторинга переходных режимов / Б.И. Аюев // Энергорынок. 2006. № 2.

4. Куликов Ю.А. Использование технологии векторного измерения параметров в ЕЭС России для информационного обеспе-

чения оперативно-диспетчерского управления / Ю.А. Куликов // Энергетик. 2009. № 1. С. 10-13.

5. **Михайленко В.С.** Перспективы применения устройств векторной регистрации для оптимизации работы электрической сети в режиме реального времени / В.С. Михайленко, О.С. Рыбасова, С.С. Костюкова // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф., 02-06 октября 2017, Самара. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. Т. 2. С. 321-324.

6. Паспорт «Программы инновационного развития ОАО «СО ЕЭС» на 2016-2020

годы и на перспективу до 2025 года» // ОАО «СО ЕЭС». 2016. 78 с.

7. **Жуков А.В.** Разработка и внедрение автоматической системы сбора информации с регистраторов системы мониторинга переходных режимов в ЕЭС России / А.В. Жуков, Д.М. Дубинин, Д.Н. Уткин и др. // Релейщик. 2013. № 3. С. 18-23.

8. СТО 59012820.29.020.011-2016 Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования // АО «СО ЕЭС». 2016. 37 с.

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

Титов Дмитрий Евгеньевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Сколковского института науки и технологий, генеральный директор ООО «МИГ»

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

Dmitry A. Glukhov – Leading Expert, Department of Stability Control and Emergency Control Automatics of Electric Services, System Operator of the United Power System, Saratov branch

Dmitry E. Titov – PhD, Research Fellow, Skolkovo Institute of Science and Technology, Director General at ООО MIG

Gennady G. Ugarov – Dr. Sc. Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Kamyshin Institute of Technology, branch of Volgograd State Technical University

Статья поступила в редакцию 04.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И АЛГОРИТМ ЕГО РАБОТЫ

А.С. Должикова, С.Ф. Степанов

DEVICES FOR DIAGNOSTICS AND MONITORING ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND THEIR OPERATION ALGORITHMS

A.S. Dolzhikova, S.F. Stepanov

В настоящее время большое внимание уделяется использованию микропроцессорных систем в диагностических комплексах, которые позволяют достоверно оценить техническое состояние электротехнического оборудования и снизить финансовые расходы на его ремонт за счет перехода на обслуживание по фактическому состоянию и отказа от регламентного обслуживания, а также повысить надежность электроснабжения. Для этих целей может быть использовано устройство диагностики и мониторинга электротехнического комплекса.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, диагностика, мониторинг, датчики, микроконтроллер, экспертная система

Надежность электротехнического оборудования зависит как от качества его изготовления, так и от корректного использования системы технического обслуживания и ремонта (ТОР).

В настоящее время практически повсеместно применяется система планово-предупредительных ремонтов (ППР), где жестко регламентируются ремонтные циклы, обеспечивая, таким образом, минимум простоев оборудования. Однако система ППР во многих случаях не может обеспечить принятия оптимальных решений в условиях развития рыночных отношений в области энергоремонта. Это связано с тем, что профилактические работы осуществляются регламентно и не зависят от фак-

Currently significant attention is placed on utilization of microprocessor systems in diagnostic complexes that allow to reliably assess the technical condition of electrical equipment, and thus reduce financial expenses for the repairs through condition monitored maintenance and scheduled maintenance abandonment, as well as improve reliability of electricity supply. For these purposes, we can utilize devices for diagnostics and monitoring of electrical complex systems.

Keywords: electrotechnical system, diagnostics, monitoring, sensor, microcontroller, expert system

тического состояния электротехнического оборудования. Это приводит к появлению дополнительных материальных и трудовых затрат.

Одной из важных задач на современном этапе развития энергетики в условиях жесткой экономии средств, выделяемых на ремонт и модернизацию, является разработка, внедрение и развитие современных систем диагностики и мониторинга дорогостоящего электротехнического оборудования. Данные системы, выполненные на современной микропроцессорной базе, предназначены как для контроля, так и для диагностики.

Использование микропроцессорных систем позволяет достоверно оценить техни-

ческое состояние электротехнического оборудования и снизить финансовые расходы на его ремонт за счет перехода на обслуживание по фактическому состоянию и отказа от регламентного обслуживания, а также повысить надежность электроснабжения.

Блок-схема разработанной системы диагностики и мониторинга электротехнического комплекса представлена на рис. 1.

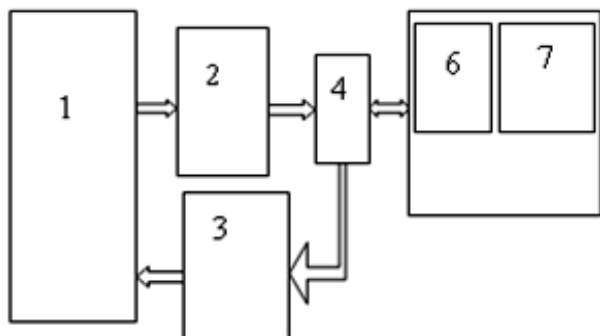


Рис. 1. Блок-схема системы диагностики и мониторинга электротехнического комплекса: 1 – электротехнический комплекс; 2 – система датчиков; 3 – устройства коррекции (исполнительные устройства); 4 – микроконтроллер; 5 – персональный компьютер; 6 – человеко-машинный интерфейс; 7 – экспертная система

Объектом исследования является электротехнический комплекс. Он состоит из одного или нескольких трансформаторов, преобразователей и активной нагрузки (насосы, компрессоры и прочее). К электротехническому комплексу подключается система датчиков для оценки различных параметров. Эти параметры варьируются в зависимости от технологической необходимости. Все данные от системы датчиков поступают в микроконтроллер (МК) для выявления рабочих, предаварийных и аварийных состояний электротехнического комплекса, влияющих на наработку на отказ. Микроконтроллер содержит математический аппарат, служащий для выявления переходных процессов, а также таблиц переходов, которые в совокупности составляют механизм управления экспертной системы. От микроконтроллера преобразованные данные поступают в персональный компьютер (ПК), где представляются в

удобном виде с помощью человеко-машинного интерфейса (ЧМИ). Эти данные позволяют оперативному персоналу принять решение о внесении корректировки в работу электротехнического комплекса в ручном режиме через устройства блока коррекции, либо, используя автоматический режим, выполнить диагностику состояний оборудования электротехнического комплекса с мониторингом данных экспертной системы [1].

Система диагностики и мониторинга выполняет контроль различных характеристик электротехнического комплекса (температура верхних и нижних слоев масла трансформатора, температура обмотки трансформатора, уровень масла, влаго- и газосодержание масла, температура, влажность и запыленность преобразователя, электрические параметры преобразователя, уровень вибрации трансформатора и преобразователя, работа газовой защиты трансформатора, работа РПН и другие). Система сигнализирует о неисправности оборудования и о выходе значений контролируемых параметров за установленные технологические пределы. Система управляет также противоаварийной защитой, представленной устройствами коррекции состояния электротехнического комплекса (климатическая система, система охлаждения трансформатора, система вентиляторов, система нагрузок, устройства согласования, выключатели, резервная система и т.д.). Система диагностики и мониторинга проводит диагностирование технического состояния трансформатора и его систем по комплексу измеренных параметров; архивирует данные и события на энергонезависимом носителе (электронный паспорт). Электронный паспорт технического состояния электротехнического оборудования включает не только структурированные данные о производственном процессе, результаты испытаний на заводе-изготовителе, но и непрерывный контроль за изменением одного или нескольких параметров, характеризующих процессы повреждения, и непрерывный контроль параметров, характеризующих текущее техническое состояние оборудования, обеспечивает своевременную подачу сигнала обслужива-

ющему персоналу о ненормальном развитии процессов в оборудовании. Основная задача системы диагностики – долгосрочное прогнозирование работы объектов, раннее предупреждение дефектов и определение по результатам прогноза наиболее эффективных способов использования имеющихся материально-технических ресурсов. Использование электронных паспортов состояния позволит снизить нагрузку на персонал, связанную с

необходимостью сбора и обработки большого количества информации на бумажных носителях, создать единую базу, исключающую возможную потерю данных, исключить ввод ошибочной информации и практически полностью вывести из оборота бумажные формы отчетности [2].

Алгоритм работы системы диагностики и мониторинга электротехнического комплекса представлен на рис. 2.

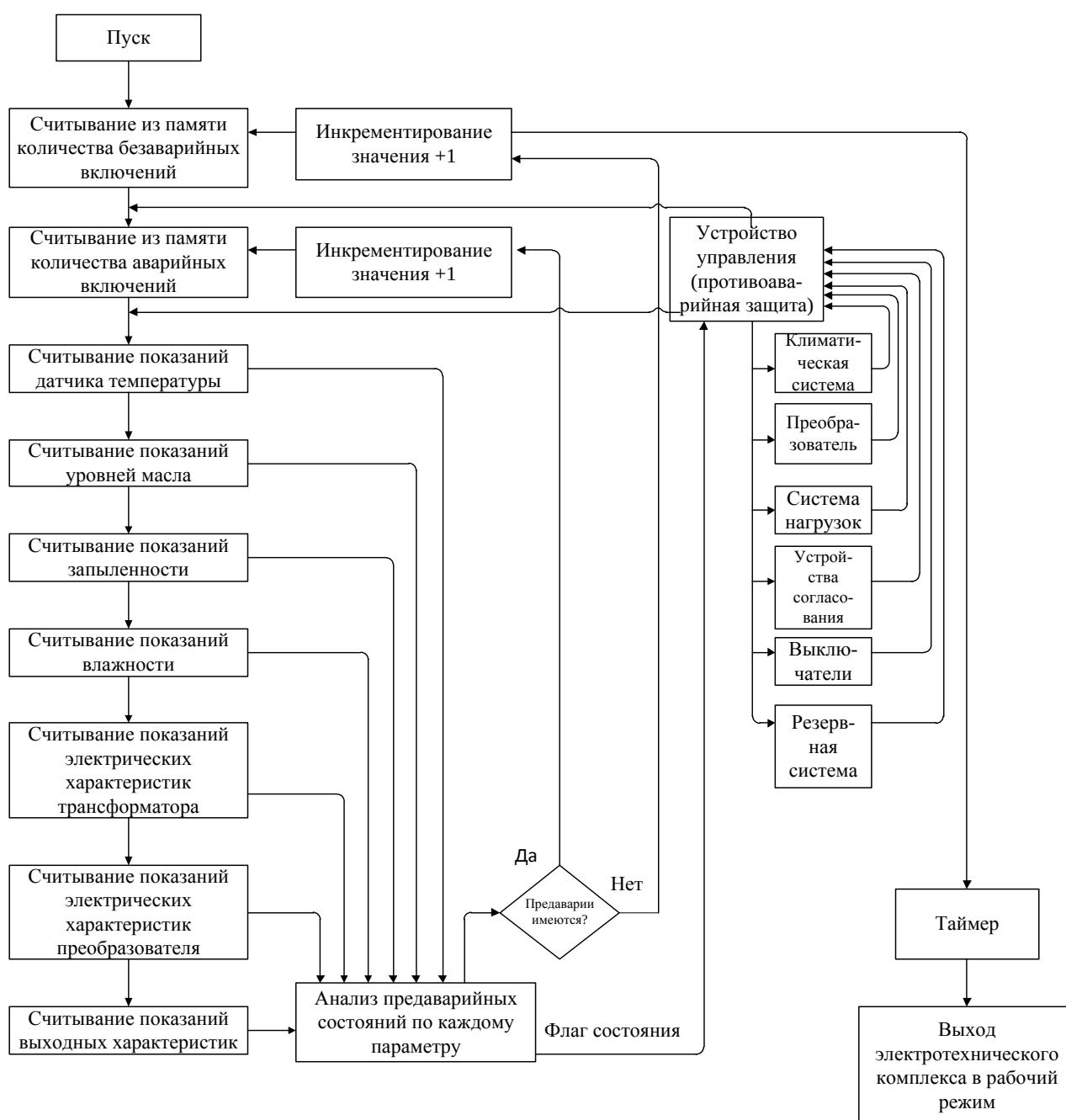


Рис. 2. Алгоритм работы системы диагностики и мониторинга электротехнического комплекса

Он начинается с команды «Пуск». Происходит «считывание из памяти количества безаварийных включений» и «считывание из памяти количества аварийных включений». На следующем этапе происходит считывание в системе датчиков различных показаний (задаются заранее), например, таких как температура, уровень масла, запыленность, влажность, электрические характеристики преобразователя, выходные характеристики трансформатора и т.д. Показания с системы датчиков поступают в микроконтроллер, где происходит «Анализ предаварийных состояний по каждому параметру». Каждый параметр сверяется с заранее заданной шкалой. Если параметр входит в диапазон рабочего состояния по шкале, то происходит инкрементирование значения безаварийных состояний на +1; если параметр выходит из диапазона рабочего состояния, то происходит инкремент-

тирование значения аварийных состояний на +1. Также происходит формирование флага состояния, по которому определяются датчики, показавшие предаварийное состояние. Значение этого флага переходит в устройство противоаварийной защиты, которое управляет исполнительными устройствами, такими как климатическая система, преобразователь, система нагрузок, устройства согласования, выключатели и система резервирования и т.д. Эти устройства приводят значения параметров электротехнического комплекса в норму.

Если проверка электротехнического комплекса показывает нормальное состояние, то происходит включение таймера работы, который показывает безотказное время работы электротехнического комплекса. После этого происходит выход электротехнического комплекса в рабочий режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы технической диагностики. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / В.В. Карибский, П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян, В.Ф. Халчев. М.: Энергия, 1976. 464 с.

2. **Павленко И.М.** Электронный паспорт технического состояния для электро-

технических изделий повышенной сложности / И.М. Павленко, С.Ф. Степанов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сб. тр. XXVII Междунар. науч. конф., г. Саратов, 22-24 апр. 2014 г.: в 12 т. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. Т. 12. Ч. 2. С. 151-152.

Должикова Алиса Сергеевна – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Степанов Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alicia S. Dolzhikova – Postgraduate, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Sergei F. Stepanov – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply and Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 09.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТА ПРИРОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ

Е.А. Ларин, С.В. Ялов

POWER PRODUCTION EFFICIENCY IN THE NATURAL GAS TRANSPORTATION SYSTEMS USING LOW BOILING WORKING SUBSTANCES

E.A. Larin, S.V. Yalov

Предложена принципиальная тепловая схема комбинированной установки с использованием утилизационного энергетического контура газотурбинного привода центробежных нагнетателей систем транспорта природного газа с низкокипящими рабочими телами в качестве рабочего тела. Расчетно-теоретическими исследованиями установлено, что применение бутана и изобутана в качестве рабочих тел утилизационного энергетического контура обеспечивает создание энергетических установок с электрическим КПД на уровне 30-32%.

Ключевые слова: *транспорт природного газа, утилизационный энергетический контур, рабочие тела, термодинамические циклы, эффективность*

Одной из ключевых проблем современных систем транспорта природного газа является необходимость повышения эффективности использования природного газа на собственные технологические нужды. Газотурбинные установки (ГТУ), применяемые в качестве привода центробежных нагнетателей (ЦН) в системах транспорта газа, имеют не только множество известных преимуществ перед другими типами привода, но и ряд существенных недостатков. Применяемый газотурбинный привод в качестве привода ЦН современных систем транспортировки природного газа мощностью 16-25 МВт имеет эксплуатационный КПД не более 35-37%. При этом температура отработавших про-

The authors proposed a new thermal scheme for an integrated system using a waste power circuit to the gas turbine drive of centrifugal blowers in the natural gas transport systems with low boiling working substances applied to the working medium. The theoretical and computational data showed that using butane and isobutene for the working substances in the waste power circuits ensures development of the power plants with electrical efficiency at 30-32%.

Keywords: *natural gas transport, waste power circuit, working substance, thermodynamic cycles, efficiency*

дуктов сгорания после турбины достигает 350-400°C. Полезное использование теплоты уходящих газов после ГТУ для нужд отопления зданий производственной инфраструктуры компрессорных станций (КС) весьма ограничено и не превышает 1-2%. В то же время потребности в электрической энергии КС покрываются за счет использования линий электропередач напряжением до 110 кВ большой протяженности с существенными потерями электроэнергии при транспортировке. В этих условиях удельный расход топлива на единицу потребляемой электроэнергии на КС не ниже 350-360 г у.т./кВт·ч даже в условиях применения парогазовых установок. Кроме того, необходимость обес-

печения надежности систем электроснабжения требует применения низкоэффективных резервных источников электроэнергии на КС с реальным значением КПД не выше 27%.

Для перспективных газотурбинных установок коэффициент использования теплоты топлива (КИТ) может достигать значений 80% и выше, из них для выработки мощности на валу нагнетателя приходится 34-36%, а остальное – за счет рационального использования теплоты отходящих газов.

В частности, среднемесячные объемы потребления электрической мощности все-

ми объектами рассматриваемой системы транспорта природного газа ЯНАО представлены на рис. 1.

Анализ выполненных исследований по проблеме повышения энергоэффективности компрессорных станций систем транспорта природного газа показал, что одним из перспективных направлений снижения расхода топливно-энергетических ресурсов на собственные технологические нужды является создание утилизационных энергетических комплексов с использованием низкикипящих рабочих тел (УЭК с НРТ).

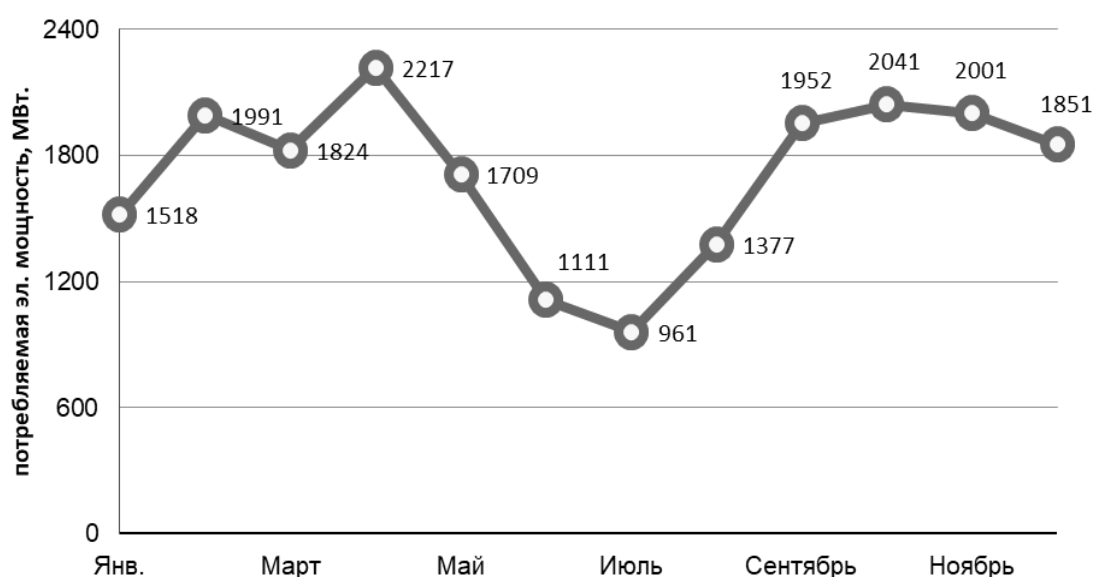


Рис. 1. Среднемесячные объемы потребления электрической мощности объектами единой газотранспортной системы ЯНАО

Для определения эффективности УЭК с НРТ ГПА необходим комплекс системных исследований по выбору рациональных схем, параметров и рабочих тел с единых методических позиций с учетом реальных условий их функционирования в системах энергообеспечения производственной и социальной инфраструктуры предприятий транспорта природного газа. Мировой и российский опыт создания и эксплуатации комбинированных ГТУ, имеющих в своем составе энергетический контур, заполненный низкикипящим рабочим телом, невелик. В табл. 1 представлены данные энергоустановок, использующих НРТ.

Предлагаемая схема установки с использованием НРТ с комбинированной вы-

работкой электрической и тепловой энергии приведена на рис. 2.

На выбор НРТ определяющее влияние оказывает знак производной ds''/dT . При отрицательной производной правая пограничная кривая имеет форму аналогичную водяному пару. Вид правой пограничной кривой является важной характеристикой цикла. Положительная производная ds/dT приводит к возникновению зоны охлаждения пара в конденсаторе, что приводит к увеличению теплообменной поверхности последнего. С другой стороны, смещение процесса расширения в область перегретого пара положительно сказывается на эффективности турбины. Наиболее эффективным является незначительное отрица-

тельное значение производной ds''/dT . Это позволяет закончить процесс расширения в области слабоперегретого или слегка

влажного пара. На рис. 3 приведены термодинамические циклы регенеративных установок с НРТ.

Таблица 1

Хронология внедрения установок использующих НРТ

Название/Страна	Год создания	Мощность кВт
Паратунская ГеоТЭС/СССР	1965-67	750
Otake/Япония	1975-79	1000
Nigorikawa/Япония	1975	1000
Mc Cabe/США	1979	1000
Lakeview/США	1981	900
Raft river/США	1982	4200
Oradea/Румыния	1984-88	100+500+1000
Takigami/Япония	1997	490

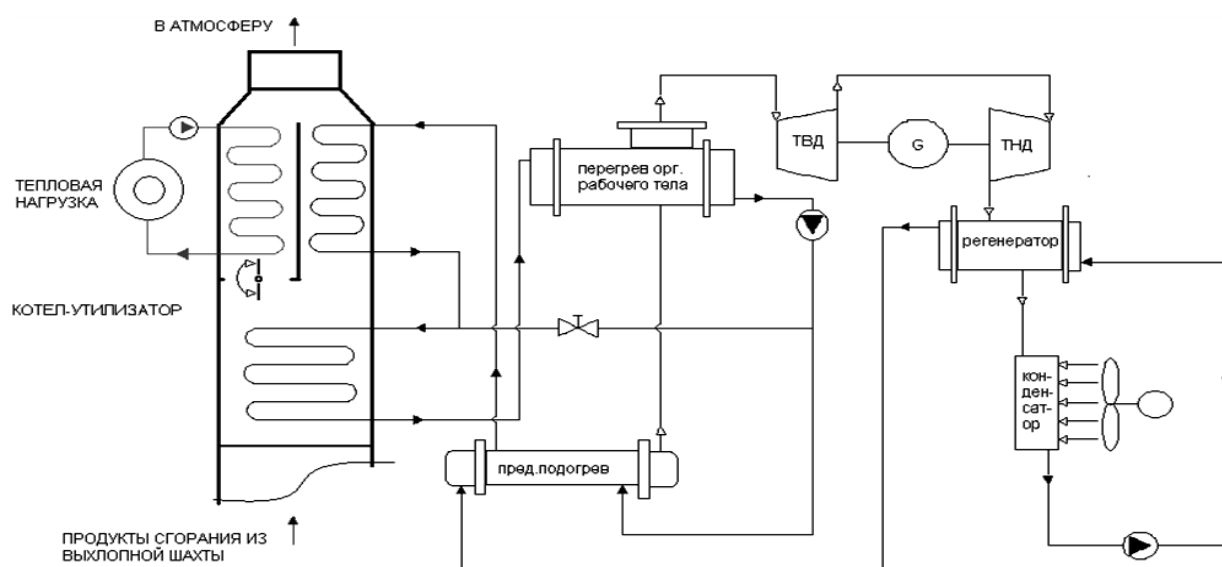


Рис. 2. Предлагаемая расчётная схема УЭК с НРТ

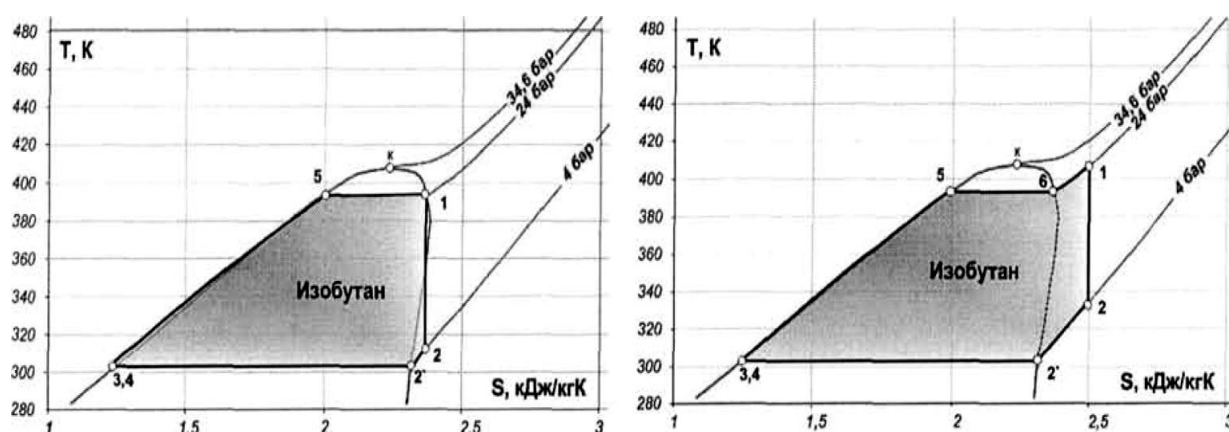


Рис. 3. Конфигурации регенеративных циклов с перегревом и без перегрева НРТ на примере изобутана

Важным параметром цикла НРТ является начальное давление, влияющее на тепловую экономичность установки, её эффективность и конструктивные элементы оборудования. Влияние начального давления и температуры НРТ на совершенство цикла можно охарактеризовать следующим образом.

Эффективность цикла растёт с увеличением перегрева (для НРТ $ds/dT < 0$) и начального давления.

В качестве приводов ГПА используются преимущественно ГТУ работающие по простейшему термодинамическому циклу. На рис. 4 приведены термодинамические циклы комбинированных ГТУ, работающих по регенеративному и безрегенеративному циклам совместно с УЭК на НРТ, а на рис. 5 приведены термодинамические цик-

лы теплофикационного УЭК для различных температур наружного воздуха [1-6].

Изложенный подход использован для определения эффективности циклов УЭК с различными рабочими телами (рис. 6). В расчетах принята температура конденсации пара НРТ в конденсаторе 40°C . При этом давление пара в конденсаторе различно и определяется типом НРТ. Из рисунка следует, что повышение начальной температуры приводит к росту эффективного КПД. Расчетно-теоретическими исследованиями установлено, что, например, для пентана в области реальных значений начального давления имеется пологий оптимум. Параметры сравниваемых циклов рассматриваемых рабочих тел выбраны исходя из большого опыта работы известных утилизационных установок.

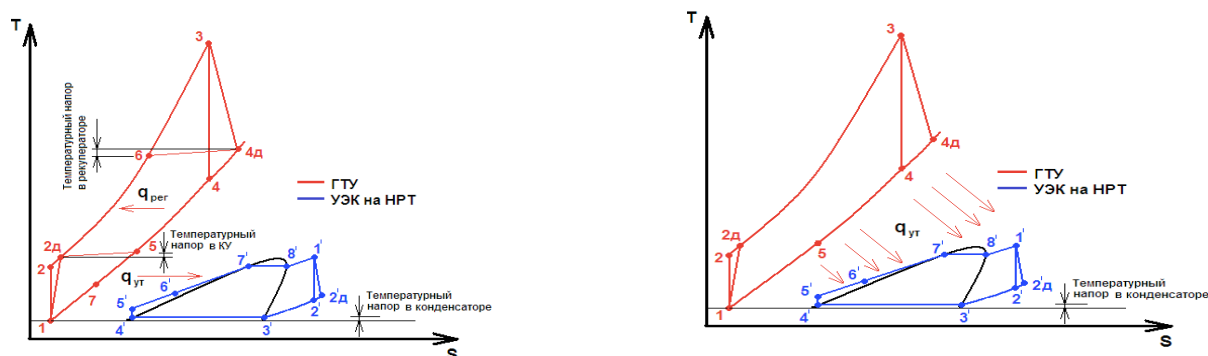


Рис. 4. Термодинамические циклы ГТУ ГПА с УЭК на НРТ

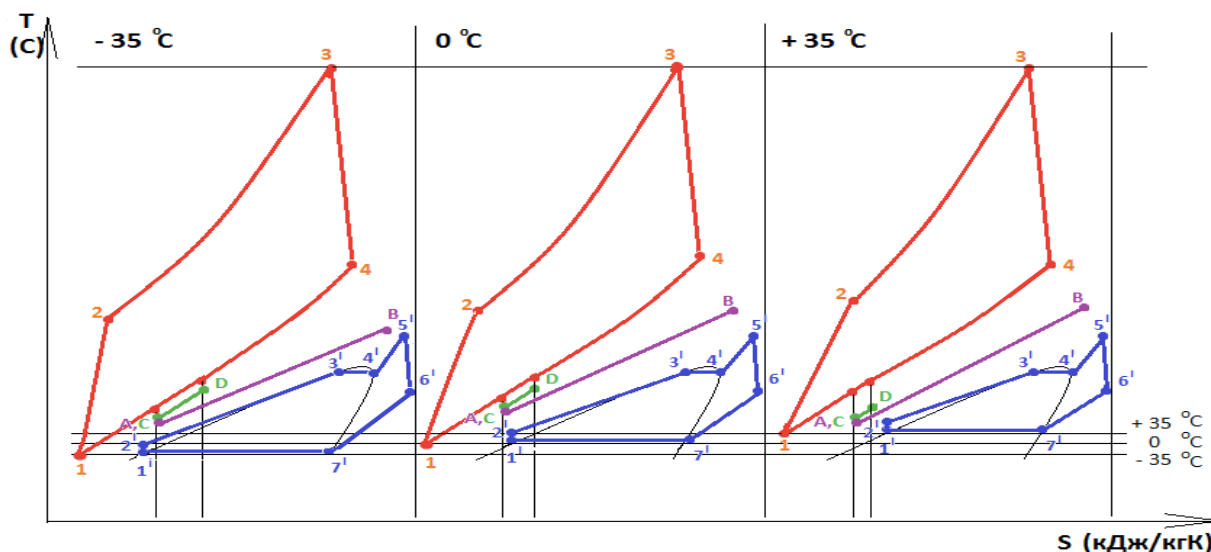


Рис. 5. Влияние температуры наружного воздуха на конфигурацию термодинамического цикла теплофикационного утилизационного контура

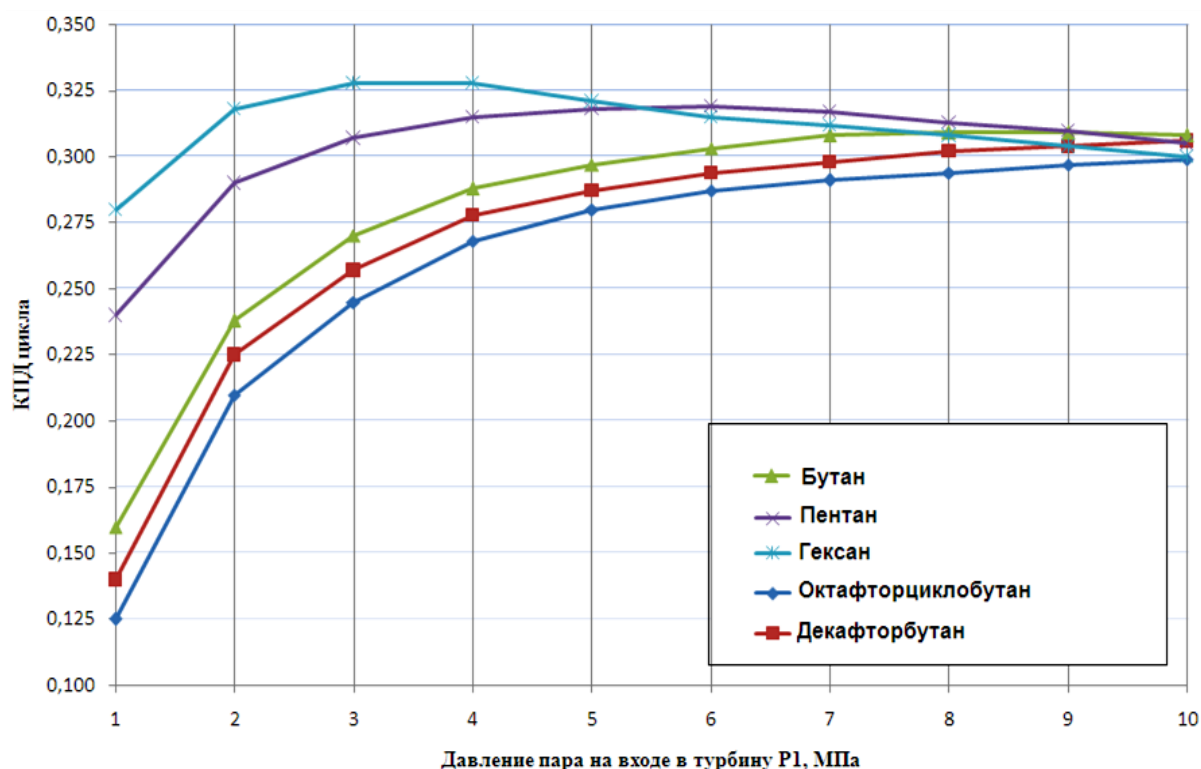


Рис. 6. Влияние начальных параметров пара НРТ на эффективный КПД циклов

Температура пара на входе в турбину задавалась одинаковой. Давление пара на входе в турбину было выбрано на основе численного анализа зависимости внутреннего КПД цикла от давления пара перед турбиной. Зависимости внутреннего КПД имеют характерный максимум, значения которого для гексана и пентана достигаются при более низких давлениях соответственно, при 4 и 5 МПа. Для бутана, октафторциклобутана и декафторбутана темп роста КПД с ростом давления существенно замедляется. Поэтому в циклах на данных веществах было выбрано давление? равное 10 МПа. Температура конденсации для сравниваемых циклов была одинаковой и равной 40°C. Температура пара на входе в конденсатор определялась условиями работы регенеративного теплообменника и она была всегда выше температуры жидкой фазы после сжатия в насосах на 5°C [3].

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

– бутаны (бутан и изобутан) дают сопоставимые показатели вырабатываемой мощности, значительно (порядка 30%) превышающие мощность вырабатываемую

пентанами (н-пентан, изопентан и неопентан), однако требуют более низких температур конденсации (ниже нуля);

– пентаны также вырабатывают сопоставимое количество энергии, при этом допускают более высокие температуры конденсации по сравнению с бутанами (выше нуля);

– циклопентан и н-гексан не способны работать во всем интервале заданных температур и давлений, оставаясь в жидком состоянии перед турбиной при температуре 190 и 215°C соответственно, при этом н-гексан вырабатывает энергии меньше других рассматриваемых НРТ;

– оптимальным НРТ является бутан, он способен вырабатывать сопоставимое с изобутаном количество энергии при этом имеет температуру конденсации значительно выше;

– вместе с тем, большую часть времени в течение года (7-9 месяцев) и бутан и изобутан способны конденсироваться и вырабатывать значительное количество энергии, а в теплое время года с целью конденсации будет необходимо поддерживать более высокое давление на выходе из турбины.

Для окончательного выбора НРТ выполнен расчет площади теплообменного оборудования. Результаты проведенных расчетов показывают, что у бутанов разница площадей регенератора составляет 2%, а подогревателей 11%, у пентанов 1,5 и 13%

соответственно. В целом разница между минимальным и максимальным значением составляет 21% и не является критичным показателем, исключающим использование того или иного НРТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергоутилизационная установка с пентановым рабочим циклом / Ю.С. Бухолдин, В.М. Олифиренко, В.П. Парафейник и др. // Компрессорное и энерг. машиностроение. 2005. № 1. С. 10.

2. **Гринман М.И.** Перспективы применения энергетических установок с низкотемпературными рабочими телами / М.И. Гринман, В.А. Фомин // Реконструкция энергетики 2009: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 2009.

3. **Ларин Е.А.** Выбор схем и параметров утилизирующего энергетического контура ГТУ / Е.А. Ларин, С.В. Ялов // Вестник СГТУ. 2008. № 1(31). С. 217-223.

4. Энергоутилизационная установка с пентановым рабочим циклом / Ю.С. Бухолдин и др. // Газотурбинные технологии. 2005. № 1-2. С. 10-16.

5. **Гринман М.И.** Перспективы применения энергетических установок с низкотемпературным рабочим телом [Электронный ресурс] / М.И. Гринман, В.А. Фомин // Экологические системы: электронный журнал энергетической компании. 2011. № 2. Режим доступа: http://esco.co.ua/journal/2011_2/art069.htm.

6. **Chen H.** A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat / H. Chen, D.Y. Goswami, E. Stefanakos // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14. P. 3059-3067.

7. **Claus W.** Langzeitbetriebserfahrungen mit der ORC-anlage zur Niedertemperaturverstromung im Werk Lengfurt / W. Claus, T. Kolbe // ZKG. 2002. Vol. 55. № 10. P. 78-86

Ларин Евгений Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ялов Сергей Владимирович – аспирант кафедры «Тепловая и атомная энергетика», директор техникума газовой промышленности, г. Новый Уренгой

Evgeny A. Larin – PhD, Professor, Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Sergei V. Yalov – Postgraduate, Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Director at Gas Industry Training School, Novy Urengoy

Статья поступила в редакцию 20.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.032.213

ИССЛЕДОВАНИЯ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ КАТОДОВ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

О.Д. Тищенко, А.А. Тищенко, А.Я. Зоркин

RESEARCH OF SECONDARY EMISSION PROPERTIES OF CATHODES OF ELECTRIC VACUUM DEVICES

O.D. Tishchenko, A.A. Tishchenko, A.Ya. Zorkin

Проведены исследования вторично-эмиссионных свойств катодов электронно-лучевым методом на установке контроля характеристик эмиссионных материалов. Получена зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии первичных электронов для выборочных образцов из двух партий. Проведение исследования вторично-эмиссионных свойств выборочных образцов импрегнированных катодов позволяет выявить нарушение технологических режимов изготовления импрегнированных катодов до постановки их в прибор и повысить выход годных приборов.

Ключевые слова: *катод, вторично-эмиссионные свойства, коэффициент вторичной электронной эмиссии*

В настоящее время электровакуумные приборы (ЭВП) СВЧ находят широкое применение и удерживают лидирующее положение во многих областях науки и техники. Это связано с тем, что малая величина мощности излучения современных полупроводниковых приборов, низкая температурная и радиационная устойчивость, определяемая свойствами самих полупроводниковых материалов и р-п переходов, существенно сужают область их применения. К достоинствам электровакуумных приборов следует отнести длительный срок службы и достаточно высокую надёжность в работе [1].

We present a research into the secondary emission properties of cathodes by the electron beam method using installations for controlling the characteristics of emission materials. The dependence of the secondary electron emission coefficient on the energy of the primary electrons related to two-batch samples is obtained. A study into the secondary emission properties of impregnated cathode samples allows to detect the faults in the technology of impregnated cathodes prior to their installation into devices, and increase the output of the known-good devices.

Keywords: *cathode, secondary emission properties, coefficient of the secondary electron emission*

Электровакуумные усилители широко используются в военной и гражданской аппаратуре, требующей большой мощности на высоких частотах. В коммерческих спутниковых системах связи, телевидении, промышленном нагреве, радиолокационных станциях управления воздушным сообщением также в основном применяются электровакуумные усилители, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую надёжность при больших мощностях и высоком КПД [2, 3].

Качество ЭВП в основном определяется долговечностью и надёжностью катодных систем. Исследование, разработка, изготов-

ление и поддержание в процессе эксплуатации совершенных параметров катодов представляют собой одну из важнейших задач процесса создания современных электровакуумных приборов. Катоды должны эмитировать необходимый поток электронов и в течение всего срока службы прибора быть устойчивыми к бомбардировке заряженными частицами [4, 5].

Контроль эмиссионных параметров катодов – необходимая составляющая процесса при создании современных и пер-

спективных типов электровакуумных приборов. Количественной характеристикой явления вторичной электронной эмиссии служит коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ). Этот коэффициент численно равен отношению числа всех вторичных электронов к числу первичных электронов [6].

В данной работе измерение коэффициента вторичной электронной эмиссии проводилось на установке контроля характеристик эмиссионных материалов (рис. 1).



Рис. 1. Установка контроля характеристик эмиссионных материалов

Для исследования вторично-эмиссионных свойств катода использовался электронно-лучевой метод, дающий наибольшую точность. Исследования вторично-эмиссионных свойств проводились на образцах 1 (образец из первой партии импрегнированных катодов) и 2 (образец из второй партии импрегнированных катодов), отожженных в вакууме при температуре 1200°C, имеющих форму диска диаметром 10 мм. Вакуум в процессе измерения был не хуже $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Энергия луча первичных электронов при измерении вторично-эмиссионных свойств регулировалась в пределах от 50 до 1800 эВ.

На рис. 2 приведена зависимость КВЭЭ от энергии первичных электронов.

Из рис. 2 мы видим, что КВЭЭ зависит от партии, из которой взят образец и энер-

гии первичных электронов. Зависимость КВЭЭ имеет явно выраженный максимум 2,8. Необходимое значение КВЭЭ для импрегнированных катодов должно быть не ниже 2,6 и достигаться при энергии первичных электронов от 400 до 600 эВ. Рост КВЭЭ на участке до 400 эВ обусловлен тем, что увеличивается энергия, передаваемая вторичным электронам при каждом падении первичного. Одновременно возрастает и глубина проникновения первичного электрона и, следовательно, путь вторичного электрона к поверхности. На этом пути вторичный электрон, сталкиваясь с другими электронами, теряет энергию. Потери энергии нарастают более быстрым темпом и становятся доминирующим фактором в динамике КВЭЭ, приводя к его уменьшению (энергия первичных электронов от 800 эВ).

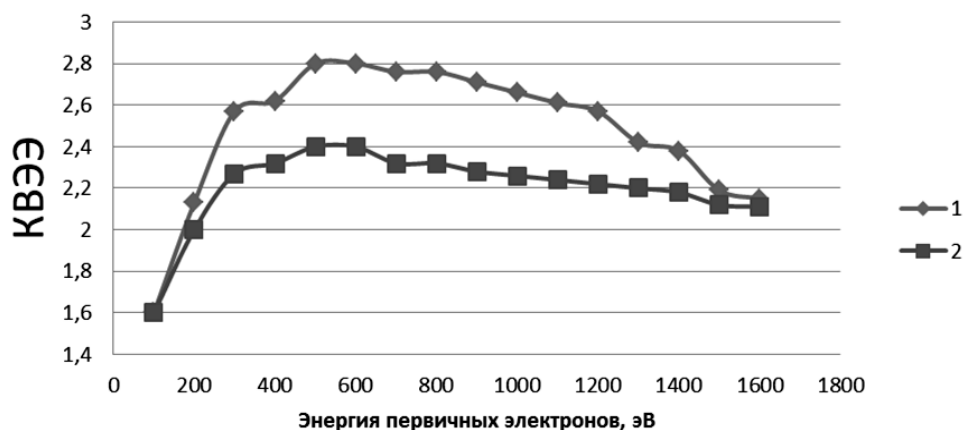


Рис. 2. Зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии первичных электронов

Таким образом, проведение исследования вторично-эмиссионных свойств выборочных образцов импрегнированных катодов позволяет выявить нарушение технологических режимов изготовления импрегнированных катодов до постановки их в прибор и повысить выход годных приборов. Так, образец 2 имеет низкие (недопустимо

низкие значения для импрегнированных катодов) вторично-эмиссионные свойства в отличие от образца 1, из чего следует вывод, что вторая партия катодов изготовлена с нарушением режимов технологии изготовления и применение данных катодов для производства электровакуумных приборов недопустимо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. М.: Радиотехника, 2005. 352 с.
2. **Канащенков А.И.** Электронные СВЧ-компоненты – база настоящих и будущих радиолокационных систем / А.И. Канащенков, В.В. Копылов, В.Я. Рогов // Электроника: наука, технология. Бизнес. 2003. № 7. С. 26-29.
3. Мощные ЛБВ сантиметрового диапазона длин волн / Г.В. Рувинский, О.Н. Аристархова, Е.А. Котюргин, А.С. Победоносцев // Вакуумная электроника СВЧ. Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2002. С. 49-53.

4. **Aida T.** Emission life and surface analysis of barium-impregnated thermionic cathodes / T. Aida, H. Tanuma, S. Sasaki et al. // Journal of Applied Physics. 1993. Vol. 74. № 11. P. 6482-6487.
5. **Мельникова И.П.** Эмиссионные свойства металлопористых катодов / И.П. Мельникова, В.Н. Лясликов, А.В. Лясликова. Самара: Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 2. С. 84-90.
6. **Фридрихов С.А.** Физические основы электронной техники / С.А. Фридрихов, С.М. Мовнин. М.: Высш. шк., 1982. 608 с.

Тищенко Ольга Дмитриевна – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тищенко Артем Александрович – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga D. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Artem A. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Alexander Ya. Zorkin – Dr.Sc., Professor
Department of Welding and Metallurgy, Yuri
Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.02.18, принята к опубликованию 28.03.18

УДК 621.3.032.213

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ В МОНОЛИТНО-ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ

И.В. Перинская

PERSPECTIVES FOR THE ION-BEAM METHOD UTILIZATION IN MONOLITHIC AND INTEGRATED TECHNOLOGIES OF MICROWAVE MICROELECTRONICS

I.V. Perinskaya

Статья посвящена перспективам создания новой технологической базы на основе совместимых между собой лучевых методов обработки материалов на основе ионно-лучевого модифицирования. Единство физико-химической природы, высокая локальность, многообразие электрофизических и химических воздействий ионно-лучевого модифицирования на полупроводники, металлические и диэлектрические материалы в технологии микроволновых приборов и компонентов, в принципе обеспечивают проведение всех основных технологических операций и их интеграцию в замкнутый автоматизированный технологический цикл, что гарантирует повышение воспроизводимости, качества, процента выхода годных микросхем.

Ключевые слова: ионно-лучевая обработка, ионная модификация, микроэлектроника СВЧ

The article is devoted to the prospects of creating a new technology based on the compatible beam method for processing ion-beam modification materials. A unity of the physical and chemical natures, high locality, variety of electrophysical and chemical effects of the ion-beam modification on semiconductors, metal and dielectric materials in the technology of microelectronic devices and components, ensure the main technological operations and their integration into a closed automated technological cycle, which guarantees an increase in reproducibility, quality, and output percentage of the usable chips.

Keywords: ion-beam treatment, ionic modification, microwave microelectronics

Перспективы совершенствования и расширения областей применения технологии ионного легирования полупроводниковых материалов в значительной мере определяются общими тенденциями в развитии микроэлектроники. Одна из таких тенденций в области технологии, наглядно проявляющаяся в микроэлектронике СВЧ диапазона, связана с интенсивными разработками монолитных интегральных схем (МИС), представляющих новое поколение интегральных схем, следующих за гибридными схемами. Основным преимуществом МИС является более полная реализация требований к радиокомпонентам: малая стоимость (в условиях массового производства), высокая надежность и воспроизводимость характеристик, малые габаритные размеры и масса, универсальность схемотехники, возможность размещения многофункциональных узлов на одном чипе.

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

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

В развитии технологии СВЧ устройств прослеживаются два направления. Первое связано с совершенствованием способов сборки или компоновки устройств. Оно обусловило переход от пайки к микросварке и, в конечном итоге, к созданию устройств из отдельных чипов, то есть компонентов РЭА на одном кристалле, осуществляющих однократное преобразование сигнала. Второе направление связано с уменьшением числа компонентов, из которых создается сложное устройство, и с соответствующим усложнением функций и топологии отдельных компонентов (чипов). Первое направление отражает все более полную реализацию принципа схематической интеграции, второе находит логическое завершение в МИТ.

Существующее определение МИТ как способа формирования всех активных и пассивных элементов схемы, а также межсоединений в объеме или на поверхности полупроводниковой подложки [1] не полностью учитывает содержание и отличительные признаки нового этапа в развитии технологии. Так, очевидным признаком МИС – исполнение на одном твердом носителе – обладают уже разработанные чипы и отдельные элементы схем. Неопределенным является и выделение МИС по функциональному признаку, то есть как компонентов, выполняющих достаточно сложную функцию, так как простейшие компоненты (реактивности, активные приборы) в принципе всегда могут быть изготовлены в монолитном исполнении, а для сверхсложных схем неизбежна схематическая интеграция нескольких компонентов. Кроме того, существующие чипы содержат несколько элементов схемы, а групповое изготовление приборов на одном кристалле является общей особенностью микроэлектроники. Следовательно, топологическая сложность и количество элементов на кристалле также не являются специфическими признаками МИС.

В общем случае МИС содержит элементы, различные не только по принципу работы и функциональным назначениям, но и по технологическому исполнению, то есть по числу и последовательности выполнения

технологических операций. Технологическая неоднородность элементов, выполненных на одной пластине, является важнейшим признаком, отличающим МИС от других компонентов и определяющим требования к МИТ. Технологическая неоднородность элементов, несущественная для простых компонентов (например, активный элемент и резистор), обязательно учитывается при выборе схемы сложных устройств и вынуждает в настоящее время создавать технологически несовместимые элементы (в частности, параметрический диод, полевой транзистор) на разных чипах.

В современной технологии применяются, как правило, тотальные операции (например, полупроводниковые и диэлектрические слои наносятся на всю поверхность пластины), и формирование локальных элементов осуществляется лишь на стадии литографии. Такой подход при изготовлении МИС обуславливает их неконкурентоспособность из-за большого числа необходимых операций совмещения. В силу этого в МИТ становятся локальными (или локально-селективными) все основные операции (легирование, изоляция и пассивация и т.д.). Выполнение таких операций на одном твердом носителе требует их максимальной совместимости между собой как топологически (на одной пластине), так и технологически (в одном техпроцессе). Поэтому важным требованием, предъявляемым к МИТ, является замкнутость технологического процесса. Оптимальным путем реализации замкнутого техпроцесса служит использование единых по физико-химической природе методов при проведении различных операций.

Условие создания замкнутого технологического цикла, дополненное требованием локальности, резко сокращает набор базовых физико-химических процессов. В настоящее время общепризнано, что МИТ будет основываться на процессах многослойной прецизионной металлизации (создание электродов и пассивных элементов), субмикронной литографии и локального травления (создание топо-

гии), локально-селективной ионной имплантации (создание полупроводниковых структур), причем три последних процесса реализуются на базе ионно-лучевых методов.

Таким образом, МИТ связана с переходом от схемотехнической к технологической интеграции и может быть определена как способ формирования технологически неоднородных схем в объеме или на поверхности одного твердого носителя, основанный на применении локально-селективных, полностью совместимых между собой операций и единого физико-химического метода, реализующего замкнутый технологический процесс.

Универсальная МИТ должна содержать набор стандартных операций. Технологические особенности различных устройств, созданных МИТ, состоят лишь в различной последовательности их выполнения, то есть каждый конкретный прибор имеет свой технологический код. При определении последовательности операций МИТ необходимо учитывать, что микроэлектронные устройства создаются путем послойного синтеза структуры МИС и литографического формирования топологии отдельных слоёв.

Структура МИС состоит из металлических, полупроводниковых и диэлектрических областей, в общем случае выполненных в виде мез и подвергнутых защите от химических воздействий. Это требует операций создания активных полупроводниковых структур, металлизации, изоляции, пассивации и травления. Литография требует операции экспонирования, так как маскирование и перенос изображений дублируются операциями травления и формирования слоев с заданными свойствами. Принцип послойного формирования дополняет этот перечень операций совмещения изображений. Предшествуют техпроцессу, завершают и обеспечивают техпроцесс вспомогательные операции: контроль, изготовление подложек и литографических шаблонов, разделение матриц на отдельные схемы. МИТ может эффективно применяться при изготовлении

устройств как интегральной, так и функциональной микроэлектроники. По-видимому, можно считать, что определяющей тенденцией развития интегральной микроэлектроники является уменьшение размеров простейших элементов при неизменности выполняемой ими функции и их элементная интеграция для реализации сложных функций. В функциональной микроэлектронике эта цель достигается при постоянном объеме устройств за счет интеграции рабочих полей различных физических эффектов, их одновременного и комбинированного применения. Поэтому в интегральной микроэлектронике МИТ является наилучшим, а в функциональной микроэлектронике — единственным способом создания элементной базы РЭА.

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

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

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

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

Использование ионно-лучевых процессов в качестве базового метода МИТ позволяет устранить ряд проблем изготовления МИС и обеспечивает как создание активных полупроводниковых слоев, так и выполнение других операций МИТ. Высокой эффективностью обладает процесс межэлементной изоляции путем локальной протонной бомбардировки [3] или имплантации ионов гелия [4]. Применение метода локальной изоляции позволяет создать абсолютно планарную МИС, не требующую мезотравления, что сокращает технологический процесс и увеличивает процент выхода годных на этапе металлизации.

Ионно-лучевая обработка ионами аргона обеспечивает пассивацию и улучшение свойств фоторезистивных покрытий, а также эффективное управление химической активностью металлических покрытий [4]. Все больше применение находят процессы ионно-лучевого распыления и травления металлов, уникальными техно-

логическими возможностями характеризуется ионная литография [3].

Существенно, что последовательное применение указанных процессов возможно в едином технологическом цикле путем простого изменения вида энергии и

дозы ионов. Ионно-лучевая технология эффективно сочетается с вакуумными процессами металлизации, импульсного и радиационного отжига, что позволит реализовать полный технологический цикл изготовления МИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пикро Г.** Ионная имплантация / Г. Пикро, П. Пирси. М.: Наука, 1985. № 5. С. 51-58.

2. **Пейфу Гу.** Воздействие ионной бомбардировки на свойства тонких пленок / Гу Пейфу, Тан Узиньфа. Китай: Гюансюэ сюэбао, 1984. Т. 12. С. 1088-1093.

3. **Перинская И.В.** Ионно-лучевая нанотехнология и компоненты монолитных

СВЧ устройств / И.В. Перинская, В.В. Перинский, В.Н. Лясников. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 142 с.

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

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

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

Статья поступила в редакцию 01.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

УДК 621.341.572

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ

Е.Е. Миргородская, В.А. Колчев, Н.П. Митяшин, Е.Д. Карнаухов

STABILIZATION OF OUTPUT VOLTAGE PARAMETERS OF MULTILEVEL INVERTERS

E.E. Mirgorodskaya, V.A. Kolchev, N.P. Mityashin, E.D. Karhaukhov

Проводится анализ влияния качества стабилизации напряжений уровней многоуровневого инвертора напряжения на параметры качества его выходной кривой. Представленная методика анализа, применимая к инверторам с любым числом уров-

The paper analyses the impact of the voltage stabilization quality of the levels of the multilevel voltage inverter on the quality parameters of its output curve. The presented analysis technique is applicable to inverters with any number of levels, and allows for es-

ней, позволяет оценивать чувствительность величины отдельных гармоник выходной кривой и ее качества в целом к точности реализации уровней напряжения.

Ключевые слова: многоуровневые инверторы напряжения, стабилизация напряжения уровня, спектр, показатели качества кривой выходного напряжения, чувствительность

Постановка задачи. В схемах многоуровневых инверторов напряжения (МИН) требуемое качество кривой выходного напряжения преобразователя достигается ценой усложнения его звена постоянного тока (ЗПТ). Оно должно обеспечивать несколько стабилизированных постоянных напряжений питания инвертора для образования необходимых уровней его выходной кривой. Каждое из этих напряжений формируется на выходном конденсаторе соответствующего канала [1, 2].

Для получения высокого качества выходной кривой преобразователя необходимо обеспечивать индивидуальную или групповую стабилизацию напряжения каждого канала ЗПТ. При этом следует учитывать, что качество такой стабилизации, осуществляемой системой стабилизации напряжения уровней (ССНУ), может оказывать влияние не только на стабильность выходного напряжения МИН, но и на качество кривой этого напряжения. Поэтому представляет интерес задача исследования влияния качества стабилизации напряжений уровней МИН на параметры качества выходного напряжения. В частности, целесообразно рассматривать такое влияние на коэффициенты гармонических составляющих выходной кривой напряжения $k_{U(i)}$, ($i = \overline{2, 40}$) и суммарного коэффициента гармонических составляющих выходной кривой напряжения k_U [3].

Методика исследования. Применяемую в статье методику рассмотрим на примере четырехуровневой кривой (см. рисунок). На рисунке через θ_k , ($k = \overline{0, 15}$) обозначены электрические углы переключения

timing the sensitivity rate of individual harmonics in the output curve and its quality to the accuracy of the voltage levels.

Keywords: multilevel voltage inverters, stabilization of voltage level, spectrum, quality indicators of the output voltage curve, sensitivity

уровней напряжения, а через L_j , ($j = \overline{1, 4}$) – величины напряжений уровней.

Введем вспомогательные функции $V_j(\theta)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} V_1(\theta) &= S_0(\theta) + S_7(\theta) - S_8(\theta) - S_{15}(\theta); \\ V_2(\theta) &= S_1(\theta) + S_6(\theta) - S_9(\theta) - S_{14}(\theta); \\ V_3(\theta) &= S_2(\theta) + S_5(\theta) - S_{10}(\theta) - S_{13}(\theta); \\ V_4(\theta) &= S_3(\theta) + S_4(\theta) - S_{11}(\theta) - S_{12}(\theta); \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$S_i(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}) \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (i = \overline{0, 15}). \quad (2)$$

Каждая функция $V_j(\theta)$ выделяет тот участок периода, на котором выходная кривая должна быть равна L_j или $-L_j$, в связи с чем ее можно назвать носителем j -го уровня. Их графики для четырехуровневой кривой приведены на рисунке.

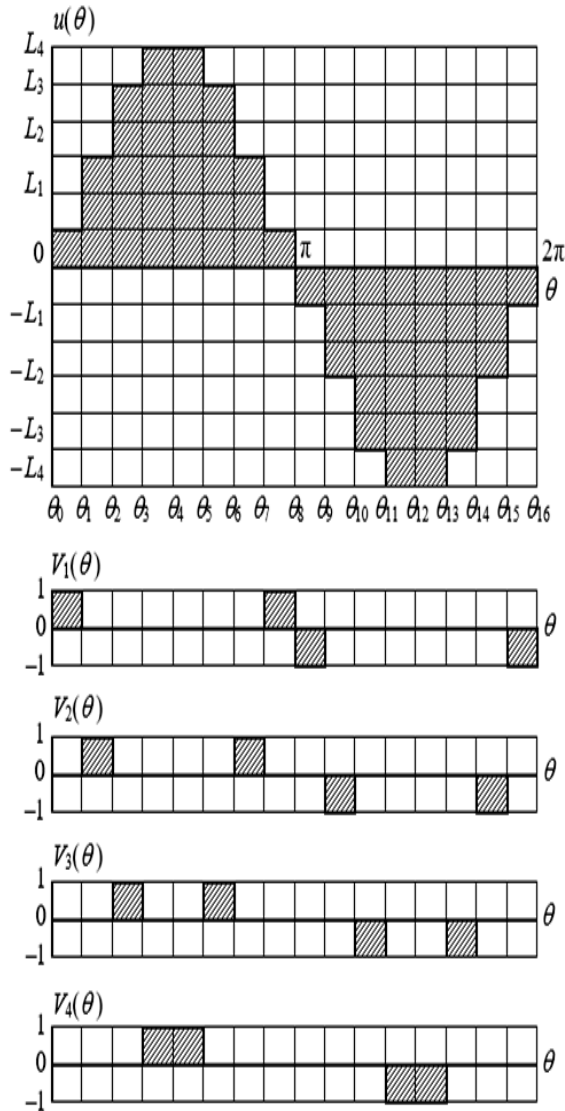
С помощью введенных функций четырехуровневая кривая может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} u(\theta) &= L_1 \cdot V_1(\theta) + L_2 \cdot V_2(\theta) + \\ &+ L_3 \cdot V_3(\theta) + L_4 \cdot V_4(\theta). \end{aligned} \quad (3)$$

Представленное разложение позволяет по новому, в отличие от [4], исследовать влияние на качество выходной кривой инвертора как амплитудного фактора (точности поддержания оптимальных значений L_j), так и временного фактора (изменения функций $V_j(\theta)$ при варьировании углов коммутаций θ_k).

Влияние качества стабилизации напряжений уровней на качество выходной кривой при равноудаленном расположении углов коммутации. Рассмотрим разложение функции $V_j(\theta)$ в ряд Фурье.

Ограничимся для краткости только коэффициентами разложения по синусам до 40-й гармоники. Пусть $a_{j(i)}$ – амплитуда i -й гармоники этого разложения.



Тогда амплитуда i -й гармоники выходной кривой по синусам равна

$$u_{(i)} = L_1 \cdot a_{1(i)} + L_2 \cdot a_{2(i)} + L_3 \cdot a_{3(i)} + L_4 \cdot a_{4(i)}. \quad (4)$$

Аналогичное выражение имеет место и для разложения по косинусам.

Разложения функций $V_j(\theta)$ в ряды Фурье, то есть наборы коэффициентов $\{a_{j(i)}\}$, ($i = \overline{1, 40}$), определяются способом расположения углов коммутаций θ_k , ($k = \overline{0, 15}$) на оси электрического угла θ . Рассмотрим вна-

чале равноудаленное расположение углов θ_k , то есть положим $\theta_{k+1} - \theta_k = \pi/8$, ($k = \overline{0, 15}$). Соответствующие спектры разложений функций $V_j(\theta)$ в ряды Фурье по синусам, то есть зависимости коэффициентов $a_{j(i)}$ от номеров гармоник i и уровней j , приведены в табл. 1. При выбранном расположении углов θ_k коэффициенты разложения по косинусам, а также четные гармоники разложений по синусам равны нулю.

Значение формулы (4) состоит, в частности, в возможности оценивать чувствительность каждой гармоники к точности реализации уровней L_j .

Обозначим через L_j^0 , ($j = \overline{1, 4}$) оптимальные значения напряжений уровней для данного расположения углов θ_k . Тогда при $L_j = L_j^0$ формула (3) обеспечивает оптимальную форму кривой выходного напряжения, а формула (4) – ее оптимальный спектр $\{u_i^0\}$. В настоящей работе, ориентируясь на идеальную синусоиду единичной амплитуды, в качестве величин L_j^0 выбраны квазиоптимальные значения, рассчитываемые по формулам

$$L_j^0 = \frac{\sin(\theta_{j-1}) + \sin(\theta_j)}{2}, \quad \mathbf{B}; (j = \overline{1, 4}),$$

что дает

$$L_1^0 = 0,191\mathbf{B}; \quad L_2^0 = 0,545\mathbf{B};$$

$$L_3^0 = 0,815\mathbf{B}; \quad L_4^0 = 0,962\mathbf{B}.$$

Действующее значение такой квазиоптимальной кривой равно 0,693 В, суммарный коэффициент гармонических составляющих равен 9,93%. Амплитуды ее гармоник, рассчитанные по формуле (4) при $L_j = L_j^0$, приведены в последнем столбце табл. 1.

Пусть ССНУ обеспечивает относительную погрешность каждого уровня, не превышающую по модулю граничного значения ε . Это соответствует максимальным значениям абсолютных погрешностей

$$\Delta L_j = \varepsilon_j \cdot L_j^0, \quad (5)$$

где $\varepsilon_j = \pm \varepsilon$.

Таблица 1

Коэффициенты $a_{j,(i)}$ разложений функций $V_j(\theta)$ и квазиоптимальной кривой $u_{(i)}$ в ряды Фурье по синусам нечетных гармоник при равноудаленном расположении углов коммутации θ_k

i	$a_{1,(i)}$	$a_{2,(i)}$	$a_{3,(i)}$	$a_{4,(i)}$	$u_{(i)}, \text{ В}$
1	0,097	0,276	0,413	0,487	0,974
3	0,262	0,463	0,092	-0,392	0,000
5	0,352	0,083	-0,415	0,235	0,000
7	0,350	-0,297	0,198	-0,070	0,000
9	0,272	-0,231	0,154	-0,054	0,000
11	0,160	0,038	-0,189	0,107	0,000
13	0,060	0,107	0,021	-0,090	0,000
15	0,006	0,018	0,028	0,032	0,065
17	0,006	0,016	0,024	0,029	0,057
19	0,041	0,073	0,015	-0,062	0,000
21	0,084	0,020	-0,099	0,056	0,000
23	0,107	-0,090	0,060	-0,021	0,000
25	0,098	-0,083	0,056	-0,019	0,000
27	0,065	0,015	-0,077	0,044	0,000
29	0,027	0,048	0,010	-0,041	0,000
31	0,003	0,009	0,013	0,016	0,031
33	0,003	0,008	0,013	0,015	0,030
35	0,022	0,040	0,008	-0,034	0,000
37	0,048	0,011	-0,056	0,032	-0,000
39	0,063	-0,053	0,036	-0,012	-0,000

Таким образом, значение $\varepsilon = 0,02$ соответствует 2%, $\varepsilon = 0,04$ – 4% точности стабилизации уровней и т.д.

Поставим задачу нахождения максимальных значений амплитуд гармоник, соответствующих заданному значению ε . Для этого для каждой гармоники подберем наихудшее для нее сочетание знаков в формуле (5).

Из формулы (4) следует, что отклонение амплитуды этой гармоники от ее оптимального значения равно

$$\Delta u_{(i)} = \Delta L_1 \cdot a_{1,(i)} + \Delta L_2 \cdot a_{2,(i)} + \Delta L_3 \cdot a_{3,(i)} + \Delta L_4 \cdot a_{4,(i)}. \quad (6)$$

Вначале для определенности рассмотрим гармонику, оптимальное значение амплитуды которой u_i^0 неотрицательно. Тогда, поскольку

$$u_{(i)} = u_{(i)}^0 + \Delta u_{(i)},$$

то максимальное значение амплитуды $u_{(i)}$ имеет место, если правая часть формулы (6) имеет максимальное положительное значение. Из табл. 1 следует, что для каждой гармоники, в том числе для i -й, имеет место определенное распределение знаков для коэффициентов $a_{1,(i)}, a_{2,(i)}, a_{3,(i)}, a_{4,(i)}$. Положим

$$z_{j,(i)} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{j,(i)} \geq 0 \\ -1, & \text{если } a_{j,(i)} < 0 \end{cases}, (j = \overline{0,4}, i = \overline{0,15}). \quad (7)$$

Тогда

$$a_{j,(i)} = z_{j,(i)} \cdot |a_{j,(i)}|. \quad (8)$$

Подставив формулы (5) и (8) в формулу (6), получим

$$\Delta u_{(i)} = \varepsilon_1 \cdot z_{1,(i)} \cdot L_1^0 \cdot |a_{1,(i)}| + \varepsilon_2 \cdot z_{2,(i)} \cdot L_2^0 \cdot |a_{2,(i)}| + \varepsilon_3 \cdot z_{3,(i)} \cdot L_3^0 \cdot |a_{3,(i)}| + \varepsilon_4 \cdot z_{4,(i)} \cdot L_4^0 \cdot |a_{4,(i)}|.$$

Положим

$$\varepsilon_j = z_{j,(i)} \cdot \varepsilon, \quad (9)$$

то есть рассмотрим случай, когда стабилизация уровней осуществляется на верхней границе уровня j , если $a_{j,(i)} > 0$, и на нижней границе, если $a_{j,(i)} < 0$. Тогда максимальная абсолютная погрешность реализации оптимальной амплитуды i -й гармоники будет иметь следующее положительное значение

$$\Delta u_{i+1} = \varepsilon(L_j^0 \cdot |a_{1,(i)}| + L_2^0 \cdot |a_{2,(i)}| + L_3^0 \cdot |a_{3,(i)}| + L_4^0 \cdot |a_{4,(i)}|),$$

а максимальное значение амплитуды i -й гармоники равно

$$u_{(i)}^m = \sum_{j=1}^4 (1 + \varepsilon_j) \cdot L_j^0 \cdot a_{j,(i)}. \quad (10)$$

Если оптимальное значение амплитуды i -й гармоники отрицательно, то формула (10) остается верной, однако вместо формулы (9) следует использовать формулу

$$\varepsilon_j = -z_{j,(i)} \cdot \varepsilon. \quad (11)$$

Учтем теперь, что формула (10) справедлива и для основной гармоники. Следовательно, для расчета коэффициентов гармонических составляющих напряжения относительно основной гармонической составляющей имеем формулу

$$k_{U(i)} = \frac{\sum_{j=1}^4 (1 + \varepsilon_j) \cdot L_j^0 \cdot a_{j,(i)}}{\sum_{j=1}^4 (1 + \varepsilon_j) \cdot L_j^0 \cdot a_{j,(1)}}. \quad (12)$$

Из табл. 1 следует, что все коэффициенты для первой гармоники $a_{j,(1)}$ положительны. Если для некоторой высшей гармоники это также справедливо, то для нее все $\varepsilon_j = +\varepsilon$ и, следовательно,

$$k_{U(i)} = \frac{\sum_{j=1}^4 (1 + \varepsilon) \cdot L_j^0 \cdot a_{j,(i)}}{\sum_{j=1}^4 (1 + \varepsilon) \cdot L_j^0 \cdot a_{j,(1)}} = \frac{\sum_{j=1}^4 L_j^0 \cdot a_{j,(i)}}{\sum_{j=1}^4 L_j^0 \cdot a_{j,(1)}} = k_{U(i)}^0,$$

то есть несмотря на то, что абсолютное значение рассматриваемой гармоники увеличивается, ее относительное по отношению к основной гармонике значение оста-

ется оптимальным. В соответствии с табл. 1 такими гармониками в данном варианте распределения углов коммутаций θ_k являются 15-я, 17-я, 31-я и 33-я.

Для остальных рассматриваемых гармоник по крайней мере один из коэффициентов ε_j отрицательный. Это означает, что амплитуда основной гармоники при таком сочетании знаков погрешностей уровней уменьшается по отношению к ее оптимальному значению. Из формулы (12), таким образом, следует, что относительные значения этих гармоник увеличиваются не только за счет увеличения их абсолютных значений (числителей), но и за счет уменьшения амплитуды основной гармоники (знаменателя).

Результаты расчетов по описанной методике максимально возможных значений коэффициентов гармонических составляющих выходной кривой напряжения $k_{U(i)}^{\max}$, выраженных в процентах от значения основной гармоники, показаны в табл. 2. Как следует из вышеизложенного, эти значения достигаются при различных для разных гармоник сочетаниях граничных значений напряжений уровней. В последнем столбце табл. 2 приведены значения $k_{U(i)}^{\text{opt}}$ для кривой при оптимальных значениях напряжений уровней.

Максимально возможные значения суммарного коэффициент гармонических составляющих выходной кривой напряжения k_U , выраженного в процентах от значения основной гармоники, приведены в табл. 3. При этом знаки в первых четырех столбцах соответствуют вариантам выбора знака в формуле (5) для соответствующего граничного значения соответствующего уровня.

В последнем столбце табл. 3 приведены относительные значения отклонения действующего значения выходного напряжения от номинального значения δU при 10% отклонении напряжений уровней ($\varepsilon = 0,1$). Выделенная жирным шрифтом строка соответствует практически идеальной стабилизации выходного напряжения ($\delta U = 0,12\%$), что реализуется при 10% отрицательных отклонениях нижних

трех уровней, компенсируемых 10% положительным отклонением верхнего уровня. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих выходной кривой напряжения k_U имеет значение 14,05%, что значительно превосходит оптимальное значение, равное 9,93%. Такая же ситуация возникает при любых других значениях ε . Это свидетельствует о недостаточности стабилизации только выходного напряжения для обеспечения высокого качества кривой и необходимости индивидуальной стабилизации напряжения каждого уровня.

Влияние качества стабилизации напряжений уровней на качество выходной кривой при оптимальном расположении углов коммутации. Некоторое

улучшение гармонического состава кривой МИН при данном числе уровней может быть достигнуто за счет оптимизации расположения углов коммутаций θ_k , ($k = \overline{0,15}$). Для рассматриваемой четырехуровневой кривой оптимальные значения первых четырех углов в радианной мере таковы

$$\theta_0 = 0; \theta_1 = 0,262; \theta_2 = 0,541; \theta_3 = 0,925.$$

Для остальных углов значения распространяются по симметрии кривой рисунка. Соответствующие квазиоптимальные уровни равны

$$L_1^0 = 0,130 \text{ В}; L_2^0 = 0,387 \text{ В};$$

$$L_3^0 = 0,657 \text{ В}; L_4^0 = 0,899 \text{ В}.$$

Таблица 2

Максимально возможные значения коэффициентов гармонических составляющих выходной кривой напряжения $k_{U(i)}^{\max}$, выраженные в процентах от значения основной гармоники, рассчитанные при 2, 4, 6, 8 и 10% точности стабилизации уровней при равноудаленном расположении углов коммутации θ_k

i	$k_{U(i)}^{\max}, \%$					$k_{U(i)}^{\text{opt}}$
	$\varepsilon = 0,02$	$\varepsilon = 0,04$	$\varepsilon = 0,06$	$\varepsilon = 0,08$	$\varepsilon = 0,1$	$\varepsilon = 0$
3	1,55	3,10	4,66	6,21	7,77	0,00
5	1,40	2,82	4,25	5,70	7,17	0,00
7	0,94	1,90	2,86	3,84	4,82	0,00
9	0,73	1,48	2,23	2,98	3,75	0,00
11	0,64	1,28	1,93	2,59	3,26	0,00
13	0,36	0,72	1,07	1,43	1,79	0,00
15	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
17	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88
19	0,24	0,49	0,74	0,98	1,23	0,00
21	0,33	0,67	1,01	1,36	1,71	0,00
23	0,29	0,58	0,87	1,17	1,47	0,00
25	0,26	0,53	0,80	1,07	1,35	0,00
27	0,26	0,52	0,79	1,06	1,33	0,00
29	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80	0,00
31	3,23	3,23	3,23	3,23	3,23	3,23
33	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
35	0,13	0,27	0,40	0,53	0,67	0,00
37	0,19	0,38	0,57	0,77	0,97	0,00
39	0,17	0,34	0,51	0,69	0,87	0,00

Таблица 3

Максимально возможные значения суммарного коэффициент гармонических составляющих выходной кривой напряжения k_U при равноудаленном расположении углов коммутации θ_k

Относительные значения отклонений уровней				$k_U, \%$					$\delta U, \%$
ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	$\varepsilon = 0,02$	$\varepsilon = 0,04$	$\varepsilon = 0,06$	$\varepsilon = 0,08$	$\varepsilon = 0,1$	$\varepsilon = 0,1$
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	9,93	9,93	9,93	9,93	9,93	-10,00
ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	9,95	9,99	10,08	10,20	10,36	-9,58
$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	10,04	10,36	10,89	11,62	12,54	-6,63
ε	ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	10,05	10,40	10,98	11,78	12,77	-6,23
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	10,11	10,63	11,45	12,54	13,83	-2,62
ε	$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	10,11	10,64	11,48	12,57	13,88	-2,23
$-\varepsilon$	ε	ε	$-\varepsilon$	10,13	10,69	11,57	12,70	14,02	0,50
ε	ε	ε	$-\varepsilon$	10,13	10,69	11,57	12,69	14,00	0,88
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	10,13	10,69	11,58	12,72	14,05	0,12
ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	10,13	10,69	11,57	12,70	14,02	0,50
$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	ε	10,11	10,61	11,39	12,38	13,53	3,16
ε	ε	$-\varepsilon$	ε	10,10	10,59	11,35	12,32	13,44	3,52
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	ε	10,04	10,35	10,84	11,45	12,18	6,80
ε	$-\varepsilon$	ε	ε	10,03	10,31	10,75	11,31	11,96	7,16
$-\varepsilon$	ε	ε	ε	9,95	9,98	10,05	10,13	10,23	9,65
ε	ε	ε	ε	9,93	9,93	9,93	9,93	9,93	10,00

Действующее значение напряжения и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения для такой кривой равны соответственно 0,684 В и 8,8%.

Спектры разложений функций $V_j(\theta)$ и квазиоптимальной кривой в ряды Фурье по синусам в данном случае существенно от-

личаются от таковых для равноудаленного расположения углов θ_k , что видно при сравнении табл. 1 и 4. При новом расположении углов θ_k коэффициенты разложения по косинусам, а также четные гармоники разложений по синусам, как и в ранее рассмотренном случае, равны нулю.

Таблица 4

Коэффициенты $a_{j,(i)}$ разложений функций $V_j(\theta)$ и квазиоптимальной кривой $u_{(i)}$ в ряды Фурье по синусам нечетных гармоник при оптимальном расположении углов коммутации θ_k

i	$a_{1,(i)}$	$a_{2,(i)}$	$a_{3,(i)}$	$a_{4,(i)}$	$u_{(i)}, \text{В}$
1	0,044	0,138	0,325	0,766	0,962
3	0,125	0,321	0,374	-0,396	0,030
5	0,189	0,296	-0,208	-0,022	-0,018
7	0,230	0,098	-0,324	0,179	0,015
9	0,242	-0,122	0,086	-0,064	-0,017
11	0,228	-0,221	0,194	-0,085	-0,005
13	0,192	-0,166	-0,012	0,084	0,028
15	0,144	-0,038	-0,044	0,022	-0,005
17	0,094	0,054	0,002	-0,075	-0,033
19	0,049	0,062	-0,064	0,020	0,006
21	0,017	0,022	-0,030	0,051	0,037
23	0,002	-0,001	0,097	-0,042	0,026

i	$a_{1,(i)}$	$a_{2,(i)}$	$a_{3,(i)}$	$a_{4,(i)}$	$u_{(i)}, В$
25	0,002	0,019	0,051	-0,022	0,022
27	0,014	0,054	-0,068	0,047	0,020
29	0,033	0,055	-0,039	-0,005	-0,005
31	0,052	0,009	0,018	-0,038	-0,012
33	0,066	-0,048	-0,004	0,024	0,009
35	0,072	-0,072	0,015	0,021	0,010
37	0,067	-0,047	0,046	-0,033	-0,008
39	0,055	-0,002	-0,018	-0,002	-0,007

Результаты расчетов, проведенных по вышеописанной методике для оптимального расположения углов коммутации, приведены в табл. 5 и 6, которые аналогичны табл. 2 и 3. Сравнение последних столбцов табл. 2 и 5 показывает, что спектр выходной кривой при равномерном распределении углов коммутации (табл. 2) имеет

меньше высших гармоник, чем спектр кривой при их оптимальном расположении (табл. 5). Уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих с 9,93% до оптимального значения 8,84% достигнуто за счет значительного уменьшения 15-й, 17-й, 31-й и 33-й гармоник.

Таблица 5

Максимально возможные значения коэффициентов гармонических составляющих выходной кривой напряжения $k_{U(i)}^{\max}$, выраженные в процентах от значения основной гармоники, рассчитанные при 2, 4, 6, 8 и 10 % точности стабилизации уровней при оптимальном расположении углов коммутации θ_k

i	$k_{U(i)}^{\max}, \%$					$k_{U(i)}^{opt}$
	$\varepsilon = 0,02$	$\varepsilon = 0,04$	$\varepsilon = 0,06$	$\varepsilon = 0,08$	$\varepsilon = 0,1$	$\varepsilon = 0$
3	4,72	6,33	7,97	9,65	11,35	3,13
5	2,42	2,98	3,56	4,16	4,77	1,85
7	2,49	3,36	4,21	5,04	5,86	1,60
9	2,17	2,54	2,90	3,26	3,60	1,79
11	1,16	1,79	2,42	3,03	3,62	0,51
13	3,26	3,58	3,90	4,21	4,52	2,93
15	0,67	0,85	1,04	1,22	1,41	0,50
17	3,61	3,78	3,96	4,13	4,30	3,42
19	0,81	0,99	1,16	1,32	1,49	0,64
21	3,97	4,08	4,19	4,30	4,40	3,86
23	2,91	3,16	3,41	3,67	3,94	2,67
25	2,43	2,58	2,73	2,89	3,05	2,28
27	2,30	2,50	2,69	2,88	3,06	2,10
29	0,59	0,69	0,80	0,91	1,02	0,49
31	1,37	1,48	1,58	1,68	1,77	1,27
33	1,07	1,16	1,26	1,35	1,44	0,97
35	1,21	1,32	1,42	1,53	1,63	1,09
37	1,02	1,19	1,35	1,51	1,66	0,85
39	0,82	0,87	0,92	0,97	1,01	0,78

Максимально возможные значения суммарного коэффициент гармонических составляющих выходной кривой напряжения k_U при оптимальном расположении углов коммутации θ_k

Относительные значения отклонений уровней				$k_U, \%$					$\delta U, \%$
ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	$\varepsilon = 0,02$	$\varepsilon = 0,04$	$\varepsilon = 0,06$	$\varepsilon = 0,08$	$\varepsilon = 0,1$	$\varepsilon = 0,1$
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	8,84	8,84	8,84	8,84	8,84	-10,00
ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	8,85	8,87	8,91	8,96	9,03	-9,97
$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	8,95	9,16	9,48	9,91	10,44	-8,75
ε	ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	8,96	9,20	9,55	10,02	10,60	-8,61
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	9,18	9,81	10,70	11,80	13,09	-5,12
ε	$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	9,19	9,83	10,73	11,85	13,15	-4,99
$-\varepsilon$	ε	ε	$-\varepsilon$	9,26	10,02	11,05	12,30	13,73	-3,93
ε	ε	ε	$-\varepsilon$	9,27	10,04	11,08	12,35	13,79	-3,80
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	8,76	9,04	9,61	10,43	11,42	4,62
ε	$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	8,77	9,04	9,61	10,41	11,39	4,74
$-\varepsilon$	ε	$-\varepsilon$	ε	8,80	9,05	9,56	10,26	11,12	5,70
ε	ε	$-\varepsilon$	ε	8,80	9,05	9,55	10,25	11,09	5,82
$-\varepsilon$	$-\varepsilon$	ε	ε	8,82	8,90	9,05	9,29	9,58	8,85
ε	$-\varepsilon$	ε	ε	8,82	8,89	9,03	9,24	9,50	8,96
$-\varepsilon$	ε	ε	ε	8,84	8,84	8,86	8,88	8,91	9,89
ε	ε	ε	ε	8,84	8,84	8,84	8,84	8,84	10,00

В целом сравнение приведенных таблиц позволяет сделать вывод, что оптимизация расположения углов коммутации дает выигрыш по суммарному коэффициенту гармонических составляющих выходной кривой напряжения не более, чем на один процент во всех рассмотренных вариантах реализации стабилизации уровней. В то же время снижение точности стабилизации уровня приводит к значительному увеличению коэффициентов ряда гармонических составляющих, в частности, 3-й, 13-й, 21-й (табл. 5).

Итак, представлена методика анализа влияния качества стабилизации величин

напряжений уровней на качество выходной кривой многоуровневого инвертора напряжения. Методика основана на введении функций носителей уровней и их спектров и может быть применена для любого числа уровней выходной кривой инвертора.

Результаты применения представленных методик к анализу формирования выходной кривой четырехуровневого инвертора доказывает необходимость для обеспечения требуемого ее качества индивидуальной стабилизации выходных напряжений источников уровней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lai J.S. Multilevel Converters – A New Breed of Power Converters / J.S. Lai, F.Z. Peng // IEEE Transactions on Industry Applications. 1996. Vol. 32. № 3. P. 509-517.

2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев. Новосибирск: НГТУ, 2003. 664 с.

3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. 10 с.

4. Голембиовский Ю.М. Оптимальный выбор уровней входных напряжений мо-

стов в преобразовательной сети на базе инверторов напряжения / Ю.М. Голембиовский, Р.В. Колдаев // Вопросы преобразова-

тельной техники, частотного электропривода в управлении: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1999. С. 12-18.

Миргородская Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina E. Mirgorodskaya – PhD, Associate Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Колчев Вадим Александрович – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Vadim A. Kolchev – Postgraduate, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita P. Mityashin – Dr. Sc., Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Карнаухов Евгений Дмитриевич – аспирант кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Evgeniy D. Karnaukhov – Postgraduate, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.03.18, принята к опубликованию 28.03.18

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.9.048.4

ФОРМИРОВАНИЕ КАРБИДНЫХ И КАРБОНИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

С.А. Мезенцов, И.В. Родионов

FORMATION OF CARBIDE AND CARBON NITRIDE COATINGS OVER TITANIUM BY THE SPARK ALLOYING METHOD

S.A. Mezentsov, I.V. Rodionov

Рассмотрены технологические особенности получения износостойких покрытий на титане методом электроискрового легирования. В процессе легирования использованы титановые и графитовые электроды, с помощью которых на поверхности образцов формировались карбидные и карбонитридные пленки и тонкие функциональные покрытия с повышенной микротвердостью. Проведены экспериментальные исследования морфологии и состава полученных покрытий в зависимости от материалов применяемых электродов. Установлено влияние режимов электроискрового легирования титана на основные физико-механические характеристики обрабатываемой поверхности: структуру, пористость, микротвердость, фазовый и химический состав.

Ключевые слова: электроискровое легирование; титан; электроды; функциональные покрытия; морфология покрытий; микротвердость

В производстве изделий, работающих в сложных условиях воздействия высоких механических нагрузок и агрессивных сред, широко используют различные металлические материалы на основе титана. Однако при всех достоинствах титана он обладает существенными недостатками, связанными, в первую очередь, со склонностью к контактному схватыванию при трении, что приводит

The article considers the technological features needed to obtain the wear-resistant coatings over titanium by the method of electro-spark alloying. For the alloying process, we used the titanium and graphite electrodes to form the carbide and carbonitride films, as well as thin functional coatings with increased microhardness over the surface of the samples. Experimental studies refer the morphology and composition of the coatings, depending on the materials of applied electrodes. The influence of the modes of electrospark titanium doping on the basic physicomachanical characteristics of the treated surface, including the structure, porosity, microhardness, phase and chemical composition was established.

Keywords: electrospark alloying; titanium; electrodes; functional coatings; morphology of coatings; microhardness

к его пониженной износостойчивости [1, 2]. Это в значительной степени ограничивает область применения титана как многофункционального конструкционного материала. Одной из перспективных технологий повышения его функциональных характеристик является нанесение покрытий с определенными фазово-структурным состоянием и физико-механическими свойствами [3-9].

Применение процесса электроискрового легирования (ЭИЛ) при обработке поверхности титана позволяет формировать покрытия, обладающие высокими показателями физико-механических свойств и повышенной адгезионной прочностью, путем переноса и осаждения материала электрода-инструмента на поверхность изделия плазмой искрового разряда [10]. Основными преимуществами технологии ЭИЛ являются отсутствие нагрева и деформаций изделия в процессе обработки, возможность использования в качестве электродов различных токопроводящих материалов, относительная простота осуществления процесса, отсутствие необходимости проведения предварительной обработки поверхности, низкая энергоемкость ручных и механизированных процессов, высокий коэффициент переноса материала.

По результатам анализа проведенных теоретических исследований и ряда экспериментальных работ установлено, что для повышения качества и улучшения функциональных характеристик электроискровых покрытий целесообразно осуществлять обработку поверхности титана последовательным электроискровым легированием титановым и графитовым электродами [11].

В эксперименте формирование покрытий проводилось ЭИЛ поверхностей дисковых образцов на воздухе сначала титановым (ВТ1-00, ГОСТ 19807-74), а затем графитовым (МПГ-6, ТУ 48-4807-297-00) электродом. Электроды имели форму стержней с диаметром 2 мм и длиной 25 мм.

Образцы выполнялись из титана марки ВТ1-00 диаметром 7 мм и высотой 2 мм. Применение последовательной обработки вышеуказанными электродами было необходимо для обеспечения требуемой толщины, морфологии и микротвердости получаемых электроискровых покрытий. Воздействие титановым электродом приводило к формированию достаточно толстого пористого подслоя с развитой морфологией, а последующее применение графитового электрода позволяло модифицировать полученный подслоя карбидами, повышая микротвердость поверхности покрытия.

Обработка проводилась на установке электроискрового легирования ЭФИ-46А при различных технологических режимах (рис. 1). Причем к управляемым параметрам процесса электроискрового легирования относились плотность тока j и удельное время обработки t_y .

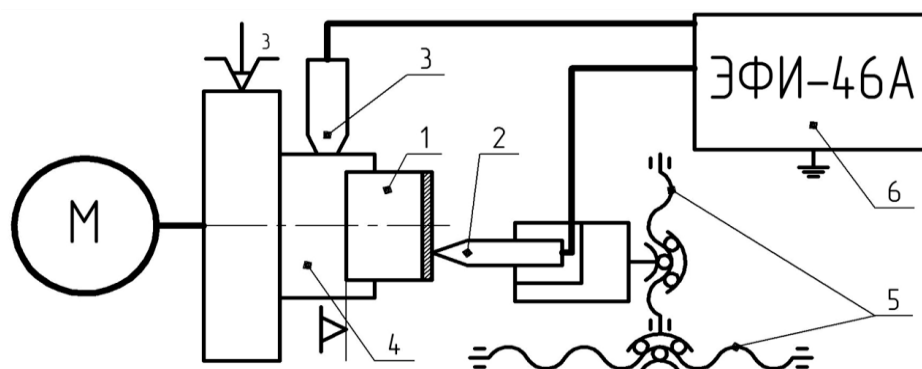


Рис. 1. Схема процесса электроискрового легирования: 1 – образец, 2 – электрод, 3 – отрицательный контакт, 4 – цанговый патрон, 5 – система перемещения электрода, 6 – установка ЭИЛ

Значения плотности тока j характеризовали следующие режимы: «мягкий» – 11×10^6 А/м², «средний» – 14×10^6 А/м² и «жесткий» – 18×10^6 А/м². Удельное время обработки t_y выбиралось для режима «мягкий» – 4 мин/см², 10 мин/см², 16 мин/см²; для режима «средний» – 2 мин/см², 5 мин/см², 8 мин/см²;

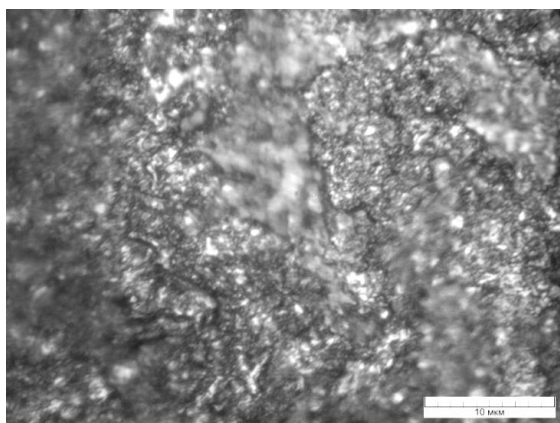
для режима «жесткий» – 1 мин/см², 3,5 мин/см², 6 мин/см². Дозовая зависимость микротвердости титана при имплантации ионов серебра Ag^+ : 1 – $U_{\text{иск } Ag^+} = 150$ кВ; 2 – $U_{\text{иск } Ag^+} = 100$ кВ.

После формирования покрытий образцы промывались в спиртосодержащей моющей

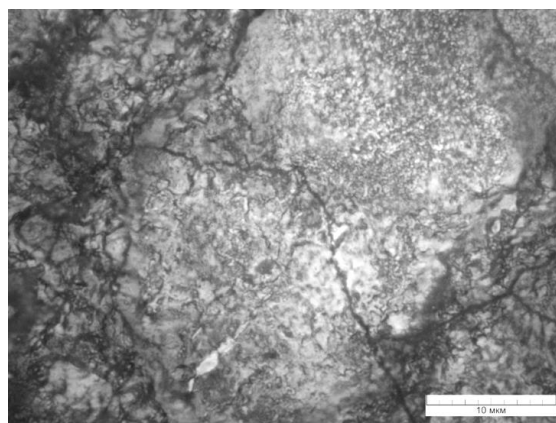
среде с применением лабораторной ультразвуковой ванны УЗВ 2-0,16/37 для удаления технологических загрязнений различной химической природы.

Свойства покрытий изучались методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре «Xcalibur & Gemini A» с использованием рентгеновской трубки с медным анодом методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе «MIRA II LMU» фирмы «TESCAN» с приставкой для энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (ЭДРФА) «Inca Energy 350».

Для получения оптико-микроскопических изображений применялся металлографический микроскоп МИМ-8М.



а



б

Рис. 2. Морфология Ti образцов после ЭИЛ: а – титановым электродом, б – титановым электродом с последующей модификацией графитовым электродом

Образцы, на которых оптическая микроскопия не выявила выраженных оптических дефектов, дополнительно исследовались с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 3).

Данные оптической микроскопии показывают, что процесс ЭИЛ образцов при удельном времени обработки менее 2 мин/см^2 и плотности тока ниже $14 \times 10^6 \text{ А/м}^2$ приводит к формированию покрытия с сильно неравномерным рельефом и большим количеством структурных несплошностей, а при удельном времени обработки более 10 мин/см^2 и плотности тока выше $18 \times 10^6 \text{ А/м}^2$ в покрытии образуется множество дефектов в виде микро- и макротрещин.

Пористость покрытий в большей степени зависит от плотности тока j при ЭИЛ.

Оценка пористости и толщины покрытий производилась на анализаторе геометрических параметров микрообъектов АГПМ6М с использованием программы графической обработки изображений «Металлограф».

Микротвердость покрытий определялась с использованием микротвердомера HVS-1000В с видеоизмерительной системой SP-5.

В результате анализа полученных экспериментальных результатов было установлено, что морфология покрытий, сформированных ЭИЛ, является гетерогенной и представляет собой множество перекрывающихся друг друга микролунок – следов от искровых разрядов, равномерно распределенных по поверхности (рис. 2).

Так, пористость повышается с возрастанием j при обработке титановым электродом и уменьшается при увеличении значения j при использовании графитового электрода. Это связано с тем, что при электроискровом легировании титановым электродом формируется основной рельеф покрытия, а последующая обработка графитовым электродом модифицирует уже сформированный поверхностный слой. Минимальную пористость на уровне 47% имеют покрытия, полученные при значениях режима $j_1 = 11 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y1} = 10 \text{ мин/см}^2$, $j_2 = 18 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y2} = 3,5 \text{ мин/см}^2$, а максимальную пористость, равную 68%, при $j_1 = 18 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y1} = 3,5 \text{ мин/см}^2$, $j_2 = 11 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y2} = 10 \text{ мин/см}^2$.

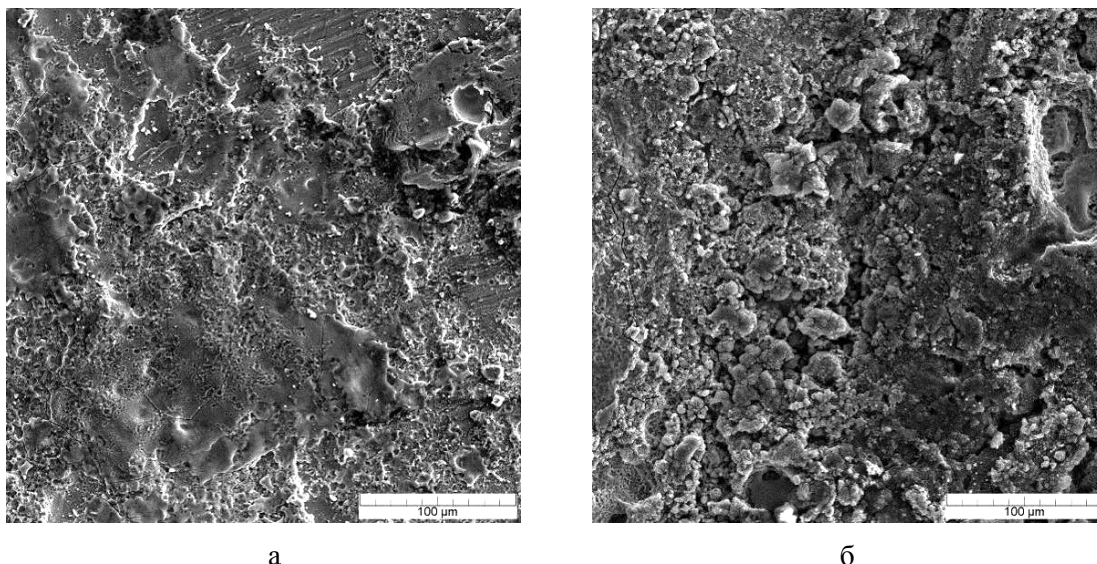


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности покрытия на Ti образцах после электроискрового легирования титановым (а) и титановым + графитовым (б) электродами

После электроискровой обработки микротвердость поверхности достигает величин в диапазоне 1270-1300 HV (12,7-13 GPa) для ЭИЛ титановым электродом и 2040-2080 HV (20,4-20,8 GPa) при последующем ЭИЛ графитовым электродом. При этом микротвердость покрытия после модификации графитовым электродом монотонно возрастала с увеличением плотности тока и, в существенной степени, не зависела от удельного времени обработки.

Проведенный энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ показал, что в составе покрытия присутствуют Si, Ti, N, O и C в различном процентном соотношении. После ЭИЛ титановым электродом основными элементами поверхности являются Ti (43-48 at.%), O (31-43 at.%) и N (13-25 at.%). Последующая обработка графитовым электродом приводит к изменению элементного состава. Здесь начинают преобладать такие элементы, как C (до 72%) и Ti (20-26%) с присутствием примеси Si (до 4%), что объясняется ее наличием в составе графитового электрода.

Рентгеноструктурный фазовый анализ покрытий, проведенный с учетом результатов ЭРДФА, позволил получить дифрактограммы с идентификацией присутствующих на поверхности химических соединений. Данные исследования фазового состава свидетельствуют о том, что в процессе ЭИЛ титановым электродом на поверхности образцов возникают оксидные и нитридные соединения титана. В условиях последующего воздействия графитовым электродом на поверхности образцов создаются преимущественно такие фазы, как оксид титана (TiO), дисилицид титана (TiSi₂), карбид титана (TiC) и карбид кремния (SiC).

Таким образом, электроискровой обработкой поверхности изделий из титана последовательно титановым и графитовым электродами обеспечивается формирование карбидных и карбонитридных покрытий с микроструктурой поверхности, обладающей повышенной микротвердостью с величиной 2068 GPa.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение износостойкости технически чистого титана BT1-0 и сплава BT6 / Б.П. Гриценко, Н.Н. Коваль, Ю.Ф. Иванов и др. // Известия Самарского научного центра

- Российской академии наук. 2011. № 4. С. 1009-1013.

2. Антифрикционные наплавки на титановые сплавы / В.К. Шаталов, И.С. Фатиев,

В.И. Михайлов, А.Л. Грошев // Наука и образование. 2012. Эл. № ФС 77-48211. С. 424-432.

3. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles / A. Fomin, S. Dorozhkin, M. Fomina et al. // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. № 9. P. 10838-10846.

4. **Кошуро В.А.** Структура и микротвердость оксидных покрытий, сформированных плазменными процессами на титане / В.А. Кошуро, А.А. Фомин, И.В. Родионов // *Prospects of world science: materials of the XI International scientific and practical conference*. Sheffield, England: Science and Education Ltd. 2015. Vol. 9 (Physics). P. 22-26.

5. Nanocrystalline Structure of Surface Layer of Technical-Purity Titanium Subjected to Induction-Thermal Oxidation / A.A. Fomin, A.B. Steinhauer, I.V. Rodionov et al. // *Technical Physics Letters*. 2013. Vol. 39. № 11. P. 969-971.

6. **Родионов И.В.** Морфологические характеристики оксидных биопокровов, получаемых паротермическим оксидированием костных титановых имплантатов / И.В. Родионов, К.Г. Бутовский // *Технологии живых систем*. 2006. Т. 3. № 5-6. С. 66-73.

7. Use of Ion Beam Modification and Gas-Thermal Oxidation in the Process of Formation of Structurally Heterogeneous Oxide

Coatings for Titanium Medical Implants / I.V. Rodionov, I.V. Perinskaya, L.E. Kuts et al. // *Biomedical Engineering*. 2018. № 5. P. 303-307.

8. Сверхтвердые оксидные покрытия и особенности их получения на титане обработкой токами высокой частоты / А.Ю. Щелкунов, И.С. Егоров, М.А. Фомина и др. // *Вопросы электротехнологии*. 2017. № 3(16). С. 60-65.

9. Изменение фазово-структурного состояния и повышение механических характеристик газотермических покрытий на титане после проведения микродугового оксидирования / В.А. Кошуро, И.В. Родионов, А.А. Фомин, М.А. Фомина // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2016. Т. 13. № 4. С. 501-505.

10. **Коротаев Д.Н.** Субструктурное поверхностное упрочнение деталей трибосистем методом электроискрового легирования / Д.Н. Коротаев, Е.В. Иванова // *Перспективные материалы*. 2011. № 2. С. 38-102.

11. **Мезенцов С.А.** Формирование наноструктурированных биоконпозиционных покрытий на изделиях медицинской техники искродуговым методом / С.А. Мезенцов, В.Н. Лясников // *Физическое материаловедение: VI Международная школа с элементами научной школы для молодежи* 30 сентября – 5 октября 2013 г. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. С. 65-67.

Мезенцов Сергей Александрович – студент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Sergei A. Mezentsov – Master Student, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 25.02.18, принята к опубликованию 28.03.18

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.365.5

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВОК СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЧАСТОТОЙ

А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский, Н.П. Митяшин, Е.Е. Миргородская

CONTROL SYSTEMS FOR INSTALLATIONS OF MICROWAVE DIELECTRIC HEATING WITH TUNABLE FREQUENCY

A.V. Fedorov, Yu.S. Arkhangelsky, N.P. Mityashin, E.E. Mirgorodskaya

Рассмотрены принципы построения систем управления широкополосных установок СВЧ диэлектрического нагрева. Обоснована необходимость разработки систем управления для управления перестраиваемым СВЧ генератором. Предложен алгоритм работы системы управления для поддержания модуля коэффициента отражения СВЧ энергии от рабочей камеры на минимально возможном уровне с помощью синхронной перестройки частоты СВЧ генератора на основе измерения параметров рабочей камеры. Рассмотрен принцип измерения модуля коэффициента отражения от рабочей камеры, и методы перестройки частоты полупроводникового задающего СВЧ генератора.

Ключевые слова: СВЧ термообработка, установка СВЧ диэлектрического нагрева, система управления, магнетрон, СВЧ генератор, направленный ответвитель, волновод, рабочая камера, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь

При обработке диэлектриков в установках СВЧ диэлектрического нагрева выделение теплоты происходит внутри объема диэлектрика, что позволяет достичь высокой равномерности нагрева, невозможной при других способах термообработки (конвекцией, теплопроводностью и тепловым излучением) [1, 2]. Наилучшая равномерность

The principles of building control systems for broadband microwave frequency dielectric heating systems are considered. The necessity for the system of controlling tunable microwave generators is justified. We proposed an algorithm for operating control systems to maintain the modulus of microwave energy reflection from the working chamber at the lowest possible rate by synchronously tuning the microwave generator frequency based on the measurement of parameters of the working chamber. The principles for measuring the modulus of the energy reflection coefficient from the working chamber is considered, as well as the methods for tuning the frequency of the semiconductor driving microwave oscillator are considered.

Keywords: microwave heat treatment, microwave installation, control system, microwave oscillator, directional coupler, waveguide, running wave cavity, relative permittivity, loss angle

нагрева достигается в рабочих камерах с бегущей волной (КБВ). КБВ на основе отрезка прямоугольного волновода с неоднородным профилем (рис. 1) обеспечивает равномерность нагрева вплоть до $\pm 3-5^\circ\text{C}$ на уровне 100°C [3]. Однако у таких камер имеется недостаток, возникающий из-за зависимости диэлектрических параметров ϵ'

и $\operatorname{tg} \delta$ нагреваемого диэлектрика от температуры. В процессе нагрева ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ изменяются и ухудшается согласование камеры с СВЧ генератором, нагрев обрабатываемого объекта по длине камеры становится неравномерным. КБВ одночастотных установок СВЧ диэлектрического нагрева рассчиты-

вают для наилучшего согласования с СВЧ генератором для значений ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$, соответствующих определенной температуре (обычно средней) при рабочей длине волны. Это не позволяет достичь ещё лучшей равномерности нагрева и повысить КПД установки.

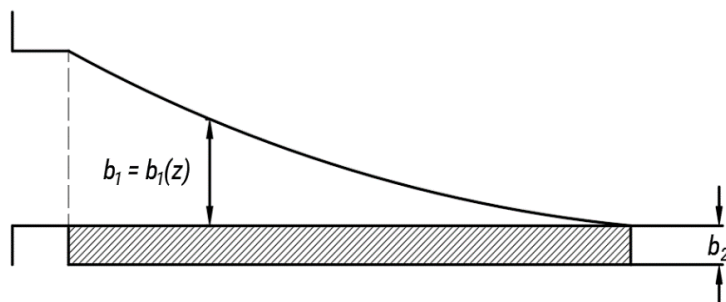


Рис. 1. КБВ на отрезке прямоугольного волновода с неоднородным согласующим профилем

Для решения этой проблемы был предложен широкополосный режим работы (режим работы с перестраиваемой частотой) [4]. Широкополосный режим основан на плавном изменении частоты источника СВЧ энергии (СВЧ генератора) установки синхронно с изменением диэлектрических параметров ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ нагреваемого диэлектрика в процессе его обработки. Это позволяет добиться лучшего согласования рабочей камеры с СВЧ генератором на всем протяжении нагрева по сравнению с одночастотным режимом работы.

При проектировании широкополосных установок СВЧ диэлектрического нагрева требуется разработать систему управления. В традиционных одночастотных установках на основе магнетрона в целях снижения стоимости конструкцию системы управления часто упрощают, и вся система управления сводится к единственному выключателю, коммутирующему цепь питания магнетрона в ручном или автоматическом режиме (в режиме таймера). Это решение является приемлемым в ситуациях, когда заранее известна продолжительность нагрева, а управление частотой и мощностью СВЧ не производится. Совершенно иная ситуация при работе широкополосной установки с перестраиваемым СВЧ генератором. В этом случае основная задача системы управления – по определенной временной

зависимости изменять частоту задающего генератора источника СВЧ энергии.

Возможны два различных варианта управления частотой задающего генератора.

Одним из вариантов является предварительное математическое моделирование технологического процесса термообработки. В результате моделирования должен быть произведен расчёт изменения частоты источника СВЧ энергии от времени термообработки. Тогда система управления должна осуществлять лишь перестройку задающего генератора согласно рассчитанному закону изменения его частоты во времени.

Достоинствами такого варианта являются простота и надёжность схемы управления частотой. Недостатками являются необходимость проведения математического моделирования процесса нагрева для каждого диэлектрика. Кроме того, в случае отклонения параметров диэлектрика от расчётных значений в начальный или любой другой момент времени перестройка частоты будет неоптимальной, что негативно повлияет на качество термообработки.

В другом варианте управления математическое моделирование не проводится. Система управления получает информацию о состоянии параметров рабочей камеры в процессе термообработки и использует полученные данные для определения направления изменения частоты и скорости её из-

менения. Данное решение является более сложным ввиду необходимости применения дополнительных компонентов для контроля параметров рабочей камеры, но оно более универсально, так как позволяет обрабатывать диэлектрики с различными изменениями диэлектрических параметров, автоматически подбирая оптимальный график перестройки частоты.

Для реализации того или другого варианта управления генератором конструкция системы управления широкополосной установки СВЧ диэлектрического нагрева должна быть сложнее, чем система управления установки с одночастотным генератором, и задача её проектирования – весьма актуальна при разработке таких установок. Учитывая указанные выше недостатки первого варианта управления частотой, наиболее оптимальным решением является второй вариант, основанный на контроле параметра рабочей камеры, характеризующего её согласование с источником СВЧ энергии.

Параметром, характеризующим изменение ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика, является модуль коэффициента отражения рабочей камеры $| \Gamma |$. Как показано в работе [3], при минимальном $| \Gamma |$ обеспечивается максимальный КПД, а также наилучшая равномерность нагрева диэлектрика в КБВ. Измеряя только $| \Gamma |$, можно однозначно определить текущие параметры рабочей камеры. Так как зависимости диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$ от температуры могут быть с достаточной точностью определены только экспериментально, при анализе полученного значения $| \Gamma |$ рабочей камеры система управления не имеет данных о нужном направлении перестройки частоты СВЧ генератора и скорости его перестройки для формирования оптимального управляющего напряжения на задающем генераторе источника СВЧ энергии для его перестройки.

Результат математического моделирования широкополосного режима работы КБВ по теории цепей [5] показывает, что зависимость $| \Gamma |(\lambda)$ имеет один минимум в рабочем диапазоне длин волн, изменяющийся непрерывно при изменении ϵ' и $\operatorname{tg} \delta$

диэлектрика. Типичные зависимости $| \Gamma |(\lambda)$ при нагреве диэлектрика в КБВ при трёх значениях температуры показаны на рис. 2.

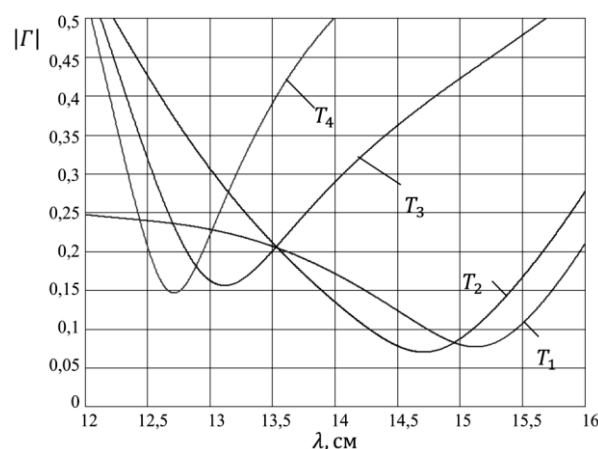


Рис. 2. Зависимости $| \Gamma |(\lambda)$, при различных температурах T_n обрабатываемого диэлектрика

Для нахождения минимума в подобных системах целесообразно применение экстремальной системы управления [6, 7]. Так как управляющим воздействием является только частота СВЧ генератора, то рассматриваемая система управления является одномерной.

Рассмотрим логику работы экстремальной системы управления на примере работы широкополосной установки СВЧ нагрева с КБВ на отрезке прямоугольного волновода (рис. 1). Структурная схема системы управления рассматриваемой установки показана на рис. 3.

При включении установки на задающем генераторе (ЗГ) устанавливается начальная частота, соответствующая длине волны, на которую был рассчитан согласующий профиль КБВ. Затем через промежутки времени τ_i , определяемые тактовым генератором (ЗТ), производится выбор направления перестройки и перестройка частоты СВЧ генератора (Г) на фиксированную величину Δf в определенном направлении. Выбор направления перестройки осуществляется путём измерения $| \Gamma |$ в измерителе коэффициента отражения (ИКО) при кратковременной перестройке СВЧ генератора на частоты $f_{\text{раб}} + \Delta f$ и $f_{\text{раб}} - \Delta f$. Результаты измерения переводятся в цифровой сигнал γ_i с помощью аналого-цифрового преобразова-

теля (АЦП) и поступают в логическое арифметическое устройство (ЛАУ), где происходит сравнение измеренных значений. В результате происходит выбор

направления перестройки, при котором γ_i наименьший, и на СВЧ генераторе устанавливается оптимальная частота $f_{ЛАУ}$.

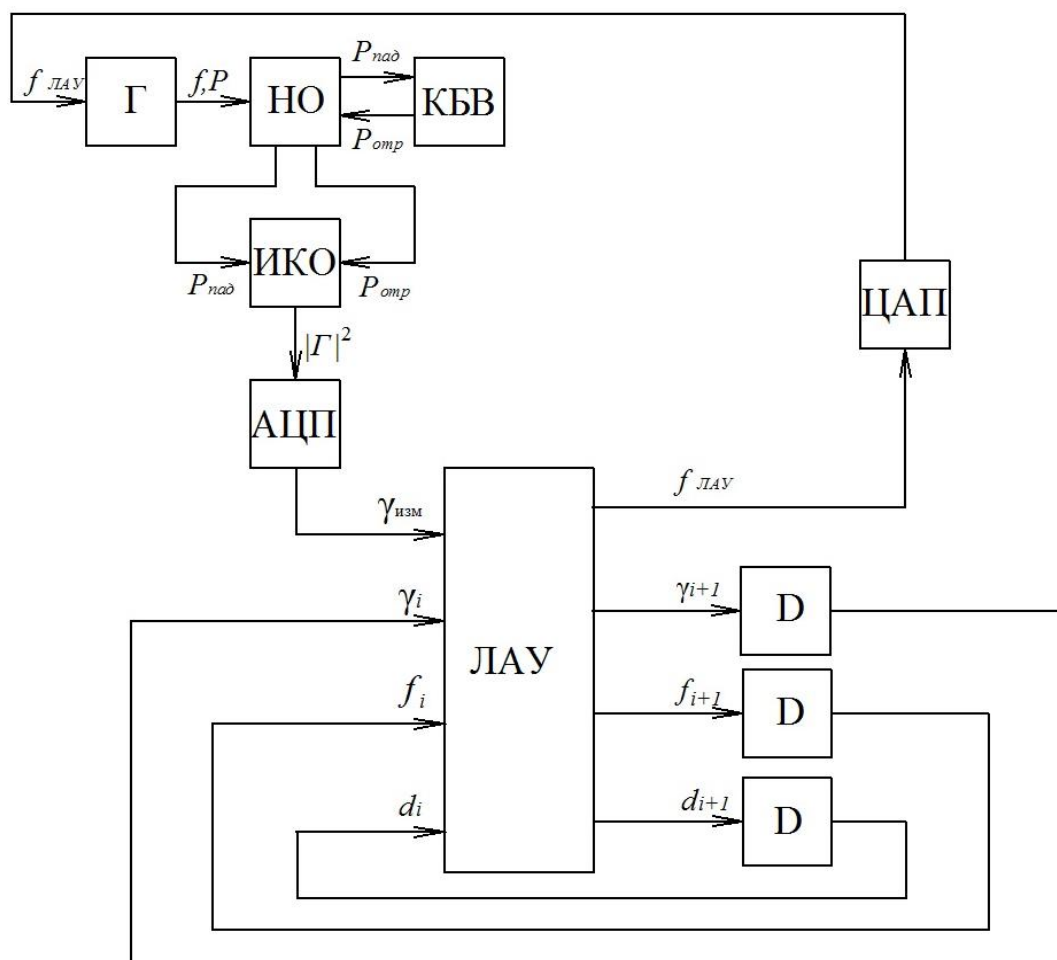


Рис. 3. Структурная схема системы управления широкополосной установки СВЧ диэлектрического нагрева на основе КБВ

Выбираемое направление перестройки d_i в каждом такте установленная частота f_i и значение γ_i при установленной частоте сохраняются в элементах задержки (D) для следующего цикла. Величина d_i может принимать три значения: $d_i = -1$ в случае принятого решения об уменьшении частоты, $d_i = 1$ в случае увеличения частоты и $d_i = 0$ в начальный момент времени, либо если в текущем такте принято решение не перестраивать частоту. Сохраненное значение d_i поступает на вход ЛАУ и является предпочтительным направлением перестройки в следующем такте работы системы управления. Если предпочтительное направление пере-

стройки после сравнения оказывается неоптимальным, то есть измеренный $|\Gamma|$ на новой частоте оказывается выше, чем в предыдущем такте, то осуществляется изменение направления перестройки d_i , и частота $f_{ЛАУ}$ перестраивается в противоположную сторону. В случае повышения $|\Gamma|$ при любом направлении перестройки рабочая частота остаётся неизменной, и в элементе задержки сохраняется значение $d_i = 0$.

Таким образом, в результате работы показанной системы управления выбирается оптимальное направление перестройки d_i в начале каждого такта и устанавливается оптимальная частота $f_{ЛАУ}$ на СВЧ генераторе.

ре. До окончания текущего такта на нагреваемый объект в КБВ воздействует СВЧ энергия с выбранной частотой $f_{\text{ЛВЧ}}$.

Рассмотренный алгоритм перестройки длины волны СВЧ генератора представлен в виде блок-схемы на рис. 4.

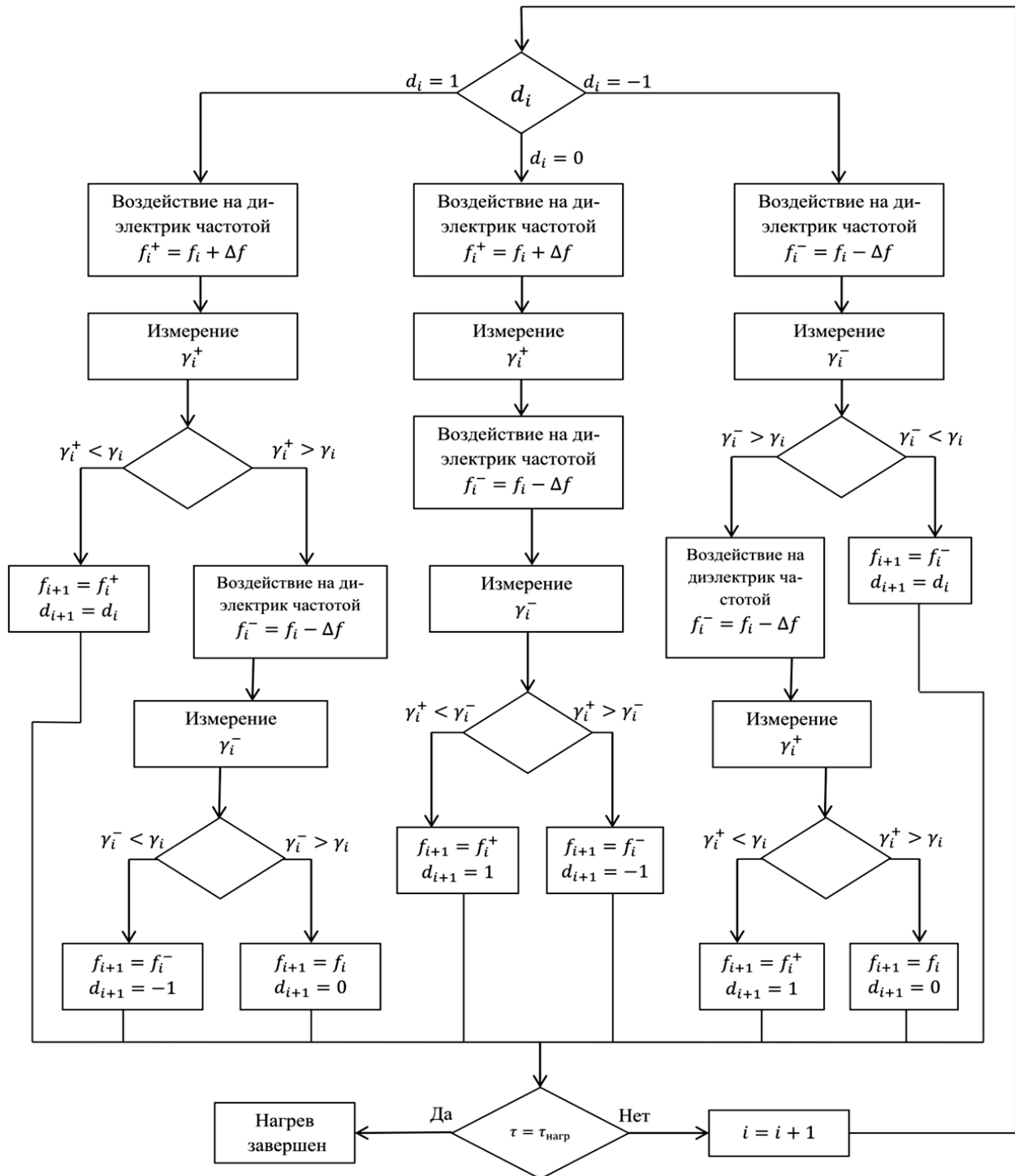


Рис. 4. Алгоритм работы экстремальной системы управления широкополосной установкой СВЧ диэлектрического нагрева на основе КБВ

Измерение модуля коэффициента отражения $|Γ|$ в ИКО осуществляется путём сравнения мощности падающей волны $P_{\text{пад}}$

с мощностью отраженной волны от рабочей камеры $P_{\text{отр}}$. Для измерения мощностей $P_{\text{пад}}$ и $P_{\text{отр}}$ используется двунаправленный

волноводный или коаксиальный ответвитель (рефлектометр), включаемый между источником СВЧ энергии и рабочей камерой. К каждому из плеч вторичной линии ответвителя должны быть подключены измерители поглощаемой СВЧ мощности, преобразующие мощность падающей и отраженной волны в напряжения $U_{пад}$ и $U_{отр}$. Затем производится преобразование полученных напряжений в величину $U_{рез}$, пропорциональную квадрату модуля коэффициента отражения по соотношению

$$U_{рез} = K_{рез} |\Gamma|^2 = K_{рез} \frac{U_{отр}}{U_{пад}}, \quad (1)$$

где $K_{рез}$ – коэффициент пропорциональности.

Для предотвращения большой потери мощности в основной линии рабочее затухание направленного ответвителя должно быть минимальным.

Зависимости диэлектрических параметров этого продукта от температуры приведены в работе [8], а полученные зависимости $|\Gamma|(\tau)$, $\lambda(\tau)$, $d_i(\tau)$ показаны на рис. 5.

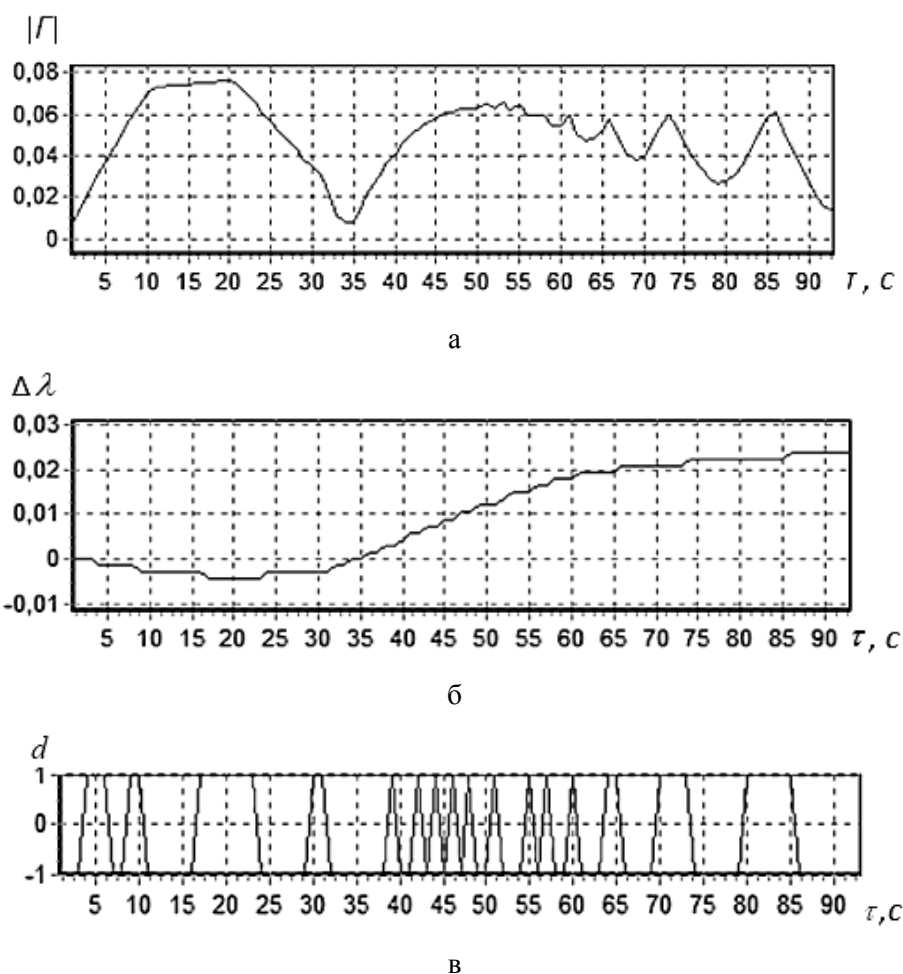


Рис. 5. Параметры широкополосной установки СВЧ диэлектрического нагрева при нагреве филетрески: а – зависимость $|\Gamma|(\tau)$; б – зависимость $\Delta\lambda(\tau)$; в – зависимость $d_i(\tau)$

Важным отличием широкополосной установки СВЧ диэлектрического нагрева от традиционной одночастотной является более сложная схема источника СВЧ энергии (СВЧ генератора). Он включает перестраиваемый задающий СВЧ генератор, управляемый напряжением ГУН, мощный усилитель СВЧ, обеспечивающий высокую выходную мощ-

ность, а также блок питания постоянного тока. Задающий генератор, перестраиваемый в широкой полосе частот, может быть построен на основе ЖИГ-резонатора или LC-резонатора с применением варикапа [8, 9]. Усилитель мощности может быть построен на основе ЛБВ или мощных полупроводниковых транзисторов [10].

На основе алгоритма, описанного выше, была создана расчетная модель системы управления и смоделирован технологический процесс нагрева филе трески от 20 до 80°C в широкополосной установке СВЧ диэлектрического нагрева. Зависимости диэлектрических параметров этого продукта от температуры приведены в работе [11], а полученные зависимости $|Γ|(τ)$, $λ(τ)$,

$d_i(τ)$ показаны на рис. 5. Как видно из рис. 5, для получения минимального отражения СВЧ энергии от рабочей камеры осуществлялась перестройка как в сторону увеличения $λ$ (в начале процесса нагрева), так и в сторону её уменьшения. Смена направления перестройки в каждый момент времени характеризуется зависимостью $d_i(τ)$, показанной на рис. 5 в.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1998. 408 с.
2. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
3. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысоко-частотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. 140 с.
4. **Федоров А.В.** Установки СВЧ диэлектрического нагрева с перестраиваемой частотой / А.В. Федоров // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2017. № 4 (57). С. 106-113.
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 электротехнологии. 2015. № 3 (8). С. 9-15.
6. **Александров А.Г.** Оптимальные и адаптивные системы / А.Г. Александров. М.: Высш. шк., 2003. 263 с.
7. **Растринин Л.А.** Системы экстремального управления / Л.А. Растринин. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. 630 с.
8. **Ченакин А.** ГУН или ЖИГ? Проблема выбора при проектировании высококачественного синтезатора с ФАПЧ / А. Ченакин // Электроника НТБ. 2012. № 6(120). С. 118-122.
9. **Горевой А.** Выбор генераторов для построения малошумящих СВЧ-синтезаторов / А. Горевой // Компоненты и технологии. 2012. № 6. С. 12-17.
10. **Федоров А.В.** Твердотельные источники энергии установок СВЧ диэлектрического нагрева / А.В. Федоров // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2018. Т. 18. № 1. С. 68-74.
11. **Sipahioglu O.** The Dielectric Properties of Meats as a Function of Temperature and Composition / O. Sipahioglu, S.A. Baringer, C. Bircan // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2003. 38:3. P. 161-169.

Федоров Антон Васильевич – 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 Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Миргородская Елена Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita P. Mityashin – Dr. Sc., Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Elena E. Mirgorodskaya – PhD, Associate Professor, Department of System Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.18, принята к опубликованию 28.03.18



СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 62-523

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТЬЮ ПРИ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.В. Перинский

INTELLECTUAL PROPERTY MANAGEMENT UNDER COMMERCIALIZATION OF HIGH-HUME TECHNOLOGIES

V.V. Perinsky

Рассматриваются актуальные вопросы современного состояния науки и техники, связанные с обеспечением их развития на основе включения результатов научных исследований и новых разработок в сферу рыночных отношений.

Ключевые слова: интеллектуальные ресурсы, коммерциализация результатов научно-исследовательской работы

The analyzed topical problems include the present-day status of science and technology connected with their advancement based on the results of scientific research and new developments in the area of market relations.

Keywords: intellectual resources, commercialization of the R&D research

В любой сфере деятельности создаются и используются результаты умственного труда, необходимость оформления прав, на которые осознаётся всё большим числом участников рыночных отношений. Каждому из них новое законодательство Российской Федерации в области интеллектуальной собственности предоставило широкие возможности повышения своих доходов путём защиты монопольных прав, ограничения деятельности конкурентов, формирования привлекательного образа на рынке, оптимизации налогообложения и проведения иных стратегических и тактических действий.

Однако достоинства применения правового механизма оформления объектов интеллектуальной собственности возникают только при должном управлении такими объектами. Управление интеллектуальной собственностью организации – это способ извлечения из нее максимальных доходов,

который включает выполнение ряда специальных процедур и будет эффективным, если затраты на оформление и поддержание в силе прав на результаты творческой деятельности перекрываются прямыми или косвенными доходами в соответствии с программой развития бизнеса.

Чтобы управление было действительно таковым, нужно найти способы мотивации научно-технического персонала уже на ранней стадии создания им новых технических, технологических, организационных, коммерческих решений при разработке и продвижении на рынок новой продукции. Такие решения справедливо называют интеллектуальными ресурсами предприятия, они составляют основу его благосостояния и перспективы развития.

Определение целесообразности превращения интеллектуальных ресурсов в интеллектуальную собственность и нематериальные активы предприятия, их оцен-

ка, выбор эффективной формы правовой охраны и использование других процедур управления интеллектуальной собственностью являются важнейшими составляющими квалификации руководителя, прежде всего, на инновационном предприятии. Не решать вопросы управления интеллектуальной собственностью с момента принятия решения о разработке новой продукции – значит заранее обречь коммерческие планы на неудачу.

В эффективном управлении интеллектуальной собственностью предприятия кроется секрет продолжительной доходности бизнеса. Наоборот, некомпетентное управление ведёт к снижению доходности и даже к потере прав на созданные или приобретенные результаты творческой деятельности.

Стратегия управления бизнесом всё в большей степени зависит от навыков руководителей выявлять, охранять и использовать интеллектуальную собственность организации. Профессиональные навыки менеджера по управлению интеллектуальной собственностью стали существенным и активным компонентом успеха.

На научно-техническом предприятии «портфель» интеллектуальной собственности является зачастую основным активом, который, как известно, формируется исключительно в связи с принятой стратегией бизнеса, а не только потому, что имеются соответствующие результаты интеллектуальной деятельности. Их владелец всегда должен выбрать решение о необходимости и процедуре оформления или регистрации своих прав в отличие от прав на материальные объекты собственности, документы на которые оформлять он просто обязан согласно действующему законодательству.

Такой выбор является важнейшей, но не единственной составляющей умения

управлять интеллектуальными ресурсами предприятия. Их развитие и использование через стратегию максимального лицензирования, нахождение правильного баланса между накоплением и расходованием наработанного объёма знаний является одним из важнейших умений менеджера на любой фирме, а тем более инновационной.

Объективные условия формирования российского внутреннего научно-технического рынка, равно как и выход соотечественников на мировой рынок технологий и инноваций, остро требует от них знаний по широкому спектру вопросов гражданско-правового, международного и социального разделов законодательства.

Несмотря на привлечение юристов к сопровождению сделок, практика показывает, что менеджерам и другим специалистам инновационной деятельности чрезвычайно важно самим разбираться в ряде специфических правовых вопросов, непосредственно связанных, прежде всего, с необходимостью охраны интеллектуальной собственности и особенностями договоров между участниками процесса коммерциализации разработок.

В этот процесс вовлекаются авторы, их работодатели и владельцы прав на технологию, инвесторы и предприниматели, которые зачастую имеют не только общие, но и противоположные интересы. Если на каждом этапе процесса коммерциализации результатов НИОКР не отрегулировать такие отношения, то успеха ни одна из сторон не достигнет. Подобных знаний и умений особенно не хватает руководителям и специалистам малых и больших промышленных предприятий, НИИ и вузов, консультационных и инвестиционных организаций, которые работают с иностранными партнёрами, вооружённых многолетним опытом деловых отношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Перинская И.В.** Коммерциализация наукоемких технологий, анализ и синтез решений в инженерном творчестве /

И.В. Перинская, В.В. Перинский, В.Н. Лясников. Саратов: ИЦ «Наука», 2013. 255 с.

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

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

Статья поступила в редакцию 15.02.18, принята к опубликованию 28.03.18

УДК 378.147

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ВОЕННЫХ ВУЗОВ

О.В. Раецкая

INTERDISCIPLINARY COMMUNICATION WITHIN THE SYSTEM OF COMPETENCE FORMATION OF TRAINEES IN MILITARY UNIVERSITIES

O.V. Raetskaya

Рассматривается междисциплинарная интеграция как процесс взаимного согласования учебных дисциплин в целях непрерывного и целостного развития компетенций будущего офицера. Описана модель системы формирования компетентности выпускников в военном учреждении высшего образования.

Ключевые слова: междисциплинарная интеграция, содержание высшего образования, профессиональная деятельность, логические связи между дисциплинами, информационные технологии, формирование компетенций

В условиях информационной образовательной среды процесс обучения представляет собой совместное функционирование её главных элементов: «преподаватель», «обучающийся», «объект изучения». Воздействуя друг на друга, они испытывают воздействия «среды» и сами воздействуют на нее (Схема 1).

The article considers the interdisciplinary integration as a process of mutual coordination of academic disciplines in order to continuously and holistically develop the competencies of future officers. A model to the system of competences of the graduates from the military institutions of higher education is described.

Keywords: interdisciplinary integration; content of higher education; professional activity; logical links between disciplines; information technology; formation of competencies

Педагог, изучая и осмысливая информацию по своему предмету, передает ее с помощью определенных средств и методов обучающимся; их взаимный контакт образует необходимую для успешного протекания учебного процесса обратную связь, с помощью которой педагог узнает, как понята и усвоена учебная информация. Наличие спе-

циальных способностей позволяет обучающемуся самостоятельно обращаться с различной информацией, осваивая и резюмируя ее в рефератах, конспектах по предмету.

При необходимости педагог осуществляет дополнительную помощь обучающемуся при изучении объекта.

Схема 1

Модель педагогического процесса в электронной информационной образовательной среде



Основной процедурой системного анализа является построение модели, отображающей состав и взаимосвязи в реальном объекте. Дефиниция «процедура» определяется профессором В.А. Ядовым как общая схема действий и способ организации исследования. Заметим, что моделированию отводится центральное место в ряду составляющих процесса познания: изучение реального объекта и накопление фактов, построение модели и ее изучение, использование полученных новых знаний в практической деятельности.

К основным общенаучным теоретическим положениям, лежащим в основе моделирования, относят положения о подобии модели и объекта, о познавательной и формирующих функциях моделирования и о системности модели. В силу своего бесконечного многообразия, педагогический процесс, как эмпирический объект не может быть непосредственно предметом теоретического изучения. Представляя его как идеальную модель (в классификации В.А. Штоффа) и изучая эту модель – заместитель, мы сможем «перенести обнаруженные отношения на изоморфные связи в реальном объекте» и получить новые знания о самом объекте. В гносеологическом плане моделирование имеет теоретическую функцию – в качестве специ-

фического образа (модели) действительности, а также практическую функцию – как орудие или инструмент научного эксперимента. Вместе с тем моделирование имеет и формирующую функцию, так как модель является прообразом будущего состояния моделируемого объекта, в чем и состоит ее главная функция: «Система – это не сам объект, это способ организации знаний, сведений, то есть информации об изучаемом объекте или явлении с точки зрения определенного наблюдателя и в рамках строго сформулированной задачи».

Руководствуясь этапами моделирования системы, на основе системного анализа нами разработана модель системы формирования компетентности обучающихся военного вуза в электронной информационной образовательной среде:

- проведен анализ нормативно-правовых актов в области образования (базисных учебных планов Государственных образовательных стандартов, психолого-педагогических концепций информатизации образования);
- определена роль дидактических условий внедрения информационных технологий в образовательный процесс;
- спроектирована модель педагогической системы.

На основе анализа существующих концепций информатизации образования уточним, что информационная технология рассматривается нами, вслед за В.П. Беспалько и Г.К. Селевко, как разновидность педагогической технологии, реализуемой на основе вычислительной техники в условиях целостного процесса профессиональной подготовки военных кадров.

На основании проанализированных концептуальных подходов (практико-ориентированный, системный, средовой) к процессу обучения приходим к выводу, что существовавшая практика профессионального обучения удовлетворяла потребностям системы образования, работающей в режиме стабильности. С учетом изменения целей образования, внешних и внутренних предпосылок информатизации образования и появления нового элемента педагогической системы – информационных технологий обучения – возникла необходимость в разработке и апробации новой педагогической системы, адекватной процессам информатизации, происходящим в обществе.

В порядке погружения в дефиницию «структура» приведем несколько ее определений: структура – это частичное упорядочение элементов системы; это «характер взаимосвязи компонентов»; это «то, что охватывает все элементы системы некоторой закономерной связью». Выявить структуру системы означает, с точки зрения А.С. Кравец, «вычленив ее элементы и объединить их некоторой закономерной связью, вскрыв совокупность отношений, существующих между элементами этой системы», и отобразить их при построении модели в виде линий связи. Поскольку педагогическая система является открытой системой, то она, взаимодействуя со средой (обществом), испытывает на себе её влияние, которое выражается в изменении целей образования, характера взаимодействия составляющих ее элементов и возможном появлении новых элементов. Целью педагогической системы становится подготовка будущих офицеров к жизни и службе в условиях информационного общества, подготовка компетентного специалиста, а

сама цель детерминирует содержание учебных дисциплин.

Таким образом, реформа образования отражается в появлении новых структурных элементов, выявлении необходимых условий их интеграции в образовательный процесс и в изменении функционирования всей педагогической системы. Изменения в элементах педагогической системы и ее среды обеспечивают адаптивность к информационным технологиям обучения, а вся педагогическая система получает новое, более высокое качество, обеспечивающее подготовку компетентного офицера. Следовательно, системный подход в педагогике – это учет всех элементов педагогической системы при внесении каких-либо изменений в один из них.

Содержание образования меняет образ будущего офицера – выпускника с высшим образованием. Стратегической целью становится развитие личности обучающегося, системы его ценностей: личностных, общечеловеческих, профессиональных. К числу личностных ценностей, формирующихся в процессе обучения, относятся: познавательные интересы и потребности, социальные мотивы, конструктивное творческое мышление, быстрота принятия решений, оценочные суждения.

Органическая целостность будущего офицера, субъекта образовательного процесса, предполагает междисциплинарную интеграцию в образовательном процессе учреждения военного высшего образования. Под междисциплинарным интегрированным содержанием понимается взаимопроникновение разнокачественных систем содержания образования. Учебный процесс, построенный на междисциплинарной интегративной основе, способствует повышению уровня мотивации обучающихся 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 обучающихся в других об-

ластях 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. 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.

В проектируемой нами системе базовую основу задает учебная дисциплина «Информатика», которая обслуживает внутренние междисциплинарные связи, позволяя формализовать учебный материал использованием некоторых общих методов решения проблем. Информатика, соединяясь с другими учебными дисциплинами, обогащает их содержанием, расширяя представление обучающимся об информационных процессах в обществе, своей будущей профессиональной деятельности.

В основу проектирования системы формирования компетентностного обучающегося в электронной информационной образовательной среде военного учреждения высшего образования положен принцип универсальности содержания учебных дисциплин, освоение которых в ходе процесса обучения требует применения информационных технологий.

За счет интегрирования учебных дисциплин и информатики происходит расширение информационной образовательной среды. Наполнением учебного учреждения со-

временными 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 высшего профессионального образования результаты исследований и передовой педагогический опыт.

В ВУНЦ ВВС «ВВА» филиале г. Сызрани информационные средства представлены: компьютерными лабораториями объединенных локальной компьютерной сетью, что более оправдано и рационально при проведении групповых занятий по автоматизации и спецдисциплинам, чем автономное их использование. Каждому обучающемуся обеспечивается: доступ в электронную библиотеку, где сосредоточено учебно-методическое обеспечение в виде электронных учебников и использование Интернета; выполнение лабораторного практикума в виртуальной лаборатории; тестирование по ряду учебных дисциплин.

Обратимся к содержанию системы формирования конкурентоспособности специалистов. По учебному плану для подготовки будущих офицеров учебная дисциплина «Информатика» является общеобразовательной дисциплиной на первом курсе, на которую выделено 120 часов, из них 46 часов – на теорию и 74 часа – на практические работы. В итоге решаются задачи:

- устранение «компьютерной фобии», возникшей в школе по различным причинам;

- поддержка полученного обучающимися в школе уровня компьютерной грамотности, который без практики быстро теряется, а со временем может быть утрачен вообще;

- выравнивание уровня компьютерной подготовки обучающихся, у которых в школе отсутствовал предмет «Информатика»;

– обучение навыкам работы на компьютере, необходимым для изучения содержания интегрированных спецдисциплин с использованием новых информационных технологий;

– развитие интереса, потребности в использовании компьютерной техники 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 дисциплине придавался не узкоспециальный, а общеобразовательный характер. Содержание «Информатики» конструировалось с учетом внутри- и междисциплинарных связей, чтобы органично интегрировалось с содержанием специальных дисциплин, дополняя и наполняя их новыми технологиями и способами образовательной дея-

тельности. Поэтому в программе курса значительное место уделялось навыкам практического использования информационных технологий, которые позволяют сформировать основы информационной культуры будущих специалистов и готовность к дальнейшему их применению в профессиональной деятельности.

Таким образом, интегрированная учебная дисциплина «Спецдисциплина» и «Информатика» становятся проводником информационной культуры, а интегрированное занятие требует применения новых технологий в комфортных условиях, выявления возможностей применения техники в спецдисциплине (схема 2).

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 производства и образовательного учреждения.

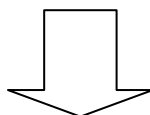
Схема 2

Алгоритм введения обучающихся в электронную информационную образовательную среду

I этап

Изучение учебной дисциплины «Информатика»

Результат: готовность к освоению информационных технологий



II этап

Изучение интегрированной учебной дисциплины «Спецдисциплина» + «Информатика»
принцип отбора содержания – экзemplярность техническая интеграция

Результат: готовность к вхождению
в электронную информационную образовательную среду учебного заведения

Конструирование содержания интегрированной учебной дисциплины на основе «Информатики» и «Спецдисциплины» проводилось с учетом протекания информационных процессов в армии; анализировался имеющийся фонд прикладных и педагогических программных средств, рассматривались требования к информационной подго-

товке специалистов в связи с усложнением техники и технологий.

В отличие от традиционной методики (хронологичность, линейность) отбор содержания по принципу «экзemplярность» имеет свои особенности:

– учебный материал излагается не хронологически, а тематически;

– тематический выбор обусловлен степенью важности излагаемой темы, ее фундаментальностью;

– обучение ведется эвристически – обучающиеся 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 информатизации армии.

С нашей точки зрения, принцип «экземпляльности» находит свое новое воплощение при внедрении в учебный процесс информационных технологий. 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 обучающимися 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 информационных технологий. К ним мы отнесли темы, в усвоении содержания которых большую роль играют наглядность, реальность и возможность моделирования производственных процессов. Совокупность знаний позволяет обучающимся самостоятельно выполнять творческие виды деятельности: выполнять ремонт, регулировку и юстировку особо сложных приборов и аппаратов.

В рамках проблемы отбора содержания обучения педагоги-исследователи

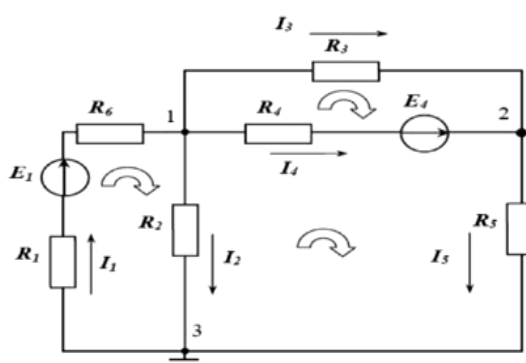
(Е.Л. Белкин, В.П. Беспалько, А.М. Сохор и др.) обосновывают необходимость и целесообразность разработки графической модели логической структуры содержания учебного материала в целях повышения эффективности его изложения. Научный подход к совершенствованию содержания, изложенный в их работах, позволяет выявить взаимосвязь учебных элементов внутри смежных тем интегрированной дисциплины «Спецдисциплина» + «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 «Спецдисциплина» + «Информатика» обучающиеся могли осознать необходимость освоения информационных технологий в своей будущей военной профессиональной деятельности и возможность реального их применения в другой научной области, а оба курса становились для них единой важной учебной дисциплиной. Реализовались главные задачи обучения: развитие целостного видения мира у обучающихся, ориентация на овладение методологическими знаниями и способами продуктивной профессиональной деятельности; развитие умений решать проблемные задачи. По мере изучения дисциплины обучающиеся разрабатывают схему, проводят расчеты на практических занятиях по информатике с помощью текстовых и графических редакторов и программ «EW», «Multisim 10». В итоге объем и качество выполнения работы зависят от уровня знаний обучающихся как по электротехнике, так и по информатике.

Рассмотрим решение задачи (для схемы электрической цепи постоянного тока найти токи в ветвях цепи) прикладного характера при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники», которая демонстрирует интеграцию тем трех общеобразовательных дисциплин: физика, математика, информатика (Схема 3).

Схема 3

Схема цепи постоянного тока



Пусть в схеме дано:

 $E_1 = 30 \text{ В}, E_4 = 100 \text{ В}, R_1 = 2 \text{ Ом}, R_2 = 6 \text{ Ом}, R_3 = 2,5 \text{ Ом}, R_4 = 10 \text{ Ом}, R_5 = 4 \text{ Ом}.$

Положительные направления тока в ветвях выбираем произвольно, по часовой стрелке. Запишем уравнения по законам Кирхгофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0, I_3 + I_4 - I_5 = 0, I_1 \cdot (R_1 + R_5) + I_2 \cdot R_2 = E_1, I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 = -E_4, I_4 \cdot R_4 + I_5 \cdot R_5 - I_2 \cdot R_2 = E_4.$$

Система уравнений в матричной форме выглядит так: $A \cdot I = B$, где

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ R_1 + R_6 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & -R_4 & 0 \\ 0 & -R_2 & 0 & R_4 & R_5 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_1 \\ -E_4 \\ E_4 \end{pmatrix}.$$

Решив систему уравнений, рассчитаем токи в цепи. Система уравнений решается любым методом из курса математики (матричным методом, Крамера или Гаусса). С помощью системы MathCAD, изучаемую в курсе «Информатика», можно решить получившуюся систему уравнений. Для этого

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ R_1 + R_6 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & -R_4 & 0 \\ 0 & -R_2 & 0 & R_4 & R_5 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_1 \\ -E_4 \\ E_4 \end{pmatrix}, \quad I = A^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} 6.667 \\ 1.667 \\ -4 \\ 9 \\ 5 \end{pmatrix}.$$

В итоге реализации системы формирования компетентностных будущих офицеров в электронной информационной образовательной среде обеспечивалось развитие показателей компонентов в структуре компетентности: принятие обучаемыми личностных и профессиональных ценностей на основе соотнесения своих профессиональных намерений с личностными возможностями (состояние здоровья, склонности); проявлялась готовность к принятию обоснованного решения в процессе профессиональной деятельности; вырабатывались способности достигать личностных и профессионально значимых результатов при выполнении задания и оценивать результаты труда; увеличивался объем знаний, не-

необходимо ввести следующую последовательность операторов:

 $\text{ORIGIN} := 1$
 $E1 := 30 \text{ В} \quad E4 := 100 \text{ В} \quad R1 := 2 \text{ Ом} \quad R2 := 6 \text{ Ом}$
 $R3 := 2.5 \text{ Ом} \quad R4 := 10 \text{ Ом} \quad R5 := 4 \text{ Ом}$
 $R6 := 1 \text{ Ом}$

обходимых для принятия грамотных профессиональных действий, вырабатывались условия взаимодействия с членами коллектива и способность к оценке, самооценке, самоанализу. Выделенные показатели позволяют определить уровень компетентности: неудовлетворительный, низкий, средний, высокий.

Таким образом, процесс информационной подготовки обучающихся в военном учреждении высшего образования обеспечивался реализацией системы формирования компетентности специалистов (система представляет часть общей системы профессиональной подготовки, способствующей достижению цели – формированию компетентности специалистов в электронной информационной

образовательной среде, интегрирующей организационно-процессуальный, содержательно-технологический, оценочный блоки).

1. Организационно-процессуальный блок системы представлен моделью личности компетентного специалиста, суть которой представлена интегративным свойством, а структура – совокупностью четырех компонентов. Этапы формирования компетентного специалиста (теоретический и практический) обеспечивают выработку готовности к деятельности на основе алгоритма реализации информационной подготовки. В качестве факторов формирования выпускника военного вуза – будущего офицера выступают внешние предпосылки (общественно-политические, научно-технические) и внутренние предпосылки (цели высшего образования, содержание и виды обучения, информационные технологии и оценка результатов профессиональной подготовки).

2. Содержательно-технологический блок в системе выполняет ряд функций: организация социально-педагогической поддержки обучаемых на основе принципов гуманистического образования и способов проявления человеколюбия; творческая направленность процесса обучения и воспитания; информационная подготовка обучающихся к вхождению в профессиональную сферу и успешной адаптации в ней; обращение к позитивному образу профессионального будущего как основы самореализации; организация взаимодействия в учебной группе, которая является прообразом будущего военного коллектива.

Содержание блока представлено учебной и внеучебной деятельностью будущих офицеров. Учебная деятельность направляется на освоение интегрированной учебной дисциплины «Спецдисциплина» + «Информатика», внеучебная деятельность побуждает к освоению информационных технологий для будущей самореализации в информационной военной сфере. Результаты освоения содержания представляются компетентность будущего специалиста, уровень которой определяется при помощи диагностического, критериально-оценочного инструмента, что позволяет судить о качестве внедрения нововведений, оперативно внести необходимые кор-

рективы во все виды деятельности. В силу целостности педагогической системы появление нового элемента – информационных технологий обучения – приводит к перестройке всех других элементов системы: качественно изменяется учебная информация (комплекты педагогических программных средств, мультимедиа среды и сети персональных компьютеров), организационные формы становятся более разнообразными и гибкими, чем при традиционной аудиторно-урочной системе, учитывается темп усвоения учебного материала каждым обучающимся, его подготовленность и стиль умственной деятельности.

Информационные технологии и средства мультимедиа обеспечивают возможность интеграции словесных, наглядных и практических методов обучения, позволяя наиболее успешно решать поставленные задачи и реализовывать необходимое содержание образования. Частные методики учебных предметов, наряду с конкретным содержанием, совокупностью форм и методов обучения учебному предмету, сопровождаются нормативно-техническими и организационно-инструктивными рекомендациями для обучающихся по использованию программных средств при работе на компьютере, что требует от них компьютерной грамотности и информационной культуры. Навыки использования информационных технологий предполагают умения применять программные средства: информационно-поисковые системы, графические и текстовые редакторы, электронные таблицы, мультимедийные пакеты прикладных программ, программные средства учебного назначения в режиме интерактивного управления процессами конструирования и моделирования объектов определенной профессиональной деятельности.

Вместе с этим усложняется деятельность преподавателя, организующего среду, внедряющего информационные технологии в учебный процесс. С внедрением в педагогический процесс компьютеров и информационных технологий обучения обратная связь приобретает индивидуальный характер, становится более объективной и оперативной,

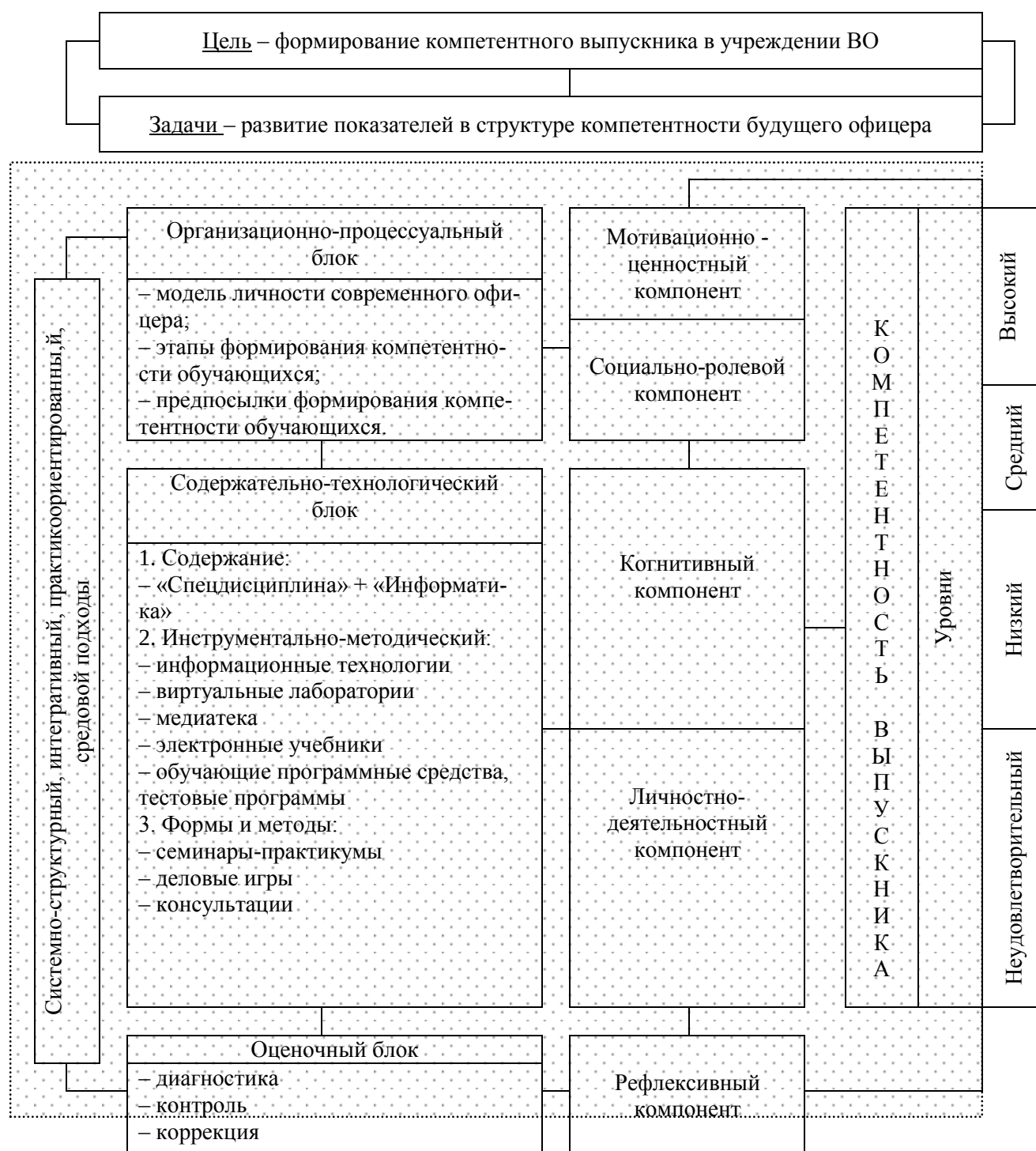
стимулируя рефлексию. Под рефлексией понимается форма теоретической деятельности человека, направленная на осмысление содержания своих собственных действий.

3. Оценочный блок. Уровень сформированности компетентности будущего специ-

алиста нами определяется при помощи диагностики, на основе которой можно судить о качестве функционирования разработанной системы, а также вносить необходимые коррективы во все виды обучающей деятельности (схема 4).

Схема 4

Система формирования компетентности выпускников
в военном учреждении высшего образования



Внешняя обратная связь предполагает контроль и оценку в виде контрольных, зачетных, лабораторных работ; организацию компьютерного моделирования и компьютерного разноуровневого тестирования. Тест – это педагогический инструмент, который позволяет выявить определенный факт сформированности личности обучающегося. Для этого использовалась специально разработанная программа – оболочка, позволяющая педагогам самостоятельно конструировать тесты по предметам с любой формой ответа (на узнавание, на различение, на классификацию, тесты-подстановки, тесты-копии, с конструктивным ответом). По результатам контроля можно судить об уровнях сформированности у обучающихся проектируемых знаний, умений и навыков практической деятельности: низкий, средний или высокий. По завершению контроля необходим анализ ошибок, характерных для низкого и среднего уровня сформированности теоретических знаний и профессиональных умений и навыков и, при необходимости, планирование целесообразной коррекции в содержании, формах и методах обучения для достижения результатов обучения. При проверке отчетных работ использовалась методика оценки знаний, разработанная на основе требований Государственного образовательного стандарта высшего образования.

Работы первого уровня, включающие освоение основных разделов курса на уровне узнавания и воспроизведения, соответствуют оценке «удовлетворительно» и являются допуском к экзамену (низкий уровень). Работы второго уровня включают дополнительные действия обучающихся и требуют самостоятельного выполнения по памяти типовых действий – средний уровень. Работы третьего уровня содержат определенные элементы творческого применения полученных знаний, перенос знаний в новые ситуации, что соответствует высокому уровню усвоения содержания обучения. Работы второго и третьего уровней оценивались оценками «хорошо» и «отлично» и могли служить освобождением от экзамена.

Таким образом, образовательная среда на основе новых информационных технологий является основой для междисциплинарной интеграции. Реализация идей интеграции требует изменения педагогического мышления преподавателей, повышения их квалификации. Информатика, обслуживая внутренние междисциплинарные связи, соединяется с другими предметами, способствуя осознанию необходимости освоения информационных технологий и применения их в производственной деятельности. Реализация интегрированного курса в целом способствует повышению качества подготовки специалиста, его компетентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Митрофанов С.В.** Использование системы Mathcad при решении задач электротехники и электромеханики: методические указания к выполнению РГЗ по дисциплине «Прикладные задачи программирования» / С.В. Митрофанов, А.С. Падеев. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. 40 с.

2. **Перехожева Е.В.** Формирование профессиональной компетентности студентов технических вузов на основе междисциплинарной интеграции: автореф. дис. ... канд. пед. наук: 13.00.08. Чита, 2012. 25 с.

3. **Шибает В.П.** Моделирование и организация учебной деятельности студентов на основе междисциплинарной интеграции: автореф. дис. ... канд. пед. наук: 13.00.08. Ставрополь, 2008. 22 с.

4. **Afanasova D.K.** Features of Realization of Interdisciplinary Integration of Natural-Science and Technical Blocks of Disciplines / D.K. Afanasova, Z.Z. Utyaganova // Mediterranean Journal of Social Sciences. 2015. № 6(S3). P. 71-77.

Раецкая Ольга Вилоровна – кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры «Математика и естественнонаучные дисциплины» ВУНЦ 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, Military Educational and Scientific Center of the Air Force Academy, Syzran branch

Статья поступила в редакцию 17.02.18, принята к опубликованию 28.03.18



ЛЕТОПИСЬ

АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БОЗРИКОВ



Алексей Васильевич Бозриков окончил Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. по специальности «Электротехнологические установки и системы».

После окончания СГТУ имени Гагарина Ю.А. по кафедре «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Алексей Васильевич поступил на эту кафедру в аспирантуру по специальности 05.09.10 – Электротехнология и продолжил начатые еще в студенческие годы исследования в области создания эффективно поглощающих СВЧ энергию искусственных диэлектриков.

Участвовал в организации и издании журнала «Вопросы электротехнологии».

В 2013-2014 гг. наш журнал «Вопросы электротехнологии» издавался с помощью Алексея Васильевича. Освоение верстки текста в две колонки – это его рук дело. В двух номерах журнала опубликованы его статьи.

Алексей Васильевич в 2017 г. сделал доклад на кафедре «Электроснабжение и электротехнология» СГТУ имени Гагарина Ю.А. о результатах своих научных исследований, ему оставалось учесть замечания и можно было защищать кандидатскую диссертацию, но Алексей Васильевич в начале 2018 г. подал заявление об увольнении и перешел на работу на производство. В ноябре 2016 г. в СГТУ объединили кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» (АЭУ) и «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) в одну кафедру

«Электроснабжение и электротехнология» (ЭЛЭТ), появились новые задачи и перспективы. Алексей Васильевич принял активное участие в разработке и оснащении кафедры наглядной информацией.

Почему уходят из высшей школы молодые? Ровно год назад, отказавшись завершить работу над докторской диссертацией, с кафедры ЭЛЭТ на производство ушла Е.М. Гришина, которая, как и А.В. Бозриков, участвовала в работе над журналом «Вопросы электротехнологии».

«Редакция журнала «Вопросы электротехнологии» благодарит Алексея Васильевича за сотрудничество, желает ему успехов на новом месте работы и надеется, что Алексей Васильевич успешно завершит работу над кандидатской диссертацией. Желаем Вам, Алексей Васильевич, успехов!

Главный редактор журнала
«Вопросы электротехнологии»
Архангельский Ю.С.

НЕКОТОРЫЕ СТРАНИЦЫ БИОГРАФИЙ РУКОВОДИТЕЛЕЙ СПИ – СГТУ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Э.В. Костяев

Человек – как роман: до самой последней
страницы не знаешь, чем кончится.

Иначе не стоило бы и читать...

Евгений Замятин
(Роман «Мы»)

В 2018 г. перед работниками Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. стоит не только вопрос, кому доверить пост № 1 в стране, избирая Президента Российской Федерации. Нам, сотрудникам СГТУ имени Гагарина Ю.А., предстоит решить, с каким руководителем и по какому пути наш университет пойдёт в будущее. Вполне уместным и поэтому, думается, весьма полезным и актуальным в преддверии новых выборов ректора будет познакомиться с некоторыми вехами жизни людей, возглавлявших наш вуз ранее, в прошлом.

Далеко не всем, к сожалению, известно, что начать получать высшее техническое образование в Саратове стало возможно не в 1930 г., когда был создан автодорожный институт, а одиннадцатью годами ранее, в жестокое время кровавой гражданской войны и тягот «военного коммунизма», когда в 1919 г. в нашем городе появился Политехнический институт.

Это малоизвестное событие требует небольшого исторического экскурса. 3 сентября 1911 г. Саратовское среднее техническое училище ходатайствовало о преобразовании его в Политехникум, а в 1913 г. были разработаны план и смета расширения здания училища под Политехникум. Спустя 3 года Саратовское городское управление, заручившись под-

держкой соседних губерний, разработало проектно-сметную документацию на открытие в городе Политехнического института. По требованию вышестоящих инстанций 2 ноября 1917 г. и 1 апреля 1918 г. сметы по расширению здания училища перерабатывались, а в плоскость практического осуществления проект преобразования Саратовского политехнического училища в институт был поставлен на рубеже 1918 и 1919 гг. [1].

В самом начале лета 1919 г. были набраны преподаватели открывавшегося вуза, а 5 июня на их заседании председателем Коллегии по делам Саратовского политехнического института (СПИ) был избран блестящий инженер и настоящий энтузиаст внедрения электричества в саратовскую повседневность начала XX века Александр Александрович Лаговский. В 1894 г. он закончил Санкт-Петербургский технологический институт и в течение года работал на Невском судостроительном заводе. Затем переехал в Саратов и начал службу в штате технического отделения Городской управы. Зарекомендовав себя знающим специалистом, Александр Александрович вскоре стал совмещать обязанности городского инженера-электротехника и заведующего Театральной электростанцией. Эта первая в Саратове станция была сооружена для освещения городского театра (ныне Театр оперы и балета). В 1909 г., после заклю-

чения городской Думой договора с Бельгийским акционерным обществом, устроившим в Саратове трамвай и уличное электрическое освещение, для надзора за деятельностью этого акционерного общества в управе была создана контрольная станция. Заведовал ею также Лаговский. Можно с уверенностью утверждать, что он стал тогда главным человеком, командовавшим производством и использованием электроэнергии в Саратове [2].

Александр Александрович был блестящим инженером, стремившимся внедрить в повседневность новейшие достижения научной мысли. Так, его предложения по установке на Театральной станции дизеля сделали бы её электроэнергию дешевле и конкурентоспособнее, чем у бельгийского акционерного общества. К сожалению, городская Дума не нашла средств на приобретение дизеля. Не оказалось у городской власти финансов и для другого предложения Лаговского – использовать электричество для обеззараживания воды. С помощью электрического разряда при высоком напряжении из кислорода получался озон, обладавший сильной окислительной способностью и легко губящий бактерии. Такой способ обеззараживания воды впервые был применён в 1895 г. в Лейдене. С 1904 г. во Франции на реке Сене озонная станция очищала до 150 кубометров воды в час. Выслушав доклад Лаговского, гласные Думы признали, что озонирование воды экономически выгодно, строительство станции технически возможно, да, как всегда, денег нет [2].

Между тем достаточно долго в 1919 г. не удавалось найти собственное помещение для Политехнического института. И тогда на помощь пришёл Саратовский университет (СУ). Согласно заявлениям его профессора-химика В.В. Челинцева о наличии свободных помещений было постановлено просить Правление СУ дать разрешение пользоваться его физической аудиторией и химическим корпусом. Занятия СПИ было решено начать 16 июня 1919 г., устроив в 13.00 15 июня открытие нового вуза в

1 корпусе СУ. Состоял СПИ на первых порах из 4 факультетов: механического, строительного, химического и электромеханического. Юридическим же адресом института стал следующий: ул. Астраханская, д. 69 (позже СПИ стал ещё хозяином помещения бывшего Коммерческого училища на ул. Советской, д. 84). Первые лекции в первый день существования СПИ, в понедельник 16 июня, прочитали профессора СУ: по физике – ректор В.Д. Зёрнов, а по математике – Г. Свешников. Кстати, первыми книгами, которые на заседании Коллегии СПИ 29 августа 1919 г. было решено купить на местных книжных складах для восьмью днями ранее созданной фундаментальной библиотеки вуза, стали «Теория электромагнитного поля» Б.В. Станкевича и «Руководство по электрохимии» М. Леблана [1].

17 октября 1919 г. председателем Президиума СПИ (он же – председатель Совета института и председатель Электромеханического факультета) был избран А.А. Лаговский. Для него, как и для многих других преподавателей нового вуза, он не был единственным местом работы. Основным местом службы А.А. Лаговского являлся Губернский коммунальный отдел, где он заведовал всеми городскими предприятиями. Политехническому институту же, как выражался сам Лаговский, он «уделял... свой досуг, ведал в нём... лишь учебно-научной частью, не касаясь части хозяйственно-административной» [1].

Особенностями исторического развития тогдашней России было вызвано радикальное изменение принципов и структуры управления СПИ, произошедшее в октябре 1920 г. На заседании Президиума Совета института 14 октября выступил с докладом один из его членов от слушателей И. Гольдин. Он сообщил, что по ходатайству революционного студенчества Главным комитетом профессионально-технического образования (Главпрофобром) с 8 октября «для быстрого проведения в жизнь ударных заданий Саратовского политехнического института» в нём назначена Революционная двойка в лице

ректора (именно так с 4 октября 1920 г. стал официально именоваться председатель Президиума Совета СПИ [1]) А.А. Лаговского и его, И. Гольдина как представителя революционного студенчества, «которые должны ведать как научно-учебной, так и хозяйственно-административной жизнью института». При этом он уверял, что ректора Лаговского включили в Революционную двойку именно по его, студента И. Гольдина, ходатайству перед Главпрофобр. Формальное утверждение новой структуры управления произошло 25 октября на соединённом заседании Революционной двойки из ректора и комиссара института, Президиумов Совета и Хозяйственного комитета СПИ. Однако всё расставила на свои места в смысле разделения сфер влияния ректора и комиссара поездка А.А. Лаговского в Москву в ноябре 1920 г. Вернувшись в Саратов и докладывая 25 ноября на заседании Революционной двойки и Правления СПИ о своих переговорах в Главпрофобре с членом его Коллегии Фридрихом Ленгником, он сказал, что «нормальных правил управления вузом пока не выработано: для Саратовского политехнического института остаётся Ревдвойка, состоящая из ректора, на которого возлагается вся учебно-научная и хозяйственная часть, и из комиссара, на которого возлагаются регулировка и управление студенческой жизнью». В декабре 1920 г. ректор потерял должность декана электромеханического факультета, поскольку на выборах получил меньше голосов (9 против 13), чем занявший его место и являвшийся до этого профессором Томского технологического института В.М. Хрущёв. Зато в марте 1921 г. ректора А.А. Лаговского избрали заведующим тогда же утверждённой на строительном факультете кафедрой водоснабжения и канализации [1].

Однако в 1921 г. в Советской России наблюдалась тяжелейшая экономическая ситуация. Имеется в виду, среди прочего, и масштабный продовольственный кризис, в результате которого конкретно в

Поволжье начался голод. Проблема снабжения сотрудников и студентов СПИ продуктами питания с начала 1921 г. стояла очень остро. В марте руководство института обратилось в Главпрофобр с обоснованием права служащих на продовольственный паёк, но в ответ прозвучал отказ. Одновременно Губпрофобр ввёл новый тариф оплаты, который ухудшил материальное положение сотрудников и по которому ректор, например, стал получать зарплату меньше, чем уборщица. В марте 1921 г. по до сих пор неизвестным причинам А.А. Лаговского на некоторое время арестовывала Всероссийская чрезвычайная комиссия. В августе прошло первое сокращение факультетов СПИ. Был закрыт разведочно-геологический и слиты факультеты сухопутных и водных путей сообщения в один путейский. 11 октября на заседании Правления ректор А.А. Лаговский доложил о решении Коллегии Народного комиссариата просвещения (Наркомпроса) прекратить финансирование и закрыть СПИ. И, наконец, 15 ноября 1921 г. его ректор последний раз выступил перед своими коллегами и объявил, что деятельность первого высшего технического заведения в Саратове прекращается вследствие тяжёлого экономического положения в стране и конфликта между центральной и местной властями. Он высказал надежду, что это временно и «в недалёком будущем политехнический институт возродится вновь» [1]. Сбылось это предположение первого ректора первого в Саратове технического вуза лишь через 9 лет. Про самого же А.А. Лаговского известно, что в 1928 г. его, как одного из опытейших специалистов, перевели на ударную стройку – Сталинградский тракторный завод. Через 3 года он вошёл в штат Наркомата коммунального хозяйства СССР. Завершился же жизненный путь Александра Александровича в Москве в 1939 году [2].

В конце 20-х годов прошлого века тихий провинциальный Саратов вместе со всей страной радикально менял свой облик. Советский Союз превратился в

огромную стройку. Возводились гигантские заводы, мощные электростанции, прокладывались тысячи километров дорог, цоканье конских копыт по брусчатке заглушили гудки автомобильных клаксонов. Труднопроизносимый термин «индустриализация» обретал реальные очертания, всё осязаемое становилось нехватка кадров рабочих, техников и, в особенности, инженеров, способных идти в ногу со временем. По решению советского руководства тогда открывались десятки вузов, среди которых был и Саратовский автомобильно-дорожный институт (САДИ). Приказ Наркомата путей сообщения № 1663 о его организации был издан 21 июля 1930 г., а директором нового вуза был назначен 37-летний работник Орловского губсовнархоза Евсей Маркович Цалихин (1893-1967).

Родился он 4 ноября 1893 г. в селе Дубовичи Черниговской губернии в многодетной семье счетовода. Отца потерял в менее чем годовалом возрасте, после чего воспитывался в семье дяди, благодаря которому и получил образование, окончив Одесский политехнический институт. В 1916 г. начал трудовую деятельность и, будучи военнообязанным, в годы Первой мировой войны работал техником на постройке госпиталей и военных барачков в Орле, а в первые годы Советской власти – в губернском земстве. После образования губернского Совета народного хозяйства (Губсовнархоза) являлся уже инженером, а затем и заведующим производственным подотделом в Отделе металлов.

В 1918-1919 гг. Евсей Маркович активно участвовал в национализации частных предприятий. Стоит отметить, что часть технической интеллигенции в те годы не приняла Советскую власть, другая относилась к ней с недоверием, немало инженеров и вовсе покинули страну и отправилось в эмиграцию. Советскому Союзу крайне необходимы были квалифицированные специалисты, которым можно было доверять. И их стали готовить из рабочих. Будущий директор САДИ организовал в эти годы в Орле первые техниче-

ские курсы для пролетариев. Работа была, видимо, успешной, поскольку в 1920 г. Е.М. Цалихина вызвал в Москву начальник Главного управления профессионального образования Наркомпроса О.Ю. Шмидт, а обратно Евсей Маркович вернулся уже заведующим Орловским Губпрофобром. Проработал он на этой высокой должности 8 лет, организовав в Орле индустриальный, вечерний рабочий техникум и техникум пчеловодства, являлся их директором, преподавал технологию металлов и машиноведение. Кроме того, был председателем губернского бюро инженеров и техников при Губпрофсовете, а также депутатом Орловского горсовета.

В 1928 г. в связи с созданием Нижне-Волжского края Наркомпрос направил Е.М. Цалихина в Саратов руководить профессионально-техническим образованием Крайпрофобра. Работу в нём он успешно совмещал с преподаванием в Саратовском индустриальном техникуме, ведя там курс технологии металлов и дерева. В начале июня 1930 г. руководители Краевого комитета дорожно-транспортного строительства (Крайдортранса) предложили Евсею Марковичу открыть в Саратове автодорожный институт. И уже спустя несколько дней он передал в Краевой комитет (крайком) ВКП(б) и Краевой исполнительный комитет Советов рабочих и крестьянских депутатов (Крайисполком) подготовленное им обоснование создания такого института. 23 июня начала работать Вторая краевая партийная конференция, которая приняла план развития Нижне-Волжского края, предусматривавший открытие в Саратове автодорожного института.

Состоял он на первых порах лишь из двух факультетов: автомобильного (для подготовки инженеров-механиков по эксплуатации и ремонту автомобилей) и дорожно-строительного (для подготовки инженеров по строительству дорог и мостов). 16 сентября 1930 г. газета «Поволжская правда» опубликовала первое объявление об условиях и порядке приёма

студентов в САДИ, на которое откликнулись множество молодых людей, количество их в 2,5 раза превышало запланированное число мест. К концу сентября было набрано 445 студентов, а 6 октября 1930 г. в Клубе профтехобразования (угол улиц Московской и Соборной) состоялось торжественное открытие института, где Евсей Маркович произнёс исторические слова: «Объявляю Поволжский автомобильно-дорожный институт открытым» [3].

Пафос открытия быстро сменился не очень радостными рабочими буднями, поскольку вести учебный процесс было нелегко, по причине чего получение образования первым набором началось весьма необычно – с 20-дневных военных сборов и производственной практики. Именно поэтому учёба в январе 1931 г. началась в разных, не всегда приспособленных помещениях, без стационарной учебно-методической базы. Ситуация с помещениями для занятий была столь серьёзной, что в апреле 1931 г. в условиях отсутствия финансирования и материальной базы Е.М. Цалихину было объявлено о предполагаемом закрытии института «как не имеющего перспектив для развития» [3].

Однако руководство края решило принять все меры, чтобы сохранить САДИ. Для его временного размещения было предоставлено большое 4-этажное здание Сельскохозяйственного института (СХИ) в центре города, на углу улицы Радищева и Театральной площади, где институт благополучно функционировал до 1934 г. Одновременно Е.М. Цалихин отправился в Москву с проектом нового здания САДИ. Отмечаемые в воспоминаниях студентов неутомимая энергия и обаяние Евсея Марковича, а также его умение заразить своим энтузиазмом других, очевидно, были не последними факторами, повлиявшими на итоговый успех этой его поездки. 6 октября 1931 г. Крайисполком объявил строительство здания САДИ ударным объектом. В результате к 1934 г. институт имел учебное здание, 22 кафедры, 27 кабинетов и лабораторий, механические мастерские. К началу 1935/1936

учебного года в вузе насчитывалось 2600 студентов, работали 5 профессоров и 17 доцентов. У САДИ было своё подсобное хозяйство в 250 га, свиноводник на 150 голов, столовая на 400 человек, многоготиражка «Мотор и дороги», основанная ещё в декабре 1930 г. 22 ноября 1934 г. Центральное управление дорожно-транспортного строительства (Цудортранс) издало приказ, в котором отметило успехи САДИ в создании собственной материальной базы, в организации учебного процесса и в улучшении культурно-бытовых условий студенчества и профессорско-преподавательского состава [3].

Нельзя сказать, что арест Евсея Марковича 22 июня 1936 г. был громом среди ясного неба, потому что такие аресты в 30-е годы, к сожалению, не были чем-то из ряда вон выходящим. Исполнение обязанностей директора САДИ было возложено на Я.П. Аболинса. 29 июля 1936 г. Е.М. Цалихина осудили по пресловутой 58-й статье «Контрреволюционная деятельность» и сослали на 5 лет в Воркуту. Жена и дети Евсея Марковича переехали в Аткарск. Туда же вернулся и он сам после освобождения из лагеря, случившегося 22 июня 1941 г.

Жизнь нужно было начинать сначала. И началась новая жизнь с работы преподавателем железнодорожного училища № 2. Через некоторое время он стал директором вновь созданного железнодорожного училища № 5, а в 1946 г. приказом Наркомата путей сообщения ему было присвоено звание инженера-майора железнодорожных войск. Только в 1955 г., то есть через 19 лет после ареста, определением Верховного суда СССР Евсей Маркович был полностью реабилитирован и восстановлен в КПСС. В 1956 г. вышел на пенсию, вернулся в Саратов, поселился в Агафоновке, вблизи от родного института. С увлечением занимался садом, много внимания уделял внукам, его часто навещали бывшие студенты. В 1946 г. Е.М. Цалихин был награждён медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг.».

а спустя 4 года – нагрудным знаком «Отличник государственных трудовых резервов». Скончался же он в 1967 г. и был похоронен на Воскресенском кладбище Саратова.

Между тем его арест в 1936 г. трагически отразился на судьбе САДИ. Якобы контрреволюционная деятельность его руководителя привела к пристальному изучению правоохрнительными органами всей институтской администрации. В течение двух последующих лет проводилась интенсивная идеологическая обработка профессорско-преподавательского состава и кардинальная перестройка всей образовательной структуры вуза. Период вынужденного безвластия закончился только 13 сентября 1938 г., когда его новым директором был назначен Иван Иосифович Прокофьев (1902-1970). Возглавив САДИ в столь непростое время, он оставался его бессменным руководителем на протяжении 24 лет.

Родился Иван Иосифович 12 апреля 1902 г. на небольшой станции Никифорова Рязано-Уральской железной дороги (РУЖД) (ныне одноимённый райцентр Тамбовской области) в семье рабочего-железнодорожника. Позже семья, в которой Иван был третьим ребёнком (всего у его родителей, Иосифа Михайловича и Матрёны Дмитриевны, было 6 детей), переехала на станцию Сабурово (ныне село Старое Сабурово Никифоровского района Тамбовской области). После смерти матери в 12-летнем возрасте он пошёл трудиться ремонтным рабочим. В 1915 г. окончил полный курс Тамбовского двухклассного железнодорожного училища Министерства народного просвещения, после чего 2 года трудился в качестве путейского ремонтного рабочего на станции Сабурово. В 1917 г. он был принят учеником телеграфиста на станцию Тамбов, по окончании учебы остался работать на той же станции, а в 1919 г. трудился уже на станции Кирсанов Тамбовской губернии [4].

В 1918 г. И.И. Прокофьев стал членом Российского коммунистического союза

молодёжи (РКСМ). В конце апреля 1920 г. на Советскую Украину вторглись польские войска и в начале мая того же года захватили Киев. Открылся Польский фронт, и на борьбу с белополяками посылали самые боеспособные части Красной армии. Из Тамбова на войну с Польшей 13 июня 1920 г. вышел бронепоезд, на котором в составе колонны телеграфной связи находился и Иван Иосифович. На Польский фронт он отправился добровольцем, получил там ранение. Было невероятным везением, что И.И. Прокофьев остался жив после того, как шальная пуля прошла через шею насквозь, на волосок от позвоночника. На фронте же, в январе 1920 г., его приняли в члены ВКП(б). После окончания гражданской войны он был демобилизован и вернулся в ноябре 1920 г. на родную Тамбовщину [4].

С марта 1921 г. И.И. Прокофьев трудился политическим контролёром телеграфа станции Тамбов, а затем его перевели в Саратов заместителем комиссара участка службы связи и электротехники РУЖД. В ноябре того же года Политический отдел РУЖД направил его на работу оперуполномоченным в органы ВЧК (Всероссийской чрезвычайной комиссии по борьбе с контрреволюцией и саботажем при СНК РСФСР). Затем он стал начальником отдела по борьбе с экономической контрреволюцией краевого ОГПУ (Объединённого государственного политического управления при СНК СССР) и вёл борьбу с экономическими диверсиями, бандитизмом, фальшивомонетчиками и нэпманами. В декабре 1927 г. ОГПУ наградило своего чекиста-бойца почётным боевым оружием «Браунинг» с надписью «За беспощадную борьбу с контрреволюцией». Однажды, это было уже в конце 20-х годов, Ивану Иосифовичу было доверено охранять и сопровождать Сталина, которому его представили как «стойкого партийца». Возвращаясь из Царицына (нынешний Волгоград), Иосиф Виссарионович заехал в Саратов и поздно ночью провёл закрытое совещание в крайком партии на улице Советской. По-

сле совещания Сталин решил пройтись по городу и попросил, чтобы, кроме Прокофьева, его никто не сопровождал. Из состоявшейся между ними беседы нам стало известно, что, кроме борьбы с белополяками в годы гражданской войны, Иван Иосифович повоевал также на внутреннем фронте против банд Антонова, Сапожкова и Попова. Прощаясь с И.И. Прокофьевым уже на железнодорожном вокзале в своём поезде, Сталин взял с него слово «напомнить вскоре о себе» [4].

В ОГПУ Иван Иосифович проработал до 1929 г. Как и многим другим, вера в справедливость помогла ему сохранить руки и совесть чистыми. Когда ОГПУ было преобразовано в Народный комиссариат внутренних дел (НКВД), он стал удивляться методам новых чекистов. Его наказали, отправив в Свердловск (ныне Екатеринбург) заниматься тушением лесных пожаров. Параллельно к 1926 г. он окончил трехлетний курс Второй школы взрослых повышенного типа, после этого поступил на промышленное отделение Факультета права и хозяйства СГУ имени Н.Г. Чернышевского и в 1930 г. окончил в нём курс по организационно-производственному циклу металлопромышленности с присвоением звания инженера-экономиста. Это позволило ему уйти из «органов» [4].

После окончания СГУ в течение двух лет И.И. Прокофьев работал сначала инженером, а потом начальником Отдела рационализации производства Нижневолжского Краевого Совета народного хозяйства (Крайсовнархоза). В эти же годы его пригласили преподавать в Саратовский технологический институт (СТИ), на кафедру «Организация и планирование производства». В 1930-1932 гг. он учился в аспирантуре СГУ. В 1932 г. крайсовнархозы в стране ликвидировали, что позволило Ивану Иосифовичу окончательно перейти на работу в СТИ в качестве аспиранта-ассистента. Позже он занял должность ассистента, затем исполняющего обязанности доцента кафедры «Организация и проектирование ремонтных пред-

приятий». Одновременно он являлся заместителем директора по учебной работе. За это время под его руководством и при его непосредственном участии на Саратовском машиностроительном заводе «Универсаль» были выполнены и реализованы проекты современной организации инструментального и складского хозяйства завода, а на Саратовском заводе комбайнов (позже авиационном) он разработал и осуществил проект организации оперативного планирования производства и провёл работу по паспортизации оборудования [4].

В 1934 г. на базе СТИ и Московского машиностроительного института был создан Институт механизации сельского хозяйства (ИМСХ) имени М.И. Калинина, подчинявшийся Наркомату земледелия. И.И. Прокофьева назначили директором института. Находясь на этой должности, он расширял возможности вуза по подготовке квалифицированных профессионалов. Готовили в нём тогда студентов по 4 специальностям: кузнечной, литейной, механосборочной и конструкторской. Началось строительство производственных мастерских, студенческих общежитий, велось освоение 60 гектаров земли под учебно-опытные участки. Институт расширился за счёт перевода факультета механизации из Саратовского СХИ [4].

В 1937 г. И.И. Прокофьев был избран председателем Саратовского горисполкома и членом Президиума облисполкома, в связи с чем от работы в ИМСХ был освобождён. Уже тогда город Саратов, который было доверено возглавить Ивану Иосифовичу, выгодно отличался от других областных центров размерами и уровнем учреждений культуры. Наш город и сейчас многие не без оснований считают «культурной столицей Поволжья». Театры, музеи, вузы ещё в 30-е годы сделали город тем, что вскоре станут шутливо, но справедливо называть «Профессаратов». В период руководства И.И. Прокофьева открылось Отделение государственной филармонии, сделавшее жизнь в городе полновочнее. Новое учреждение культу-

ры стало местом формирования и развития системы концертов, «отделки» артистических кадров и привлечения перво-классных коллективов и исполнителей в качестве гостей-гастролёров, в первую очередь из Москвы. Незабываемым было выступление в Саратове в 1937 г. знаменитого Русского народного хора имени М. Пятницкого. Также при Прокофьеве широко открыл свои двери «Дом книги» на углу проспекта Кирова и улицы Вольской. Это стало заметным событием для всего СССР. Недаром изображение «Дома книги» появилось на страницах 1-го издания «Малой Советской энциклопедии» в посвящённой Саратову статье. На посту руководителя города Иван Иосифович пробыл менее года. Провозглашая с высокой трибуны праздничные лозунги на демонстрации, он застудил горло и сорвал голос. Лечиться пришлось долго, и его по болезни освободили от служебных обязанностей [4].

В 1938 г. И.И. Прокофьев был назначен директором САДИ. В 1946 г. в Московском автодорожном институте он успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «К износу цилиндров автомобиля при работе на газе Саратовского месторождения», а в 1947 г. ему было присвоено учёное звание доцента. Одновременно с занятием должности директора института на Автомобильном факультете он заведовал кафедрами «Производство и ремонт автомобилей» (1947), «Организация и проектирование ремонтных предприятий» и «Экономика и организация производства». Вот как об И.И. Прокофьеве-лекторе и преподавателе отзывался выпускник САДИ 1947 г., впоследствии доцент кафедры «Автомобили и двигатели» Ю.Н. Юдин: «Лекцию он читал без конспекта, лаконичным, доходчивым языком, в спокойном, удобном для записи темпе. Мы сразу почувствовали высокий профессионализм преподавателя. И в дальнейшем И.И. Прокофьев как лектор пользовался у нас, студентов, заслуженным авторитетом. Отличительными чертами И.И. Прокофьева как препода-

вателя и воспитателя студенчества были «высокая эрудиция (и не только в своей специальности), доброжелательность, спокойствие и принципиальность. Он умел привить нам, студентам, стремление к учёбе, пробудить в нас желание самостоятельно мыслить» [4].

На долю И.И. Прокофьева в качестве директора САДИ выпало трудное время. Институт был недавно отстроен, учебная и научная работа ещё не были хорошо налажены. Именно поэтому с реструктуризации учебной деятельности он и начал. Был создан штат постоянных сотрудников САДИ, тогда как ранее для ведения профилирующих дисциплин приглашались крупные специалисты промышленных предприятий и преподаватели других вузов. Новые правила запрещали преподавателям иметь работу по совместительству. Для укрепления принципа единоначалия в идеологической работе кафедры общественных наук объединили в одну кафедру марксизма-ленинизма. В 1939 г. наконец-то было окончательно завершено строительство учебного корпуса САДИ, после чего студенты и сотрудники включились в оформление кабинетов и развёртывание лабораторий. К своему 10-летнему юбилею институт подошёл уже в качестве одного из ведущих автодорожных вузов страны, в котором обучались свыше 1500 студентов, работали 117 преподавателей и он насчитывал 26 кафедр. До Великой Отечественной войны (ВОВ) институт подготовил 1454 инженера [3], но его налаженная работа была нарушена нападением на Советский Союз фашистской Германии.

С первых дней войны от студентов и преподавателей стали поступать заявления о добровольном зачислении в ряды действующей армии. За первые месяцы ВОВ в Красную армию ушли 529 студентов, 17 преподавателей, 85 рабочих и служащих института. К началу первого военного учебного года в САДИ влились коллективы эвакуированных в Саратов Харьковского и Московского автодорожных институтов. После начала войны в

САДИ, как и на всех предприятиях города и области, создавались отряды народного ополчения и пожарные дружины. Иван Иосифович не остался в стороне от этого дела, вступив в народное ополчение Октябрьского района г. Саратова. Однако главной задачей того времени всё-таки было сориентировать науку на военные нужды. По постановлению Совнаркома СССР здание САДИ было отдано эвакуированному из Москвы Наркомату авиационной промышленности. Институт же, сохранив за собой только подвальные помещения с мастерскими и лабораториями, переехал в здание СХИ. С 25 июня 1942 г. германская авиация начала наносить бомбовые удары по Саратову. Тогда стали приниматься срочные меры по усилению обороны города, были созданы 2 механизированные бригады для ведения оборонительных работ на подступах к Саратову. На базе гаража САДИ в 1942 г. была организована авторемонтная база Юго-Западного фронта, проект которой разработал И.И. Прокофьев при участии заведующего кафедрой «Производство и ремонт автомобилей» Н.С. Решетникова [5].

1943 год стал переломным в работе института, поскольку перестройка на военный лад осталась позади. Обстановка на фронте менялась очень быстро, и вскоре Саратов уже оказался в глубоком тылу. Постепенно начала налаживаться научная, учебная и воспитательная работа. За годы войны САДИ подготовил 543 инженера, внёс достойный вклад в дело победы над врагом. В 1944 г. и сам И.И. Прокофьев, и многие другие сотрудники вуза за образцовое выполнение заданий правительства были награждены орденами и медалями [3].

В послевоенные годы в ответ на новые вызовы времени произошли изменения в структуре САДИ. В 1946 г. был создан Механико-технологический факультет (промышленность остро нуждалась в инженерах-технологах), а в следующем открылся Строительный (необходимо было восстанавливать разрушенное войной).

Начавшиеся грандиозные преобразования на Волге (строительство Волго-Донского канала, Куйбышевской и Сталинградской ГЭС) потребовали высококвалифицированных специалистов по гидротехнике. И в 1951 г. в САДИ открылся Гидротехнический факультет, просуществовавший, правда, всего 5 лет. Во 2-й половине 50-х годов расширялись производственные связи института, в результате чего, в частности, в 1955 г. по распоряжению Совета Министров и Министерства высшего образования СССР при Саратовском авиационном заводе был открыт вечерний филиал САДИ. В 1957 г. был создан общетехнический факультет САДИ в городе Балаково Саратовской области, в мае 1959 г. – приборостроительный, а в 1960 г. – энергетический факультеты [3].

Развитие энергетического направления в конце 50-х годов было крайне необходимо, поскольку расширявшаяся промышленность остро нуждалась в снабжении уникальных предприятий (к примеру, завода по выпуску химических волокон) электроэнергией и водяным паром. Учитывая потребности производства, в 1955 г. Министерство образования направило на работу в САДИ новоиспечённого доктора наук, учёного-энергетика Анатолия Ивановича Андрющенко, который спустя 3 года возглавил вновь созданную кафедру «Теплоэнергетика». К концу 50-х годов наш институт представлял собой многопрофильный технический вуз с шестью факультетами – автомобильным, дорожно-строительным, механико-технологическим, строительным, энергетическим и приборостроительным. По инициативе А.И. Андрющенко Саратовский обком КПСС и Областной исполнительный комитет при поддержке министра высшего образования СССР В.П. Елютина выступили с ходатайством перед Правительством СССР о преобразовании САДИ в политехнический институт [4].

В результате 15 июля 1960 г. САДИ объединился с Всесоюзным автодорожным заочным институтом и на этой базе был создан Саратовский политехнический

институт во главе с директором И.И. Прокофьевым. Его заместителем по научной работе стал А.И. Андрющенко. 15 марта 1960 г. он подписал адресованное первому секретарю Саратовского обкома КПСС А.И. Шибяеву обращение Совета САДИ с просьбой поддержать ходатайство института в Высшую аттестационную комиссию (ВАК) при Министерстве высшего образования СССР о присвоении Ивану Иосифовичу учёного звания профессора без защиты докторской диссертации, поскольку на тот момент он имел уже 28-летний стаж научно-педагогической работы, 7 печатных научных трудов, им было выполнено 16 научных исследований, успешно внедрённых в производство, и разработан ряд учебно-методических пособий. Ходатайство имело успех – 27 сентября 1961 г. Иван Иосифович получил аттестат профессора [4].

В апреле 1961 г. был принят Устав СПИ, вводились должности ректора и проректоров, а также учреждались 7 дневных и 4 заочных факультета. В 1962 г. с поста ректора ушёл И.И. Прокофьев, оставшись при этом заведующим кафедрой «Экономика и организация производства». По воспоминаниям знавших его людей, это был очень умный, справедливый человек и талантливый руководитель. В частности, академик МАЭН В.А. Наливкин написал об этом так: «Прокофьев умело руководил вузом, и исполнение его распоряжений было, как мы выражались, "железным" исполнением. Слова его всегда были взвешенными, аргументированными, а действия – мудрыми. В институте его так и называли – Иван Мудрый» [4].

Он сыграл огромную роль в истории вуза – сумел сохранить САДИ в годы войны и затем не просто поднять его на прежний уровень, а создать из узкопрофильного института многоотраслевой политехнический. За свои многочисленные заслуги И.И. Прокофьев был удостоен рядом правительственных наград, в том числе двумя орденами Трудового Красно-

го Знамени, двумя орденами «Знак Почёта», медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг.» и «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина». Скончался Иван Иосифович 30 сентября 1970 г. и был похоронен на Воскресенском кладбище Саратова.

Бразды правления СПИ он передал весьма достойному преемнику, которым стал доктор технических наук, профессор А.И. Андрющенко (1914-2008). Родился он 31 октября 1914 г. в местечке Жашков Таршанского уезда Киевской губернии (ныне районный центр Черкасской области в Центральной Украине), где его отец трудился на сахарном заводе. Позже семья переехала в Одессу, где уже в 13-летнем возрасте Анатолию пришлось искать работу. Пришлось потому, что школу он закончил на 2 года раньше положенного для этого срока, в свои 12 лет, а вот в «профтехшколе», являвшуюся в то время следующей ступенью образования, раньше исполнения 14 лет не брали. Приписав себе в ученическом удостоверении 3 года, он сумел устроиться «временным рабочим» на Одесский рафинадный завод имени Дмитрия Благоева. Затем трудился ещё «кормачом» (помощником слесаря) на молочной ферме Центрального рабочего кооператива Одессы [6].

По достижении необходимого возраста Анатолий Иванович пошёл учиться в «Школу-завод – ФЗУ УКРМЕТО» (фабрично-заводское училище Украинского металлического объединения) на токаря. Тяга к самым разнообразным умениям была столь сильна, что параллельно он учился на шофёрских и бухгалтерских курсах. В 1931 г. райком комсомола направил его на рабочий факультет (рабфак), по окончании которого в следующем году А.И. Андрющенко зачислили в Одесский вечерний рабочий индустриальный институт. В дневное же время он работал токарем, а затем техникум-нормировщиком на заводе имени Сталина. Там вскоре заметили его инициативность, ответственность, недюжинные ор-

ганизаторские способности, в результате чего он был избран секретарём комитета комсомола завода. В 1938 г. после окончания энергетического факультета Одесского индустриального института и получения квалификации инженера-теплотехника его распределили на теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) Горьковского автозавода (ГАЗ), где он трудился сначала дежурным инженером, а затем начальником службы контрольно-измерительных приборов и автоматики и заместителем начальника турбинного цеха [6].

Здесь, в Горьком, Анатолия Ивановича и застала война. Начиная с осени 1941 г., ГАЗ интенсивно бомбила фашистская авиация. Несмотря на «бронь», в мае 1942 г. по его личной просьбе он, младший лейтенант, был призван в действующую армию и отправился на фронт, прошёл всю войну, воевал на Донском, 3-м и 4-м Украинских фронтах, участвовал в боевых действиях, которые проводились до конца 1945 г. на Западной Украине. Был сначала командиром миномётной роты, потом начальником штаба отдельного стрелкового батальона. Среди прочего, принял участие в операции по окружению группировки германских войск в Сталинграде. Под его командованием солдаты в 40-градусные морозы зимы с 1942 на 1943 год 10 суток обороняли деревню Большая Донщинка, выбив оттуда румынские войска. В качестве командира подразделения артиллеристов-миномётчиков участвовал в освобождении города Краснодон на Донбассе. Фронтовые заслуги А.И. Андриященко отмечены орденами Отечественной войны I и II степени, а также медалями «За боевые заслуги» и «За победу над Германией». В июле 1943 г. он вступил на фронт в ВКП(б) [6].

В декабре 1945 г. Анатолий Иванович демобилизовался и как специалист народного хозяйства (был такой приказ Сталина), вернулся в Одессу и уже в первых числах января начал трудиться главным энергетиком на судостроительном и судоремонтном заводе имени А. Марти. Здесь он провёл большую работу по освоению

оборудования Центральной электростанции, внедрил ряд усовершенствований, реорганизовал компрессорное и электроосветовое хозяйство, достиг большой экономии топлива и электроэнергии, проявил себя как опытный, деловой, культурный и инициативный руководитель энергетического хозяйства завода. В марте 1947 г. в том же качестве главного энергетика А.И. Андриященко перешёл на другое предприятие – завод имени Красной Гвардии, выпускавший различные металлические изделия, в том числе оборудование для шахт Донбасса [6].

Однако основным родом деятельности Анатолия Ивановича в послевоенное время стала всё же научная работа. В сентябре 1947 г. по приглашению профессора Д.П. Гохштейна он перешёл работать на кафедру теплогазоснабжения Одесского инженерно-строительного института. 30 декабря следующего года в Одесском институте инженеров морского флота А.И. Андриященко успешно защитил кандидатскую диссертацию по применению термодинамических функций для расчёта максимально возможной работы пара в энергетических установках (научный руководитель – Д.П. Гохштейн). Работая в Одесском гидротехническом институте, он являлся заведующим кафедрой машиноведения и деталей машин. Оттуда и был 18 марта 1953 г. направлен в двухгодичную докторантуру при Московском ордена Ленина энергетическом институте имени В.М. Молотова, успешно окончив которую 18 марта 1955 г., защитил там же докторскую диссертацию на тему «Термодинамическое исследование процессов в паротурбинных установках» (научный консультанты – учёный-академик с мировым именем, руководитель Отделения технических наук АН СССР М.В. Кирпичёв, после его смерти – крупнейший специалист в области экономики энергетики, профессор Ленинградского инженерно-экономического института Л.А. Мелентьев). В мае 1955 г. ВАК присвоила А.И. Андриященко учёную степень доктора технических наук, а 10 сентября

того же года утвердила его в учёном звании профессора [6].

Что же нового было сделано Анатолием Ивановичем для развития теплоэнергетики? Он стоял у истоков очень важного направления в технической термодинамике, которое в конце 50-х годов получило название «эксергетического метода». Фактически им была уточнена трактовка второго закона термодинамики, что позволило получить новые математические зависимости между параметрами состояния рабочих тел и максимально возможной их работой, называемой технической работоспособностью (последняя и была названа в конце 50-х «эксергией»). Она представляет ту часть полной энергии тела, которая в термодинамической системе может совершить работу. Было доказано, что теплота, подводимая к рабочему телу от горячего источника, никогда не может превратиться в электрическую, механическую или другие виды энергии направленных движений. Необходимо часть этой теплоты отвести в окружающую среду. В результате были получены формулы, которые позволяют установить, сколько в каждом конкретном случае необходимо отводить этой теплоты и сколько можно получить полезной работы. Эксергетический метод печатается теперь в основных учебниках по технической термодинамике для вузов. Он получил распространение во всех ведущих странах мира [6].

23 марта 1955 г. по ходатайству дирекции САДИ в связи с необходимостью укрепления его научно-педагогических кадров приказом по Министерству высшего образования СССР А.И. Андриященко был переведён из Одесского гидротехнического института на постоянную педагогическую работу в САДИ. Здесь он занял пост заместителя директора по научной работе и начал работу с привлечения новых кадров. Имея особое чутьё на людей, Анатолий Иванович умел находить на производстве нужных ему специалистов и приглашал их на работу. Такая политика помогала, помимо приобретения вузом новых, высококвалифицированных

сотрудников ещё и обеспечить его тесную связь с производственными потребностями. В результате этой политики А.И. Андриященко, проводившейся им и в дальнейшем, в бытность ректором СПИ, к преподавательской деятельности были привлечены такие крупные специалисты-производственники, как Ю.С. Архангельский, В.Б. Байбурин, П.И. Никитин, С.В. Петров, А.Н. Устинов и др. За 7 лет работы в должности заместителя директора Анатолий Иванович инициировал многие преобразования, вызвавшие значительный рост научного потенциала вуза. По признанию коллег, это – талантливый кадровик-администратор, жёсткий, но справедливый руководитель-реформатор, пользовавшийся непререкаемым авторитетом не только среди сотрудников института, но и в масштабах всей области. Находясь на посту ректора, он занимал также высокие должности в целом ряде общественных организаций, но, несмотря на занятость, не оставлял занятий наукой [6].

В частности, в течение нескольких десятилетий он являлся бессменным руководителем созданной им в 1967 г. благодаря помощи В.А. Кирилина (в разное время являлся заместителем министра высшего образования СССР, заведующим Отделом науки ЦК КПСС, заместителем председателя Совета министров СССР, председателем Государственного научно-технического комитета СССР) Проблемной лаборатории теплоэнергетических установок электростанций, которую Анатолий Иванович считал делом всей своей жизни. Эта лаборатория стала своеобразной штаб-квартирой саратовской научной энергетической школы, которая к тому времени, в том числе благодаря трудам А.И. Андриященко, была хорошо известна не только в Советском Союзе, но и за рубежом. Силами её сотрудников были решены многие сложнейшие вопросы, связанные со становлением и развитием отечественной энергетики [6].

После назначения на должность ректора Анатолий Иванович сразу взялся за ак-

тивизацию всех сторон деятельности СПИ. Был разработан 8-летний перспективный план его развития, предусматривавший, помимо совершенствования учебной и научной деятельности вуза, также укрепление его материальной базы, улучшение культурных и бытовых условий студентов и профессорско-преподавательского состава. Все студенты были распределены по специальностям и специализациям, прикреплены к соответствующим профилирующим кафедрам. Сделано это было, указывал А.И. Андрющенко, с целью «слить воедино обучение с воспитанием, добиться такого положения, чтобы каждый преподаватель проводил индивидуальную работу со студентами, чтобы преподаватели и студенты одной специальности представляли единый трудовой коллектив, решающий общие задачи» [5].

Продолжала меняться структура института. К примеру, при Электроагрегатном заводе в Ленинском районе г. Саратова был открыт Общетеchnический факультет СПИ, а в 1962 г. для обеспечения развивавшейся электронной промышленности инженерными кадрами на базе приборостроительного был создан ещё один факультет – электронной техники. Автомобильный и механический факультеты были объединены в один автомеханический, а в 1969 г. в СПИ начал функционировать факультет общественных профессий с отделениями социологии, журналистики, массовой работы с молодёжью, спортивным и художественным. В том же году после введения в действие нового учебного корпуса факультеты приборостроительный и электронной техники объединили, в результате чего родился один из наиболее престижных факультетов нашего вуза – ФЭТиП (ныне является частью Института электронной техники и машиностроения) [3].

Весьма знаковым стало основание в 1978 г. по инициативе А.И. Андрющенко факультета общественных наук (ФОН), объединившего разрозненные до того кафедры истории КПСС, философии, поли-

тической экономии и научного коммунизма. Позже в эту структуру вошли также кафедры иностранных языков и физкультуры, лаборатория социологических исследований, факультет общественных профессий. Создание ФОН установило более тесную связь между представителями кафедр общественных наук и техническими кафедрами вуза. Создание подобного подразделения в рамках технического вуза было по тем временам делом невиданным и рождало много вопросов типа «Зачем и кому это надо?». Прозорливый же и дальновидный Анатолий Иванович всячески подчёркивал важность создания этой структуры [6]. И будущая всеобщая гуманитаризация высшего образования полностью подтвердила его правоту. Организация ФОН стала важным и неотъемлемым «кирпичиком» в «здании» нынешнего технического университета.

А.И. Андрющенко возглавлял Поволжский научно-методический совет, созданный на базе СПИ Минвузом СССР. В этот Совет вошли также ведущие учёные вузов Казани, Уфы, Куйбышева, Пензы, Ульяновска, Тольятти, Волгограда, Элисты и Астрахани. В марте 1983 г. он был реорганизован в Региональный координационный научно-исследовательский совет Академии наук СССР и Минвуза РСФСР, а Анатолий Иванович занял должность заместителя его председателя. Согласно постановлению ЦК КПСС и Совета министров СССР, для обмена опытом и улучшения координации учебного, научного и воспитательного процессов региональных вузов, по всей стране начали создаваться советы ректоров вузов. Председателем такого совета в Поволжском регионе был единогласно избран А.И. Андрющенко, что ярко свидетельствовало о значительном авторитете и СПИ, и его ректора. Об этом же говорит и тот факт, что именно Анатолий Иванович помог профессору А.А. Милашечкину (ранее он принимал участие в строительстве открытого весной 1935 г. железнодорожного моста имени И.В. Сталина через Волгу в Саратове) убедить первого секре-

таря Саратовского обкома КПСС Г.А. Денисова в экономической целесообразности строительства автомобильного моста через Волгу (до его постройки между Саратовом и Энгельсом имелась только паромная переправа, то есть города были фактически отрезаны друг от друга) [6].

В 70-х годах одной из основных задач администрации СПИ являлась забота об организации труда, быта и отдыха студентов и сотрудников вуза. Именно в период его руководства Анатолием Ивановичем был открыт до сих пор успешно функционирующий институтский санаторий-профилакторий, созданы лыжная база в Смирновском ущелье и спортивно-оздоровительный лагерь отдыха «Политехник» с деревянными домиками на 230 мест на Волге.

С его именем связано превращение нашего вуза из узкопрофильного института в крупнейший учебный и научный центр Поволжья. Анатолий Иванович являлся ведущим специалистом в области технической термодинамики и оптимизации теплоэнергетических установок и систем, проводил фундаментальные научные исследования в области парогазовых энергоустановок и систем теплофикации. Результаты его научной деятельности нашли отражение в 285 научных публикациях. Он являлся автором (и соавтором) 16 монографий и учебников (например, вузовских учебников «Основы технической термодинамики реальных процессов» и «Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок»), им создана солидная научная школа системного анализа, известная за рубежами нашей страны и называемая его учениками «школой Андриющенко». У одного из учеников Анатолия Ивановича, бывшего студента СПИ, затем его проректора по хозяйственной части, а в 1998-2007 и 2010-2014 гг. возглавлявшего Главное управление Центробанка РФ по Саратовской области Ю.Б. Зеленского были все основания написать: «Это Учитель с большой буквы и всеобщий образец для подража-

ния. Во всём исключительно». Также Юрия Борисовичу принадлежат слова: «Не было, нет и не будет никогда людей, которые бы сделали вузу столько, сколько сделал Анатолий Иванович» [6].

Ему принадлежат 6 изобретений (например, в марте 1957 г. Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете министров СССР была зарегистрирована проведенная под руководством А.И. Андриющенко работа под наименованием «Термодинамический расчёт оптимальных давлений газового промежуточного перегрева в паросиловых установках»), под его руководством было подготовлено более десятка докторов и более сотни кандидатов наук. В апреле 1978 г. постановлением ЦК КПСС и Совета министров СССР СПИ был отнесён к числу ведущих вузов страны. 9 октября 1980 г. Президиум Верховного Совета СССР наградил институт Орденом Трудового Красного Знамени за заслуги в подготовке квалифицированных специалистов для развития народного хозяйства и науки, а А.И. Андриющенко был удостоен ордена Октябрьской революции [6].

В течение многих лет он был членом ВАК (с апреля 1975 г.), Президиума секции теплоэнергетики Научно-технического совета Министерства высшего и среднего специального образования СССР (с сентября 1965 г.), Научного совета АН СССР по теплофизике и теплоэнергетике, редакций журналов «Известия вузов. Энергетика» и «Известия вузов. Проблемы энергетики», председателем Поволжского научного совета РАН по энергетике, членом диссертационного совета. 15 сентября 1961 г. Указом Президиума Верховного совета СССР А.И. Андриющенко наградили Орденом Ленина. В 1965 г. ему было присвоено почётное звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», с февраля 1994 г. он являлся действительным членом Международной академии наук высшей школы (МАН ВШ), членом Международной энергетической академии МАН ВШ (1997). В 2001 г. был награждён

нагрудным знаком «Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации». Анатолий Иванович неоднократно, начиная с марта 1957 г., избирался народным депутатом г. Саратова и области. Когда городом-побратимом Саратова стал английский Бристоль, в марте 1960 г. А.И. Андриющенко побывал в нём в составе городской делегации, а 19 февраля 1963 г. был утверждён председателем Комитета дружбы с городом Бристолем при Исполкоме Саратовского городского совета депутатов трудящихся. Долгое время являлся председателем Областного комитета защиты мира [6].

Его работа была высоко оценена руководством страны и области. К боевым наградам, полученным в годы войны, прибавились награды за мирный труд – 2 Ордена Трудового Красного Знамени и Почётный знак губернатора Саратовской области. 30 августа 1996 г. ему было присвоено звание «Почётный гражданин города Саратова». В 2005 г. А.И. Андриющенко наградили также юбилейным орденом Серебряная звезда «Общественное признание». 26 лет его ректорства многие до сих пор считают «золотым веком» в истории нашего вуза. «Мне кажется, Анатолий Иванович сыграл кардинальную роль в становлении нашего вуза, – утверждает заслуженный деятель науки Российской Федерации профессор СГТУ имени Гагарина Ю.А. В.Б. Байбурин. – Сказался дар его предвидения: он видел, что в принципе институт может развиваться дальше и что необходимо вводить как новые направления работы,

так и новые направления образовательных программ. В результате тот институт, который раньше назывался автодорожным, стал политехническим. А когда уже в 90-е годы начали создаваться университеты – на базе политехнического института был создан технический университет. Причём это была не просто какая-то смена вывески: в рамках политехнического института была подготовлена для этого соответствующая материально-техническая, учебно-методическая база. Я это говорю к тому, что благодаря деятельности Анатолия Ивановича и были заложены основы создания настоящего технического университета...» [6].

Жизнь А.И. Андриющенко – ярчайший пример беззаветного служения своей Родине, стране, государству, но, прежде всего, – людям. За этих людей он воевал, для них восстанавливал затем заводы и развивал науку. Мэтр в термодинамике, создатель самостоятельной научной школы, смелый реформатор и прекрасный менеджер, талантливый педагог и крупный общественный деятель – всё это он. Можно утверждать с уверенностью, что мы, нынешние сотрудники СГТУ имени Гагарина Ю.А., вправе гордиться тем, что в течение 26 лет наш вуз возглавлял такой выдающийся человек, о масштабе способностей которого, пожалуй, лучше всего сказал хорошо знавший его член-корреспондент РАН А.Ф. Резчиков: «Анатолий Иванович – это личность, которая могла бы быть руководителем любого масштаба, вплоть до Президента страны. И всё бы было хорошо...» [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный архив Саратовской области (ГАСО). Ф. 3190. Оп. 1. Д. 1, 3, 23, 88, 89.
2. Гусакова З. Правильный свет для Саратова / З. Гусакова // Газета недели в Саратове. № 42 (175). 29.11.2011. С. 3.
3. САДИ-СПИ-СГТУ: страницы истории: в 3 т. / В.Н. Басков, С.М. Федюнина,

А.А. Коваль и др. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. Т. 1. 460 с.

4. Прокофьев И.И. Директор «Иван Мудрый» / В.А. Наливкин, А.С. Папшев, Н.Я. Калинин и др. // Жизнь замечательных людей СГТУ. Вып. 2. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. 164 с.

5. Саратовский государственный технический университет (1930-2000): исторический очерк / Г.В. Лобачёва, В.М. Рас-судов, Н.Ю. Вострикова и др. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 224 с.

6. Анатолий Иванович Андрущенко. «Жить для людей» / С.М. Федюнина, Н.А. Шабанова, С.А. Станиславская и др. // Сер. Жизнь замечательных людей СГТУ. Вып. 1. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. 192 с.

Костяев Эдуард Валентинович – доктор исторических наук, профессор кафедры «История Отечества и культуры» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Edward V. Kostyaev – Dr. Sc., Professor, Department of Russian History and Culture, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Продолжение следует

К ВОПРОСУ О «ТЕПЛОВОЙ СМЕРТИ ВСЕЛЕННОЙ»

Ю.С. Архангельский

Окончание

Гипотеза Козырева Н.А. Хотя К. Циолковский не противопоставлял живую природу неживой, в его гипотезе роли живой природы удивляется серьезное внимание. Тем самым можно говорить об определенной уязвимости его гипотезы: ведь мы сейчас не можем даже указать вероятность наличия в космосе высокоорганизованных существ, и нет никаких оснований считать непрямым условием в развитии планеты возникновения на ней живых существ.

Очевидно, естествознание в первую очередь должно отыскать в неживой природе механизм антиэнтропийных процессов. Первое в истории науки исследование в этом направлении принадлежит астрофизику профессору Н.А. Козыреву [1], работы которого о лучевом равновесии во внешних слоях звезд, наблюдение спектра атмосферы Венеры, открытие вулканической деятельности на Луне получили мировую известность.

Н.А. Козырев считает, что

«Во Вселенной нет никаких признаков деградации, которая вытекает из второго начала... Желая быть... последовательными при объяснении звездного Мира, мы должны признать, что в природе существуют действующие причины, препятствующие возрастанию энтропии» [1].

И Н.А. Козырев ищет эти причины. Открытие атомной энергии привело к тому, что очень многое во Вселенной стали объяснять термоядерными реакциями. Своеобразным горючим в таких реакциях, как известно, является водород. Но без пополнения Вселенной водородом такие реакции должны были бы прекратиться.

Но дело в том, что механизм такого пополнения водорода в масштабах Вселенной никто пока что не открыл, а еще в 30-е годы при изучении лучевого равновесия во внешних слоях звезд-гигантов Н.А. Козырев не обнаружил температуры, соответствующей термоядерным реакциям. И Н.А. Козырев приходит к выводу:

«В настоящее время в астрофизике редко удается дать безусловно правильное решение проблемы не только частной, но и общей, с простыми закономерностями. Из этого следует сделать вывод о существовании в Море некоторого глубокого принципа, не открытого еще современным естествознанием».

Суть этого принципа Н.А. Козырев видит в том свойстве Мира, которое называют причинностью. Его не интересуют тонкости причинности в теории относительности или в квантовой теории. Раз основой второго начала термодинамики является хаотичное движение и взаимодействие частиц материи, то и корни антиэнтропийного закона Н.А. Козырев ищет в простейших актах взаимодействия частиц, в основных законах механики.

Он пытается в постановке элементарной механики найти нечто, что пропускать до сих пор, и видит это в различии причины и следствия. Если в механике говорят «действие и противодействие», то тут же оговариваются, что между этими понятиями разницы нет. Именно поэтому точные науки, отвечая на вопрос «как?», а не «почему?», становятся описательными науками.

«... когда постулируется принципиальная невозможность отличить причину от следствия, тогда ... законы превращаются в описывающие явления формулы... Истинная механика должна быть причинной, то есть содержать в себе принцип, позволяющий отличить причину от следствия» [1].

Отличительной особенностью причины и следствия Н. А. Козырев считает разделение их в пространстве и времени. Ведь по третьему закону Ньютона, выражающему причинность явлений в обычной механике, только тело может быть причиной какого-либо механического следствия, но два тела не могут одновременно занимать одно и то же место пространства. К тому же причина и следствие всегда разделяются временем. Если причина и следствие разнесены в пространстве на dx , а во времени на dt , то эти две величины можно связать соотношением

$$dt = \frac{1}{C_2} dx.$$

Здесь C_2 имеет размерность скорости и является как бы скоростью превращения причины в следствие. По Н.А. Козыреву, C_2 – «ход времени». Время обладает направленностью, то есть идет от прошедшего к будущему, от причины к следствию. Н.А. Козырев считает C_2 «мировой постоянной», связанной с двумя другими постоянными – зарядом электрона и постоянной Планка – соотношением

$$C_2 = \alpha \frac{e^2}{h} = \alpha \cdot 350 \frac{\text{км}}{\text{с}},$$

где α – коэффициент пропорциональности, причём по Козыреву $\alpha \cong 2$, то есть $C_2 < C_1$, в полном соответствии с принципом Эйнштейна (C_1 – скорость света).

Эта формула позволяет осуществить предельный переход от механики Козырева к Нютоновой: $h \rightarrow 0$, $C_2 \rightarrow \infty$, $dt \rightarrow 0$.

В механике Козырева однонаправленный ход времени утверждает принципиальное отличие правого от левого, чего не делает обычная механика, тогда как Ньютонова механика приписывает миру полную симметрию.

Но природа знает много примеров отличия правого от левого: сердце высокоорганизованных существ слева, левая рука отличается от правой и т.д. И Н.А. Козырев приходит к убеждению о принципиальной несимметрии мира, вызванной несимметрией пространства.

Он предлагает опыт с вращением тела, чтобы продемонстрировать особенности причинной механики.

Разные точки волчка имеют разные скорости и Н.А. Козырев считает, что скорости C_2 и C_1 складываются между собой и, следовательно, во вращающемся теле ход времени будет иной. Разница хода времени на отдельных элементарных поясах волчка, параллельных его экватору, приведет к разнице количества движения параллельных отрезков на вращающемся теле, что вызовет появление дополнительных сил, действующих по оси вращения и изменяющих полную энергию тела. Появляется, следовательно, энергетический эффект – волчок получает дополнительную энергию, пропорциональную

массе и скорости вращения волчка. Ничтожный в макроскопических масштабах, этот эффект становится колоссальным во Вселенной. Ведь планеты, звезды, галактики – грандиозные космические волчки по массе и скорости вращения. Тогда звезды должны получать каждую секунду количество тепловой энергии дополнительно к вырабатываемой термоядерной реакцией в звезде. Итог – нарастание перепадов температур.

Итак, Н.А. Козырев предвещает новую форму энергии, связанной с направленно-стью времени, с асимметрией мира.

Наиболее удивительной является связь нового источника энергии с потоком времени – ходом времени в терминах Козырева. Этот вывод столь же неожидан, как и открытие Эйнштейном связи энергии и массы.

Кроме предсказания естественного нарастания перепада температур в космосе, эта гипотеза связана с асимметрией мира, левого и правого, играющих столь важную роль в процессах жизни, так что можно прийти к выводу, что связь между временем и энергией – одна из сторон более общего закона природы, возможно того самого третьего начала, о котором еще в 1902 г. говорил Умов.

Интересное подтверждение своей теории нашел Н.А. Козырев, проведя обмер фотографий Юпитера и Сатурна. «Козыревские» силы сплющивают вращающиеся планеты у Северного полюса и вытягивают у Южного. Для Земли это составляет примерно 100 м. Но вот в полном соответствии с механикой Н.А. Козырева планеты с большой массой – Юпитер и Сатурн – оказались заметно деформированными. Вытянутость материков на Земле с Севера на Юг, преобладание суши в Северном полушарии и многое другое – всё согласуется с прогнозом Н.А. Козырева.

В. Львов отмечает большой интерес к книге Н.А. Козырева среди ученых Запада [2]. И тем более удивительна резкая критика гипотезы Н.А. Козырева в отечественной печати на страницах газеты «Правда» академиками Л. Арцимовичем, Л. Капицей,

И. Таммом в статье «О легкомысленной погоне за научными сенсациями» [3].

В книге Н.А. Козырева авторы статьи видят много недостатков: во-первых, отсутствие аргументированного доказательства недостаточности ссылки на термоядерные реакции в звездах как источник энергии, во-вторых, отсутствие логической последовательности в изложении материала в книге, в-третьих, отсутствие оценок погрешности исследований следствий теории. Критики много, тем более для малой статьи.

Хотя бы уничтожающее:

«... нам остаётся непонятным реальный смысл его утверждения, что ход времени может порождать энергию...».

Эта фраза так напоминает возражение по поводу формулы Эйнштейна: «Как масса может переходить в энергию?».

Статья академиков, на наш взгляд, вызывает целый ряд возражений. Действительно, в книге Н.А. Козырева нет ни слова о термоядерных реакциях как источнике энергии звезд. Но Н.А. Козырев – специалист с мировым именем как раз в вопросе об энергии звезд. Ему присуждена премия Президиума АН СССР за теоретический анализ источников звездной энергии. Такой учёный вправе рассчитывать на знакомство оппонентов с его прежними работами по этому вопросу. Что касается упрека в отсутствии оценок погрешностей лабораторных исследований волчков, то ведь сам Н.А. Козырев признаёт, что следует проводить астрономические исследования фигур быстро вращающихся планет.

Многие замечания, которые действительно можно сделать по поводу книги Н.А. Козырева (не стоит говорить о превращении времени в энергию, а энергии во время хотя бы потому, что эти физические величины имеют разную размерность), являются быстрее всего замечаниями к форме, а не к содержанию. Что же касается критики книги Н.А. Козырева по существу невозможности связи времени с энергией, то о таких критиках хорошо сказано у В. Львова:

«Курьезно выглядят... сетования некоторых критиков, беспокоящихся («как бы

чего не вышло!») по поводу того, что время в теории Н.А. Козырева «выступает как активный физический агент, воздействующий на материальные тела и процессы»... К сведению критиков сообщим, что не только время и не только пространство, но и в этих случаях даже идеи, возникшие в уме человека, становятся силой, «вызывающей изменения в материальном мире»!... Не нравится она (книга. – *Авт*). и всем тем, кто ставит ставку на «тепловую смерть» и на «сотворение мира» богом. Наглядная иллюстрация к проблеме взаимодействия между философскими и конкретно-научными вопросами в современном обществознании» [2].

Увы, речь идёт о статье в газете «Правда». На дворе был ноябрь 1959 г.

Рассмотрение проблемы прогресса в эволюции Вселенной позволяет сделать

вывод, что результаты её решения должны привести к открытиям в естествознании одного масштаба или даже более грандиозным, чем открытие атомной энергии и создание теории относительности.

Открытие тайны живой клетки, процесса концентрации рассеянной энергии, тайны времени даёт человечеству огромные перспективы технического прогресса.

Уже знания современной науки убедительно говорят против теории «тепловой смерти» Вселенной. Юность Вселенной вечна, но мы не можем до сих пор считать загадку Клаузиуса решённой до конца, пока не будет так же четко, как второе начало термодинамики, сформулировано и экспериментально доказано третье начало, предложенное Н.А. Умовым. Штурм тайн времени и биоэнергетики позволит надеяться на успешное решение этой проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козырев Н.А.** Причинная или несимметричная механика в линейном приближении / Н.А. Козырев. Пулково, 1958.

2. **Львов В.** Теория Козырева – Научный спор / В. Львов // Нева. 1960. № 1.

3. **Арцимович Л.О.** О легкомысленной погоне за научными сенсациями / Л. Арцимович, Л. Капица, И. Тамм // Правда. 22 ноября 1959 г.

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

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

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 (927) 623-03-25 – Тригорлый Сергей Викторович (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 естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка 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 29.03.2018

Формат 60×84 1/8

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 16,0

Уч. изд. л. 7,7

Тираж 500 экз.

Заказ 24

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 2018 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 Politekhnicheskaya Str., 410054, Saratov, Russia

Tel.: (8452) 99-87-63

E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 29.03.2018

Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 16,0 Publication base sheet 7,7

Circulation: 500 printed copies Order 24 Subscription and individual copies: open rates

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

Online at www.eLIBRARY.RU

The certificate of media source registration: PI No. *FS77-54621 dated 1 July 2013*