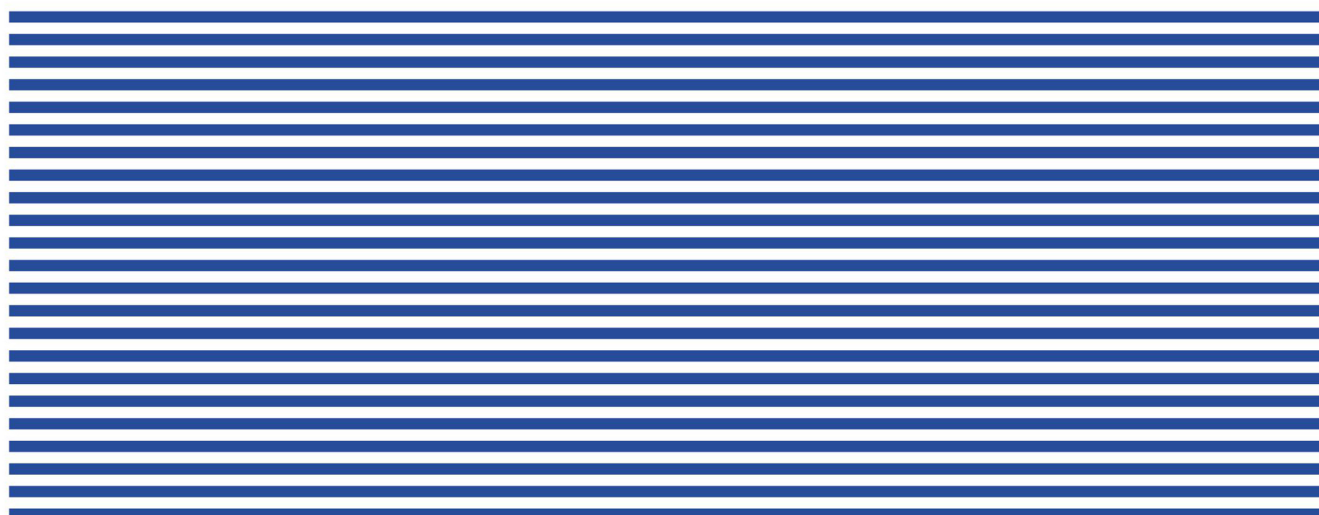




ISSN 2309-6020

# ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ



**2025**

**№ 4 (49)**



В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям перечня ВАК:

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

Издается с ноября 2013 года  
Выходит один раз в квартал

**№ 4 (49)**  
**Декабрь 2025**

# **ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

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

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

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

## **Редакционная коллегия**

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

Since November 2013  
Published Quarterly

**№ 4 (49)**  
**December 2025**

# **JOURNAL OF ELECTROTECHNICS**

## **Scientific and Technical Publication**

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

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

### **Editor-in-Chief**

**ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH**

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

### **Assistant**

#### **to the Editor-in-Chief**

**BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH**

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

### **Chief Executive Officer**

**MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA**

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

## **Editorial Board Members**

**A.A. BAZAROV**

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

**V.V. VAKHNINA**

Dr. Sci., Professor, Togliatti State University, Togliatti

**V.G. GOLDSTEIN**

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

**Yu.V. GULYAEV**

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

**V.B. DEMIDOVICH**

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

**Yu.B. KAZAKOV**

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

**A.N. MAKAROV**

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

**G.A. MOROZOV**

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

**Yu.P. PERELIGIN**

Dr. Sci., Professor, Penza State University, Penza

**A.F. REZCHIKOV**

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

**I.V. RODIONOV**

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

**F.N. SARAPULOV**

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

**Yu.B. TOMASHEVSKY**

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

**A.A. FOMIN**

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

**V.N. KHMELEV**

Dr. Sci., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

**V.A. TSAREV**

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



## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

**Китаев Н.И., Войко А.В.**

Компьютерная модель кинетики  
нагрева поршневого пальца в системе  
индуктор-деталь при упрочнении  
методом диффузионного насыщения  
поверхности в процессе высокочастот-  
ного воздействия ..... 5

**Фомина М.А., Кошуро В.А.,**

**Фомин А.А.** Моделирование  
нагрева токами высокой частоты  
титановых дисков и стержней  
с танталовыми покрытиями в воздуш-  
ной атмосфере ..... 15

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Лавров А.Ю., Паршина А.В.,  
Борминский С.А.**

Расчёт индуктивности кластера  
вихретоковых преобразователей  
для электромагнитного экспресс-  
контроля состояния объектов железно-  
дорожной инфраструктуры ..... 29

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**Рязанов Г.М., Билалова А.И.,  
Мурзаков Д.Г.**

Сравнительный анализ схем комбинированного  
и двухканального управления  
АДФР в режиме удержания ..... 38

**Коняев А.Ю., Мошкин В.И.,  
Шестаков Д.Н.** Стендовые испытания  
линейных электромагнитных  
двигателей ..... 45

**Егоров А.Н., Юрин В.Е.** Сравни-  
тельный анализ технико-  
экономической эффективности  
производства пиковой электроэнергии  
на АЭС с использованием электро-  
лизного водорода на базе замкнутого  
водородного цикла ..... 55

**Стоянова А.В., Попов Н.С.,**

**Домахин Е.А., Попов М.С.**  
Разработка интегрированной системы  
управления ректификационной  
колонной на базе SCADA-ПЛК  
комплекса и имитационной модели  
в Simintech ..... 61

**Костюков В.Д., Крылов Г.А.,**

**Стариков А.В.** Дискретная  
математическая модель цифровой  
системы управления электромагнит-  
ным подшипником с отдельным ре-  
гулированием напряжений противо-  
положных магнитов ..... 71

**Артюхов И.И., Земцов А.И.**

Модернизация электротехнического  
комплекса вентиляторной градирни ..... 79

**Шкода И.О., Кузнецов П.А.,**

**Томашевский Ю.Б., Ладин А.В.,  
Максимов С.П.** Выбор основных  
контролируемых параметров для обна-  
ружения и распознавания дефектов  
силового трансформатора 10 (6) кВ ..... 87

К сведению авторов ..... 95

## CONTENTS

### ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS

**Kitaev N.I., Voyko A.V.** Computer model to the heating kinetics of a piston pin in an inductor-part system during surface hardening via high frequency exposure using a diffusion saturation method..... 5

**Fomina M.A., Koshuro V.A., Fomin A.A.** Numerical simulation of high-frequency current heating of titanium disks and rods with tantalum coatings in air ..... 15

### THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

**Rjazapov G.M., Bilalova A.I., Murzakov D.G.** Comparative analysis of combined and dual-channel control schemes for a WRIM in the holding mode..... 29

### ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

**Lavrov A.Yu., Parshina A.V., Borminskii S.A.** Cluster for electromagnetic express monitoring of railway infrastructure facilities..... 38

**Konyaev A.Yu., Moshkin V.I., Shestakov D.N.** Bench testing of linear electromagnetic motors ..... 45

**Egorov A.N., Yurin V.E.** Comparative analysis of technical and economic efficiency of peak electricity production at nuclear power plants using electrolytic hydrogen based on a closed hydrogen cycle..... 55

**Stoyanova A.V., Popov N.S., Domakhin E.A., Popov M.S.** Development of an integrated SCADA-PLC control system for a distillation column with a simulation model in simintech ..... 61

**Kostyukov V.D., Krylov G.A., Starikov A.V.** Discrete mathematical model of a digital control system for an electromagnetic bearing with separate voltage control of opposite magnets ..... 71

**Artyukhov I.I., Zemtsov A.I.** Modernization of the electrical equipment complex in fan cooling towers..... 79

**Shkoda I.O., Kuznetsov P.A., Tomashevskiy Yu.B., Ladin A.V., Maksimov S.P.** Selection of key control parameters for detection and recognition of defects in the 10 (6) kV power transformer..... 87

Information for Authors ..... 95

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.793.6

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ НАГРЕВА ПОРШНЕВОГО ПАЛЬЦА В СИСТЕМЕ ИНДУКТОР–ДЕТАЛЬ ПРИ УПРОЧНЕНИИ МЕТОДОМ ДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Н.И. Китаев, А.В. Войко

### COMPUTER MODEL TO THE HEATING KINETICS OF A PISTON PIN IN AN INDUCTOR–PART SYSTEM DURING SURFACE HARDENING VIA HIGH FREQUENCY EXPOSURE USING A DIFFUSION SATURATION METHOD

N.I. Kitaev, A.V. Voyko

Представлена компьютерная модель расчета электротехнологического режима упрочняющей обработки поршневого пальца из сталей 12ХН3А и 40Х в системе индуктор – деталь для придания ему высоких значений физических и механических свойств; результаты лабораторных исследований и технологические рекомендации для получения малогабаритных металлических изделий с высокой микротвердостью до 962 HV<sub>0,5Н</sub> и износостойкостью КИ 10/1–10/2 за счет создания в поверхностном слое карбидной структуры из тугоплавких соединений:  $\alpha$ -Fe, Cr, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Производственные испытания металлических изделий, упрочненных из хромосодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия, с использованием компьютерной модели расчета электротехнологического режима показали увеличенную в 7-10 раз стойкость к износу. Применение результатов исследования позволяет сократить затраты на потребляемую электрическую мощность в 3-5 раз в сравнении с традиционными методами поверхностного упрочнения. Аппроксима-

A computer model designed to calculate the electrotechnological mode for hardening treatment of a piston pin made of 12KhN3A and 40Kh steels in an inductor-part system used to provide high values of physical and mechanical properties is presented, including the results of laboratory research and technological recommendations for obtaining small-sized metal products with high microhardness up to 962 HV<sub>0.5H</sub> and wear resistance of WR 10/1-10/2 by creating a carbide structure from refractory compounds in the surface layer, such as  $\alpha$ -Fe, Cr, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, and (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Production tests for metal items strengthened by the chromium-containing coating via high-frequency exposure, using a computer model for calculating the electrotechnological regime, showed a 7-10-fold increase in wear resistance.

Application of the research results allows for a 3-5-fold reduction of costs for electrical power consumption compared to traditional surface hardening methods. Approximation of the experimental temperature data versus the inductor current and high-frequency exposure duration; and microhardness versus diffusion

ция экспериментальных данных температуры от силы тока в индукторе и длительности ВЧ-воздействия и микротвердости от толщины диффузионного слоя и длительности ВЧ-воздействия установила весьма высокую степень тесноты, оцениваемую по шкале Чеддока (множественный коэффициент детерминации  $R$  составил 0,9247 и 0,7565 соответственно).

Ключевые слова: металл, компьютерная модель, диффузионное насыщение, высокочастотное (ВЧ) воздействие, обмазка, карбиды

### Введение

В настоящее время в различных областях промышленности, сельском хозяйстве, медицине, технике, быту значительно расширилась область применения электротехнологических процессов [1-4] и способов обработки, направленных на создание экономических и экологических технологий, повышение физико-механических характеристик поверхности [5], устранение отпускной хрупкости [6], а также сокращение затрат на потребляемую электрическую мощность и уменьшение себестоимости выпуска.

В этом направлении активно изучаются и внедряются в производство электротермические способы нагрева металлических изделий [7], направленные на получение функциональных поверхностных слоев [8] с высокими значениями микротвердости и износостойкости, которые в сравнении с традиционными не требуют высоких ресурсных затрат, обладают низкой энергоемкостью процесса и обеспечивают ускорение диффузионных процессов за счет высокой скорости нагрева [9, 10].

Разработка новых технологических процессов, направленных на получение поверхностных слоев с высокими физическими и механическими свойствами, за счет создания карбидной структуры, состоящей из тугоплавких соединений, значительно увеличивающих микротвердость и износостойкость многих металлических изделий, работающих в условиях интенсивного износа, и агрегатов в целом является прогрессивным направлением исследования, пред-

layer thickness and high-frequency exposure duration, established a high degree of tightness, as assessed by the Chaddock scale (the multiple coefficient of determination  $R^2$  was 0.9247 and 0.7565, respectively).

Keywords: metal, computer model, diffusion saturation, high-frequency (HF) exposure, coating, carbides

ставляющим большой научный и практический интерес.

В большинстве случаев это достигается за счет правильного выбора электротехнологического режима упрочняющей обработки.

Внедрение в процесс получения поверхностных слоев численного моделирования методом конечных элементов необходимо для решения различных задач, в том числе для расчета и определения электротехнологического режима упрочняющей обработки металлических изделий при диффузионном насыщении поверхности.

**Цель работы:** получение на сталях 12ХН3А и 40Х и поршневом пальце поверхностного слоя с высокой микротвердостью и износостойкостью за счет создания карбидной структуры, состоящей из тугоплавких соединений.

### Методы и методика проведения исследования

Для расчета и теоретического определения электротехнологического режима упрочняющей обработки в САПР «Компас-3D» создана геометрическая модель диффузионной ячейки, которая представлена в виде системы индуктор – деталь (рис. 1).

Элементы системы индуктор – деталь: 1 – верхняя крышка контейнера; 2 – крепеж для фиксации детали внутри контейнера; 3 – тепло- и электропроводная среда (смесь частиц сажи марки Т 900 и порошка диоксида кремния); 4 – хромсодержащая обмазка; 5 – металлическое изделие (поршневой палец

ГОСТ Р ИСО 18669-1-2018 [ $d_1 \times d_2 \times l_1$ , 14×9,5×43 мм из сталей 12ХН3А и 40Х]); 6 – воздух; 7 – индуктор  $d \times S$ , 8×1 мм с жидкостным охлаждением; 8 – охлаждающая жидкость (вода); 9 – металлический контейнер из сплава ВТ1-0 ( $d \times h$ , 40×90 мм); 10 – нижняя крышка контейнера.

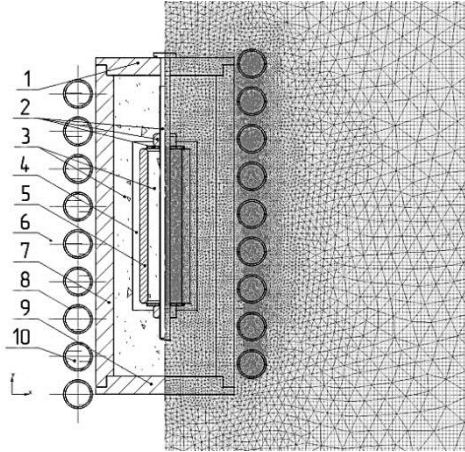


Рис. 1. Система индуктор – деталь

В программном обеспечении ELCUT 5.1 с учетом значений температурной зависимости тепло- и электрофизических свойств упрочняемого изделия, компонентов порошковой среды и хромсодержащей обмазки методом конечных элементов (численный метод математического анализа) проведены расчет и исследование кинетики нагрева поршневого пальца в системе индуктор – деталь с последующим определением электротехнологического режима упрочняющей обработки путем представления искомого решения в виде дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right) = -q(t) - C(t) \rho \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $t$  – температура, °С;  $\tau$  – длительность ВЧ-воздействия, с;  $q(t)$  – тепловой поток, (как функция температуры), Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda(t)$ ,  $C(t)$  – температурные зависимости коэффициента теплопроводности, Вт/м·°С, и удельной теплоемкости, Дж/кг·°С, металлического изделия (сталь 12ХН3А и 40Х)

в диапазоне температур от 20 до 1300 °С;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup> [11, 12].

При расчете на внешней границе системы учитывалось начальное условие, а на внутренней – граничное условие конвекции (третьего рода), математическое описание которых представлено следующими уравнениями:

$$t = t_0, \quad (2)$$

$$F_n = \alpha \cdot (t - t_0), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(°С·м<sup>2</sup>);  $t_0$  – температура окружающей среды, °С [13].

Экспериментальные исследования проведены на образцах и деталях из сталей 12ХН3А и 40Х с шероховатостью поверхности  $Ra=0,130$ . Методика проведения эксперимента заключалась в нанесении на предварительно очищенное от технологических загрязнений металлическое изделие (5) хромсодержащей обмазки (4) с последующей установкой в контейнере (9) и засыпкой свободного пространства смесью частиц сажи марки Т 900 и порошка диоксида кремния (3) дисперсностью 0,3...0,5 мм, являющейся тепло- и электропроводной средой. После этого диффузионную ячейку размещали в центре медного индуктора (7) и обеспечивали ее нагрев до необходимой температуры [14, 15].

Контроль температуры диффузионной ячейки обеспечивался тепловизором Fluke Ti400 бесконтактным методом. Для измерения силы тока в индукторе и потребляемой электрической мощности применялись токовые клещи UNI-T UT205 13-0003.

После этого проведена комплексная оценка качества поверхности, заключающаяся в исследовании микротвердости и шероховатости. Исследован фазовый состав поверхностного слоя. Проведена оценка износостойкости металлических образцов из сталей 12ХН3А и 40Х.

Измерение значений микротвердости проведено методом Виккерса по методике ГОСТ 9450-76 [16] на шлифах по направлению, перпендикулярному поверхностному слою при нагрузке на индентор 0,5 Н,

а продолжительность нагружения составляла 15 с. Результаты измерения оценивали по усредненным данным 5 отпечатков. Расстояние от центра отпечатка до края исследуемого образца выбиралось не менее двойного размера отпечатка. Расстояние между центрами отпечатков превышало их размер более чем в 3 раза. Для анализа микротвердости использовался пирамидальный микротвердомер 3 (ПМТ-3).

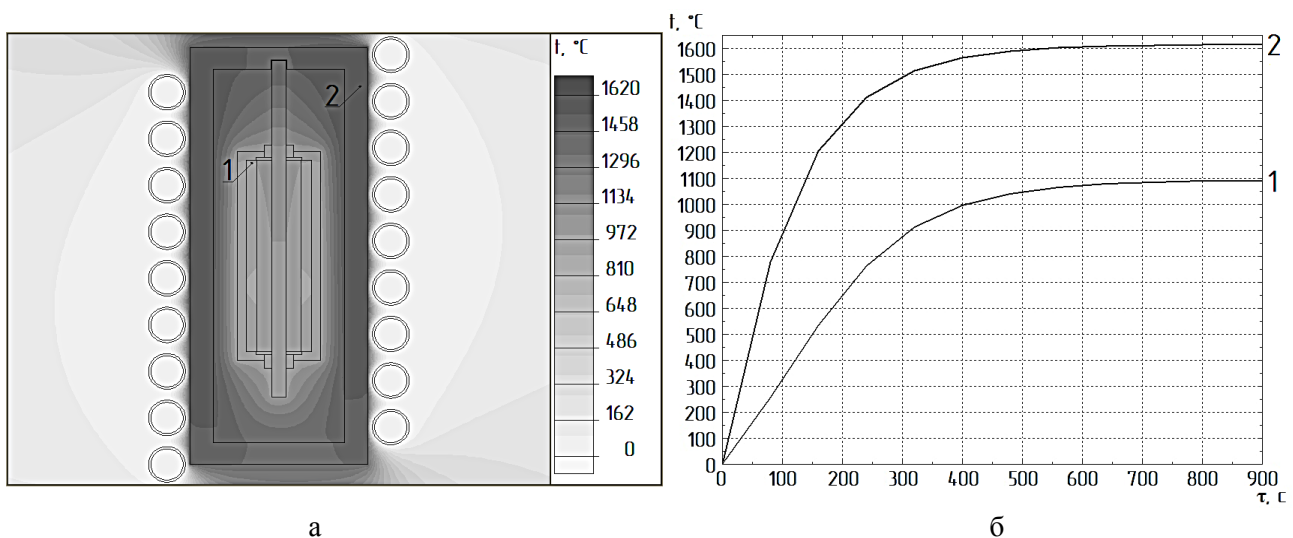
Шероховатость поверхности ( $R_a$  и  $R_z$ ) определена на профилографе-профилометре «Mitutoyo Surftest SJ-410» контактным методом с определением класса шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789-73 [17] по методике «Приборы для измерений параметров шероховатости серии 178. Руководство по эксплуатации».

Исследование фазового состава поверхностного слоя проведено методом рентгеновской дифракции в излучении  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\lambda = 0,154178$  нм) со снятием дифрактограмм по схеме Брэгга – Брентано в интервале углов  $2\Theta$  от 5 до  $90^\circ$  со скоростью съемки  $2^\circ/\text{мин}$  с последующей идентификацией карбидных фаз (дисперсной системы) в программном комплексе PDXL (с использованием базы данных ICDD). Для исследования фазового состава использовался порошковый дифрактометр ARL X'TRA. При работе напряжение на рентгеновской трубке составляло 40 кВ, электрический ток – 40 мА.

Оценка износостойкости проведена методом сферического абразивного изнашивания обработанной поверхности о вращающийся твердосплавный шарик из стали ШХ15 ( $d = 15$  мм) по режиму: частота вращения шпинделя 1300 об/мин, продолжительность теста 120 с до получения поверхностной выемки (отпечатка) и последующего расчета значений наработки ( $\Delta L$ ) и линейного износа ( $\Delta H$ ) по диаметру отпечатка ( $D$ ) в соответствии с методикой Р 50-95-88, разработанной Академией наук СССР [18]. Для оценки относительной износостойкости использовался толщиномер шарового истирания Константа-III2.

### Результаты и их анализ

Решением уравнения (1) с учетом крайних условий (2), (3) получены картина распределения тепловых потоков (рис. 2 а) и зависимость, характеризующая кинетику нагрева системы индуктор – деталь в процессе ВЧ-воздействия (рис. 2 б), на основании которых определены параметры оборудования (электротехнологический режим): частота электрического тока,  $f$  – 66000 Гц, сила тока в индукторе,  $I_H$  – 4200 А, и процесса упрочняющей обработки: максимально допустимая температура нагрева изделия –  $1090 \pm 2$  °С, системы индуктор – деталь –  $1615 \pm 2$  °С и длительность ВЧ-воздействия  $\tau$  –  $840 \pm 5$  с.



**Рис. 2.** Картина распределения тепловых потоков (а) и зависимость, характеризующая кинетику нагрева системы индуктор – деталь в процессе ВЧ-воздействия (б): 1 – поршневого пальца, 2 – металлического контейнера

Картина распределения тепловых потоков (рис. 2 а) адекватно описывает нагрев поршневого пальца до  $t = 1090 \pm 2$  °С и металлического контейнера до  $t = 1615 \pm 2$  °С в процессе ВЧ воздействия.

Из анализа рис. 2 б установлено, что ВЧ-воздействие длительностью  $840 \pm 5$  с обеспечивает нагрев поршневого пальца до  $t_{\max} = 1090 \pm 2$  °С (зависимость 1) и стабилизацию, а контейнера – до  $t = 1615 \pm 2$  °С (зависимость 2).

Исследование процесса создания поверхностного слоя с тугоплавкой карбидной структурой показало, что толщина диффузионного слоя ( $\delta$ ) демонстрирует нелинейную зависимость от температуры ( $t$ ). При  $t = 900-1050$  °С наблюдается увеличение  $\delta$ , в то время как при дальнейшем увеличении  $t$  до  $1100-1150$  °С рост  $\delta$  замедляется. Зависимость  $\delta / t$  аппроксимируется экспоненциальной функцией. Такое поведение объясняется изменением микроструктуры материала при высоких

температурах. Увеличение  $t$  до  $1100$  °С и выше приводит к снижению концентрации дефектов структуры, в частности вакансий и дислокаций, а также к интенсивному росту зерна. Увеличение размера зерна уменьшает долю граничной диффузии в общем диффузионном потоке. Совокупность этих факторов приводит к снижению диффузионной восприимчивости аустенитной и фазной составляющих обрабатываемых изделий, что в конечном итоге замедляет процесс получения металлического изделия с дисперсной системой из тугоплавких соединений на основе Cr в  $\alpha$ -Fe из хромсодержащей обмазки.

По полученным данным проведено экспериментальное исследование и определено оптимальное значение  $f$  для рассматриваемой системы индуктор – деталь, которое составляет  $65000-67000$  Гц, и зависимость кинетики нагрева диффузионной ячейки от значения силы тока в индукторе при ВЧ-воздействии (табл. 1).

Таблица 1 – Зависимость кинетики нагрева диффузионной ячейки от значения силы тока в индукторе при ВЧ-воздействии

Номер режима	Сила тока в индукторе, $I_H$ , А	Максимальная температура, $t$ , °С		Длительность ВЧ-воздействия, $\tau$ , с		Потребляемая электрическая мощность, $P_{\Sigma}$ , Вт
		изделия	ячейки (контейнера)	для выхода на нужную $t$	для выдержки	
1	3200	$905 \pm 2$	$1270 \pm 2$	$860 \pm 5$	$600 \pm 5$	826
2	3400	$935 \pm 2$	$1330 \pm 2$	$850 \pm 5$	$600 \pm 5$	877
3	3600	$960 \pm 2$	$1390 \pm 2$	$840 \pm 5$	$600 \pm 5$	929
4	3800	$985 \pm 2$	$1445 \pm 2$	$840 \pm 5$	$600 \pm 5$	981
5	4000	$1010 \pm 2$	$1500 \pm 2$	$840 \pm 5$	$570 \pm 5$	1032
6	4200	$1030 \pm 2$	$1550 \pm 2$	$840 \pm 5$	$570 \pm 5$	1084
7	4400	$1050 \pm 2$	$1600 \pm 2$	$760 \pm 5$	$570 \pm 5$	1135
8	4600	$1070 \pm 2$	$1620 \pm 2$	$760 \pm 5$	$480 \pm 5$	1187
9	4800	$1090 \pm 2$	более 1700	$640 \pm 5$	–	1239
10	5000	$1105 \pm 2$	более 1795	$570 \pm 5$	–	1290

В результате анализа табл. 1 установлено, что  $I_H = 3200-3800$  А обеспечивает нагрев изделия до  $t = 905-985$  °С за  $\approx 845 \pm 5$  с, при этом  $t$  контейнера составляет  $1270-1445$  °С, а потребляемая электрическая мощность  $P_{\Sigma} = 826-981$  Вт; при  $I_H = 3800-4400$  А нагрев изделия обеспечи-

вается до  $t = 985-1050$  °С за  $\approx 820 \pm 5$  с ВЧ-воздействия,  $t$  контейнера в это время составляет  $1445-1600$  °С, а  $P_{\Sigma} = 981-1135$  Вт; при  $I_H$  в диапазоне  $4400-4600$  А нагрев изделия обеспечивается до  $t = 1050-1070$  °С за  $\approx 760 \pm 5$  с ВЧ-воздействия, при этом  $t$  контейнера составляет  $1600-1620$  °С,



а  $P_{\Sigma} = 1135-1187$  Вт. Дальнейшее увеличение  $I_H$  приводит к оплавлению и деформации контейнера. При аппроксимации экспериментальных данных  $t$  от  $I_H$  и  $\tau - t(I_H, \tau)$  установлено, что множественный коэффициент детерминации  $R^2$  составляет 0,9247.

Полученные результаты полностью характеризуют нагрев рассматриваемой системы индуктор – деталь в процессе ВЧ-воздействия, обосновывают выбор частоты электрического тока, силу электрического тока в индукторе, длительность воздействия и обладают весьма высокой степенью тесноты, оцениваемой по шкале Чеддока.

По полученному режиму:  $f = 65000-67000$  Гц,  $I_H = 3200-4600$  А,  $t = 900-1070$  °С, при этом  $P_{\Sigma}$  составила 826-1135 Вт; проведена упрочняющая обработка металлических образцов и поршневого пальца из хромосодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия.

В результате исследования микротвердости сталей 12ХН3А и 40Х после упрочняющей обработки из хромосодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия обнаружено наличие двух зон – более твердой и менее твердой, находящейся под ним, протяженность и характеристики которых различаются.

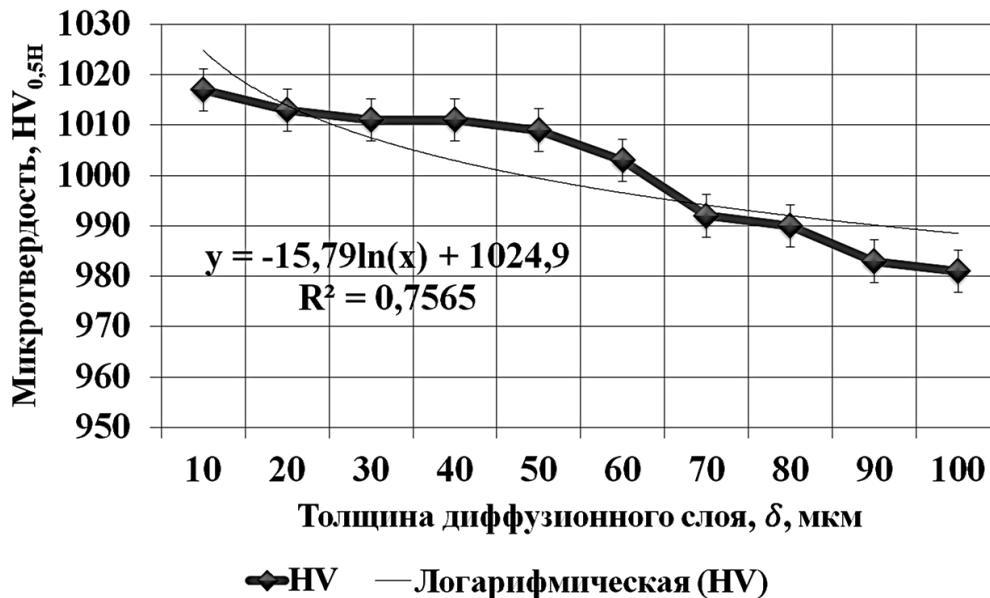


Рис. 3. Распределение микротвердости по сечению металлического изделия

Из анализа рис. 3 установлено, что среднее значение микротвердости после упрочняющей обработки из хромосодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия составило  $962 HV_{0,5H}$ , при этом сердцевина металла осталась в диапазоне  $180...240 HV_{0,5H}$ . При аппроксимации экспериментальных данных  $HV_{0,5H}$  от  $\delta$  и  $\tau - HV_{0,5H}(\delta, \tau)$  установлено, что множественный коэффициент детерминации  $R^2$  составляет 0,7565. Полученные результаты наиболее полно характеризуют изменение микротвердости в зависимости от толщины диффузионного слоя и длительности ВЧ-воздействия и обладают

высокой степенью тесноты, оцениваемой по шкале Чеддока.

Анализ параметров шероховатости поверхности металлического изделия до и после упрочняющей обработки из хромосодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия показал их незначительное уменьшение, не снижая при этом класс шероховатости (табл. 2).

Рентгенофазовый анализ сталей 12ХН3А и 40Х после упрочняющей обработки из хромосодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия установил наличие тугоплавких фаз:  $\alpha$ -Fe, Cr,  $Cr_7C_3$ ,  $(Cr,Fe)_7C_3$ , и  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  (рис. 4).

Таблица 2 – Результаты анализа параметров шероховатости поверхности

Параметр, мкм	Значение / Класс шероховатости	
	до упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия (состояние поставки)	после упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия
Ra	0,130 / 10	0,129 / 10
Rz	0,694 / 10	0,687 / 10

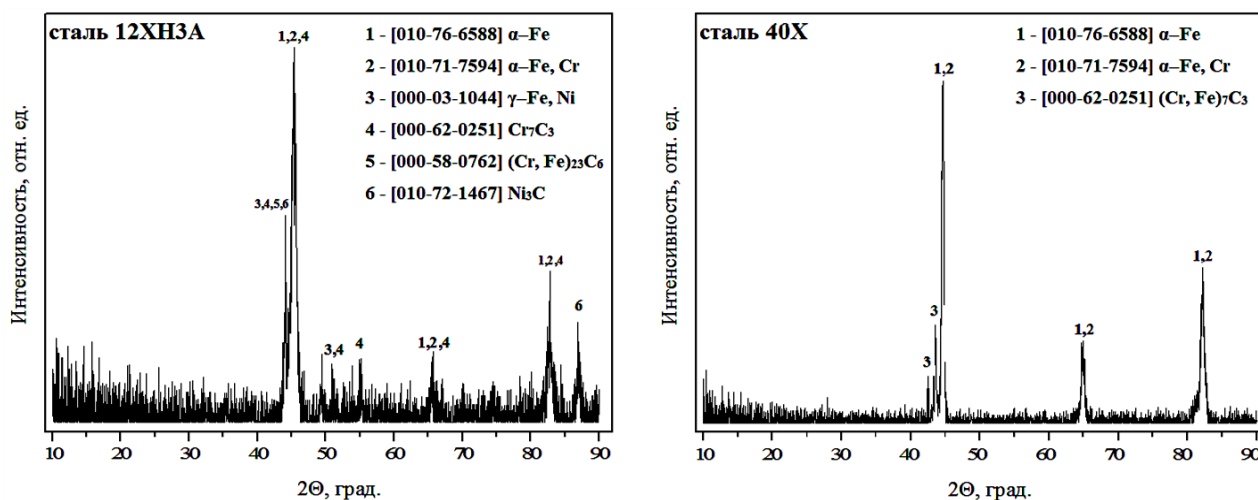


Рис. 4. Дифрактограмма поверхностного слоя сталей 12ХН3А и 40Х после упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия

Оценка износостойкости металлических образцов из сталей 12ХН3А и 40Х проведена по основным показателям, характеризующим износостойкость (безразмерный показатель износостойкости  $I$ , класс износо-

стойкости  $K$  и разряд износостойкости  $\alpha_K$ ) с последующим сравнением значений, полученных до и после упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия (табл. 3).

Таблица 3 – Значения износостойкости металлических образцов из сталей 12ХН3А и 40Х

Номер образца	Результаты испытаний на сферическое абразивное изнашивание		Показатели износостойкости по Р 50-95-88		
	$D$ , м	$\Delta H$ , м	$I$	$KI$	$\alpha_K$
1	изделий (поршневых пальцев) из стали 15Х, выпускаемых серийно				
	$16,627 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-5}$	$5,31 \times 10^6$	6	4
2	стали 12ХН3А до упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия (состояние поставки)				
	$15,419 \times 10^{-4}$	$1,98 \times 10^{-5}$	$6,18 \times 10^6$	6	4
3	стали 12ХН3А после упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия				
	$3,83 \times 10^{-5}$	$1,22 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{10}$	10	1
4	стали 40Х до упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия (состояние поставки)				
	0,0019512	$3,18 \times 10^{-5}$	$3,86 \times 10^6$	6	3
5	стали 40Х после упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия				
	$3,02 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$1,61 \times 10^{10}$	10	2

Из анализа табл. 3 установлено, что показатель износостойкости И образца № 3 выше, чем образца № 1, в 40,74 раза, и выше, чем у образца № 2, в 43,10 раза. При отнесении полученных значений показателя износостойкости И к классу КИ и разряду  $\alpha_K$  установлено, что образцу № 3 соответствует КИ 10/1, а образцам № 1, 2 – КИ 6/4. Подобная динамика наблюдается и у образца № 5. В сравнении с образцами № 1 и 4 показатель износостойкости И у образца № 5 выше в 34,56 и 30,62 раза соответственно. При отнесении полученных значений показателя износостойкости И к классу КИ и разряду  $\alpha_K$  установлено, что образцу № 5 соответствует КИ 10/2, образцу № 1 – КИ 6/4, а образцу № 4 – КИ 6/3.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении износостойкости металлических образцов из сталей 12ХН3А и 40Х после упрочняющей обработки из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия.

На основании результатов экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации для получения металлических изделий с тугоплавкой карбидной структурой методом диффузионного насыщения поверхности из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия, состоящим из следующих операций: 1. Численное моделирование и анализ кинетики нагрева диффузионной ячейки с учетом значений температурной зависимости тепло- и электрофизических свойств металлического изделия, компонентов порошковой среды и хромсодержащей обмазки. 2. Определение электро-технологического режима ВЧ-воздействия. 3. Ультразвуковая очистка изделий от технологических загрязнений. 4. Подготовка хромсодержащей обмазки. 5. Закрепление изделия с верхней / нижней крышкой контейнера при помощи крепежа. 6. Нанесение хромсодержащей обмазки на металлическое изделие. 7. Позиционирование изделия в контейнере. 8. Заполнение свободного пространства контейнера тепло- и электропроводной

средой, состоящей из смеси частиц сажи Т 900 и порошка диоксида кремния. 9. Позиционирование диффузионной ячейки в центре медного индуктора установки ВЧ-воздействия. 10. Включение питания и установка электро-технологического режима ВЧ-воздействия:  $f = 65000-67000$  Гц,  $I_H = 3400-4700$  А. 11. Нагрев диффузионной ячейки до  $t = 900-1050$  °С.

### Заключение

По компьютерной модели распределения тепловых потоков и кинетики нагрева поршневого пальца (детали) и системы индуктор – деталь в процессе ВЧ-воздействия с учетом значений температурной зависимости тепло- и электрофизических свойств детали, компонентов порошковой среды и хромсодержащей обмазки путём представления искомого решения в виде дифференциального уравнения теплопроводности с граничным условием конвекции (третьего рода) на внутренней границе системы определены: параметры оборудования (электро-технологический режим):  $f = 65000-67000$  Гц,  $I_H = 4200$  А, и процесса упрочняющей обработки:  $t_{изделия} = 1100 \pm 2$  °С,  $t_{контейнера} = 1615 \pm 2$  °С и  $\tau = 840 \pm 5$  с.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получена компьютерная модель расчета электро-технологического режима упрочняющей обработки в процессе ВЧ-воздействия и разработаны технологические рекомендации для получения на малогабаритных металлических изделиях поверхностного слоя с высокой микротвердостью до 962 HV<sub>0,5H</sub> и износостойкостью КИ 10/1-10/2. Производственные испытания металлических изделий, упрочненных из хромсодержащей обмазки в процессе ВЧ-воздействия, показали увеличенную в 7-10 раз стойкость к износу. Применение результатов исследования позволяет сократить затраты на потребляемую электрическую мощность в 3-5 раз в сравнении с традиционными методами поверхностного упрочнения.

При аппроксимации экспериментальных данных  $t$  от  $I_H$  и  $\tau - t(I_H, \tau)$  и  $HV_{0,5H}$  от  $\delta$  и  $\tau - HV_{0,5H}(\delta, \tau)$  множественный коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,9247

и 0,7565 соответственно. Полученные результаты обладают весьма высокой степенью тесноты, оцениваемой по шкале Чеддока.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сокунов Б.А., Грובהва Л.С. Электротермические установки (электрические печи сопротивления): учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. 122 с.

2. Корягин Ю.Д., Филатов В.И. Индукционная закалка сталей: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 52 с.

3. Влияние силы тока индуктора на температуру нагрева титановых изделий дисковой и цилиндрической формы / А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко и др. // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 53-58.

4. Войко А.В., Фомин А.А. Электротехнологический процесс химико-термической обработки токами высокой частоты малоразмерных титановых изделий и изменение физико-механических и трибологических характеристик их рабочих поверхностей // Вопросы электротехнологии. 2025. № 2. С. 5-12.

5. Фомин А.А. Инженерия поверхности функциональных материалов и численное моделирование физических процессов при индукционной обработке металлов: учеб. пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2020. 92 с.

6. Мешков Ю.Я., Стаценко И.С., Безбах В.Д. О причинах подавления отпускной хрупкости в сталях при скоростном электроотпуске // Металловедение и термическая обработка металлов. 1994. № 2. С. 15-17.

7. Baake E., Shpenst V.A. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. P. 660-668.

8. Никифоров В.И. Электрохимические и электрофизические технологии в машиностроении. Электроэрозионные, химические и электрохимические методы обработки: учеб. пособие для вузов по направлению

ям подготовки бакалавров укрупненной группы. Санкт-Петербург: СПбПУ, 2013. 302 с.

9. Исследование влияния скоростной физико-технической обработки током высокой плотности на структуру и свойства инструментальной стали 8Х6НФТ / Б.В. Устинов, Е.Н. Гришин, А.А. Аушев, И.М. Мальцев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5 (107). С. 317-326.

10. Фазовый анализ диффузионного слоя на стали У8, полученного в смеси содержащей феррохром / В.А. Бутуханов, Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев, Ш. Мэй, Б.С. Цыдыпов // Ползуновский альманах. 2016. № 4. С. 47-51.

11. Elcut – инженерный инструмент МКЭ-моделирования: доклад / С.Д. Дубицкий, О.Я. Ильина. Санкт-Петербург: ПК «ТОР», 2014. 13 с. // ПК «ТОР»: [сайт]. URL: <http://elcut.ru/publications/dubitsky8.pdf> (дата обращения 09.10.2025).

12. Черных И.В. Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. №. 2. С. 4-8.

13. Пономарев С.В., Мищенко С.В., Дивин А.Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: монография: в 2 кн. Кн. 1. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. 204 с.

14. Пат. 2819547 Российская Федерация, МПК С23С 10/40. Способ хромирования поверхностных слоев конструкционной легированной стали / М.Ю. Шигаев, Н.И. Китаев, С.Я. Пичхидзе и др.; заявитель и патентообладатель СГТУ имени Гагарина Ю.А. № 2023128338; заявл. 31.10.2023; опубл. 21.05.2024. Бюл. № 15. 10 с.: ил.

15. Китаев Н.И., Пичхидзе С.Я. Разработка ресурсосберегающей технологии диффузионного хромирования поверхностного слоя стали 12ХН3А при высоко-

температурном микродуговом воздействии // Технология машиностроения. 2024. № 8. С. 22-28. DOI: 10.34641/TM.2024.266.8.052.

16. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: введен 1977-01-01. Москва: Издательство стандартов, 1993. 36 с.

17. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: введен 1975-01-01. Москва: Издательство Стандартиформ, 2013. 8 с.

18. Р 50-95-88. Рекомендации. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения: введен 1988-10-28. Москва: Издательство стандартов, 1989. 25 с.

---

---

**Китаев Никита Игоревич** – преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

**Nikita I. Kitaev** – Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Alexey V. Voyko** – Senior Lecturer, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 14.11.25, принята к опубликованию 15.12.25*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ТИТАНОВЫХ ДИСКОВ И СТЕРЖНЕЙ С ТАНТАЛОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ

М.А. Фомина, В.А. Кошуро, А.А. Фомин

## NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-FREQUENCY CURRENT HEATING OF TITANIUM DISKS AND RODS WITH TANTALUM COATINGS IN AIR

M.A. Fomina, V.A. Koshuro, A.A. Fomin

*Изучены процессы объемного тепловыделения и нестационарной теплопередачи при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ) титановых дисков и стержней, фрагменты которых имеют танталовое покрытие. Решение задачи электродинамики и моделирование распределения мощности объемного тепловыделения осуществлено методом конечных элементов. Установлено, что по абсолютному значению величина мощности объемного тепловыделения в танталовом покрытии в 3 раза превышает данную величину в титановой основе. Анализ температурных полей в нагреваемых титановых образцах с танталовым слоем характеризуется умеренным влиянием покрытия на кинетику нагрева различных фрагментов конструкций. Несмотря на большую величину тепловыделения в слое тантала, фрагмент конструкции с покрытием нагревался менее интенсивно, а перепад температуры между участками с покрытием и без него достигал 30–50 °С. Решение тепловой задачи при обработке ТВЧ титановых образцов в воздушной атмосфере скорректировано за счет ввода эндотермического функционала, определяемого полиномом 3-го порядка температурного и токового факторов с учетом их парного взаимодействия, что обеспечило адекватность теоретических данных кинетики нагрева.*

*Volumetric heat generation and non-stationary heat transfer processes during high-frequency current (HFC) heating of titanium disks and rods, the fragments of which have a tantalum coating, were studied. The solution to the electrodynamic problem and simulation of the volumetric heat generation power distribution was performed using the finite element method. It was found that the absolute value of the volumetric heat generation power in the tantalum coating was three times higher than that in the titanium substrate. Analysis of the temperature fields in the heated titanium samples with tantalum layers is characterized by a moderate effect of the coating on the heating kinetics of various structural fragments. Despite high heat generation in the tantalum layer, the coated structural fragment heated less intensely, and the temperature difference between the coated and uncoated sections reached 30–50 °C. The solution to the thermal problem during HFC heating of titanium samples in air was adjusted by introducing an endothermic functional defined by a third-order polynomial of the temperature and current factors, taking into account their pairwise interaction. This ensured the adequacy of the theoretical heating kinetics data.*

Ключевые слова: *нагрев токами высокой частоты, объемное тепловыделение, кинетика нагрева, ток индуктора, титан, диск, стержень, тантал, покрытие, эндотермический функционал*

### Введение

Электрический нагрев нашел широкое применение для различных технологических процессов металлообработки, включая упрочняющую термообработку сплавов [1, 2]. Особое место среди данного типа электротехнологий находит индукционный нагрев, в частности нагрев токами высокой частоты (ТВЧ). Развитие индукционного нагрева связано с повышением технико-экономических показателей обработки металлических материалов, в частности для задач сквозного прогрева заготовок под горячую обработку давлением или объемную закалку [3, 4]. Научные основы технологии индукционного нагрева достаточно подробно раскрыты в работах отечественных школ и зарубежных исследователей [5, 6], разработаны различные типы конструкций технологического инструмента – индукторов для повышения эффективности и равномерности нагрева [7-9], а при решении связанных задач электродинамики и теплопроводности учитываются сложные явления в приповерхностном слое металлоизделий, в частности закалка или фазовые превращения при получении оксидных покрытий [10].

Электрометаллургия тугоплавких металлов представляет особый интерес, например при получении тантала, ниобия, молибдена и ряда других металлов, а также сплавов на их основе. Эти материалы нашли широкое применение в микроэлектронике и вакуумных радиопередающих устройствах, а также медицинском приборостроении и изготовлении тканезамещающих медицинских изделий [11].

Многие тугоплавкие металлы, в частности молибден, ниобий, тантал, обладают выраженными биосовместимыми качествами [12]. Данные материалы являются дорогостоящими, поэтому их обычно получают на поверхности металлоизделий, например

Keywords: *high-frequency current heating, volumetric heat generation, heating kinetics, inductor current, titanium, disk, rod, tantalum, coating, endothermic functional*

титановых имплантатов, в виде защитных пленок или высокопористых остеокондуктивных покрытий [13, 14]. Нанесение тугоплавких металлов для высокотехнологичных медицинских изделий обычно осуществляют методами физического или химического вакуумно-конденсационного осаждения [15]. Для увеличения производительности массопереноса при получении покрытий достаточно часто используется газотермическое напыление, например электроплазменное напыление на воздухе [16]. Помимо указанных методов, высокую производительность и селективность модификации поверхности обеспечивают электрофизические методы, в частности электроискровое нанесение покрытий или электроискровое микролегирование рабочих участков конструкции имплантатов и других тканезамещающих металлоконструкций [17].

Получение защитных покрытий, например танталовых, на титановых изделиях представляет большой интерес для расширения масштабов использования электрофизических и электротехнологических методов упрочняющей термообработки и инженерии поверхности. Для эффективного переноса тугоплавких металлов, в частности тантала, требуются особые условия, такие как повышенная энергия электроискровых импульсов и увеличенное время контактного взаимодействия электрода-инструмента с модифицируемой поверхностью электрода-изделия. Существенный перепад теплофизических характеристик в системе «покрытие – основа изделия» приводит к неизбежному возникновению большого числа дефектов, наиболее критическими из которых являются трещины и скопления пор различного типа. Достаточно эффективным вариантом для устранения таких дефектов является метод индукционно-термической обработки титановых изделий, в том числе с танталовыми



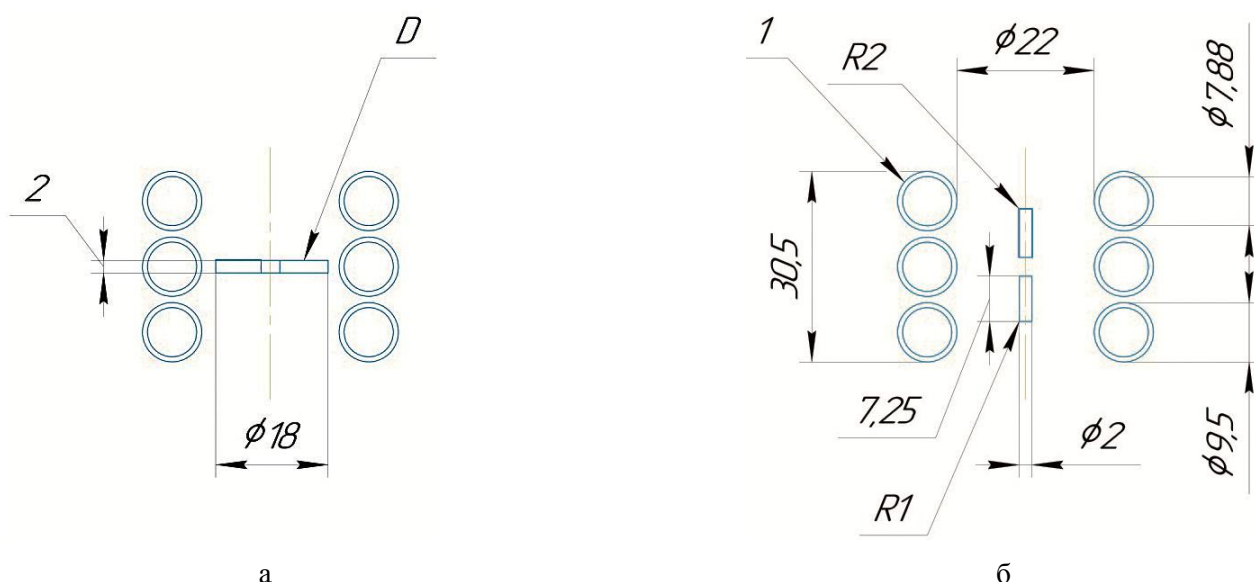
покрытиями [17]. Таким образом, в данной работе рассмотрены закономерности объемного тепловыделения при нагреве ТВЧ титановых образцов (дисков, стержней), фрагменты которых имеют танталовое покрытие, а также определены особенности их кинетики нагрева в воздушной атмосфере с учетом эндотермического влияния факторов температуры, тока индуктора и их парного взаимодействия.

# Постановка задачи численного моделирования процесса нагрева ТВЧ титановых образцов с танталовыми покрытиями

При нагреве ТВЧ титановых образцов в виде дисков и стержней, фрагменты которых имеют танталовое покрытие, решается

связанная краевая задача электродинамики и нестационарной теплопередачи. В результате решения данной задачи появляется возможность изучить характер распределенных процессов объемного тепловыделения и кинетики нагрева рабочих фрагментов титановых конструкций различной геометрии, а также определить интенсивность влияния защитного покрытия, в данном случае танталового, и воздушной атмосферы.

Технологическим инструментом в рассматриваемой системе является медный водоохлаждаемый индуктор, число витков которого принято равным  $w = 3$  (на 2D-модели показаны 6 полувитков), внутренний диаметр  $D = 22$  мм и длина  $H = 30,5$  мм (рис. 1).



**Рис. 1.** 2D-модели систем «индуктор – диск» (*а*) и «индуктор – стержни» (*б*):

1 – индуктор,  $D$  – титановый диск (левый фрагмент сверху имеет танталовое покрытие),

*R1* – титановый стержень без покрытия, *R2* – титановый стержень с танталовым покрытием

Данные параметры соответствуют экспериментальным значениям, которые были рассмотрены в предыдущих исследованиях [18]. Диаметр трубки индуктора составил 9,5 мм, а ее внутренний диаметр – около 8 мм. В центральной части активной области индуктора размещается образец I типа («диск») диаметром  $d_{S1} = 18$  мм и высотой  $h_{S1} = 2$  мм, левая половина которого с верхней стороны имеет танталовое покрытие толщиной 0,1 мм (рис. 1 а). Титановые об-

разцы II типа («стержни») диаметром  $d_{S2} = 2,0$  мм и длиной  $h_{S2} = 7,25$  мм, из которых «верхний» стержень имеет танталовое покрытие толщиной 0,1 мм, вертикально размещаются в центральной части активной области индуктора (рис. 1 б). Оба типа образцов имеют схожие массогабаритные характеристики, что позволяет сопоставлять динамику их нагрева. Рассматриваемая система и ее геометрическая 2D-модель также содержат блоки «воздух»

и «вода» (для охлаждения индуктора), а также границу рассматриваемой области в виде квадрата, размеры которого исключают влияние на корректность решения связанной краевой задачи электродинамики и нестационарной теплопередачи.

Характер нагрева ТВЧ, а именно скорость и равномерность прогрева титановых дисков и стержней с танталовыми покрытиями до требуемой температуры, зависел от большого числа факторов. При моделировании задавались параметры электрической цепи, электрофизические и теплофизические характеристики материалов и сред (блоков модели), характеристики граничных процессов (границ блоков и всей системы) и длительность численного эксперимента (для нестационарных процессов), которая в данном случае не превышала  $t = 120$  с.

Ток индуктора  $I$  задавался в диапазоне от 2,0 до 3,2 кА, что соответствовало току на каждом из полувитков 2D-модели от 330 до 530 А [17,18]. Частота тока имела постоянное значение  $f = 88$  кГц, что также соответствовало средней частоте в физическом эксперименте. Выбранное соотношение длины индуктора и высоты титановых образцов обеспечивало симметричное распределение внутреннего источника тепла (без учета покрытия).

Физическими параметрами блоков модели являлись электрофизические (коэффициент электропроводности  $\sigma$ ; относительная магнитная проницаемость  $\mu$ ) и теплофизические (коэффициент теплопроводности  $k$ , удельная теплоемкость  $C$  и плотность  $\gamma$ ) величины (табл. 1).

Таблица 1 – Свойства блоков модели

Блок модели	Коэффициент электропроводности $\sigma$ , $\text{См} \cdot \text{м}^{-1} (\times 10^6)$	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Удельная теплоемкость $C$ , $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Плотность $\rho$ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Примечание
1. Индуктор	57,97	401	385	8933	Медь
2. Образец (диск или стержни)	2,07	22	531	4500	Титан (при 20 °С) [19]
	0,66	28	664	4350	~1130 °С [19]
3. Покрытие (фрагмент конструкции)	7,42	55	140	16660	Тантал (при 20 °С) [19]
	1,70	58	159,5	16310	~1130 °С [19]
4. Вода	0	0,64	4178	996	Охладитель (интенсивный поток)
5. Воздух	0	0,027	1005	1,16	Окружающая среда

Так как в рассматриваемой системе «индуктор – образец» отсутствовали ферромагнитные материалы, для всех блоков магнитная проницаемость принималась  $\mu = 1$  (в таблице не указано). Сделаны также допущения, что электропроводность неметаллических блоков  $\sigma \approx 0$ .

При моделировании распределения температурного поля в нагреваемых блоках

«образец» и «покрытие» электро- и теплофизические характеристики задавались при соответствующих значениях для высокотемпературного процесса в диапазоне 800-1200 °С (табл. 1).

Для решения тепловой задачи были заданы коэффициенты, соответствующие экспериментальным данным нагрева (табл. 2).

Теплоотдача для процесса, характеризующего конвекцией:

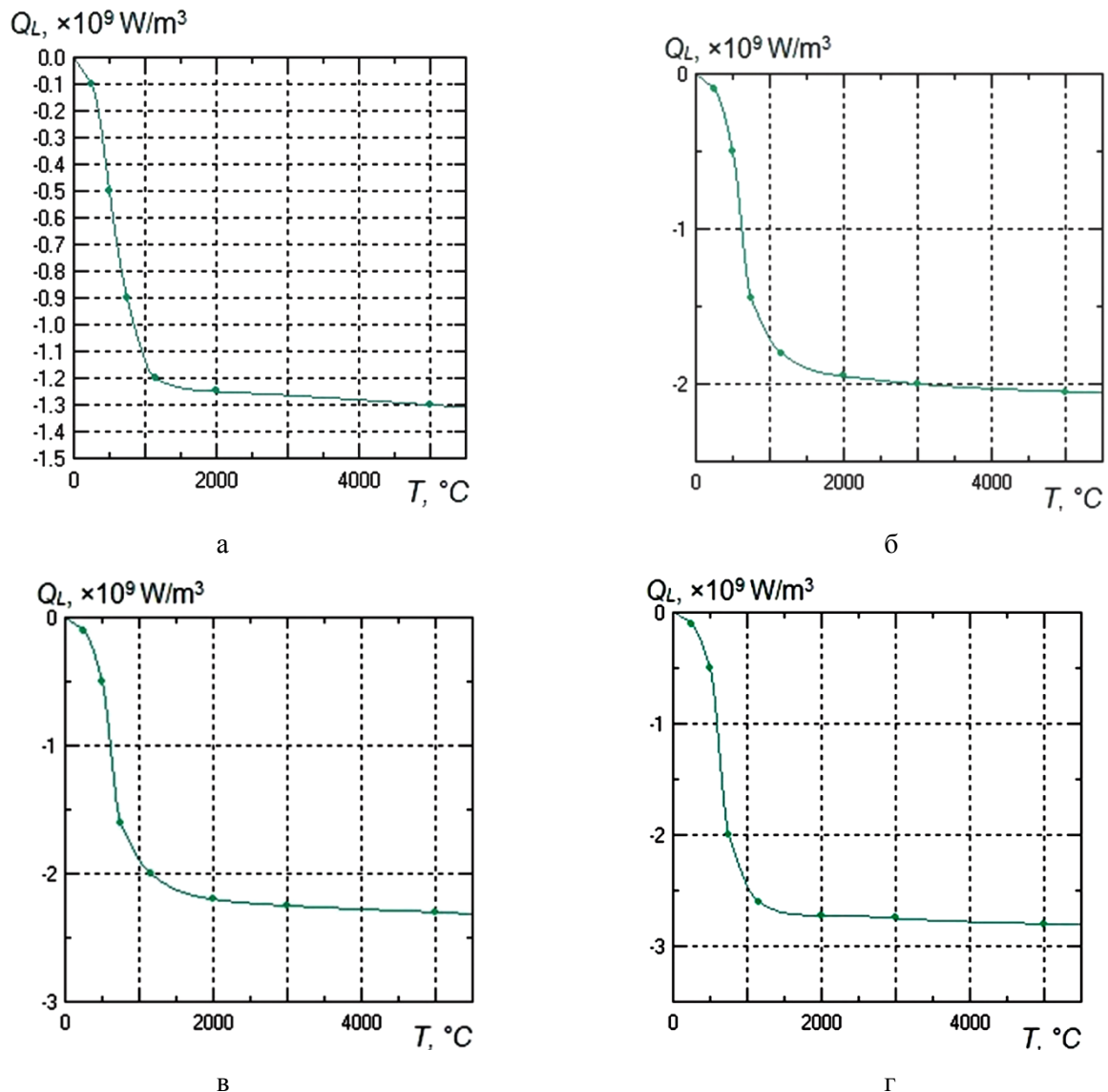
$$F_n = \alpha_{CONV} \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

где  $(T - T_0)$  – разница между текущей и начальной температурой поверхности блока, К.

Таблица 2 – Значения коэффициентов для границ блоков

Наименование границы блока	Коэффициент конвективной теплопередачи $\alpha_{CONV}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	Коэффициент излучения $\epsilon_{RAD}$
1. Внутренняя поверхность трубки индуктора (интенсивный поток воды)	$(1,0-1,2) \cdot 10^4$ *	–
2. Образец с покрытием при выдержке	10	~0,65
3. Другие поверхности блоков	5-10	0,95

\* указано типичное значение для стационарного режима испарения; однако это значение может достигать  $\sim 10^5$  при температуре, близкой к точке плавления.



**Рис. 2.** Кривые тепловых потерь  $Q_L(T)$ , определяемые физико-химическим воздействием активной среды на металлические элементы («блоки» модели) при соответствующих значениях тока индуктора  $I$ : а – 2,0 кА; б – 2,6 кА; в – 2,9 кА; г – 3,2 кА

Теплоотдача для процесса, характеризующего потерями на излучение:

$$F_n = \varepsilon_{RAD} \cdot k_B \cdot (T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где  $k_B \approx 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – постоянная Стефана – Больцмана.

Для корректного решения тепловой задачи также необходимо было учесть сопутствующие процессы, возникающие при высокотемпературной обработке титановых образцов в диапазоне  $800\text{--}1200^\circ\text{C}$ , в частности затраты тепла  $Q_L$  при появлении диффузионного кислородсодержащего слоя и оксидного покрытия. Данная величина  $Q_L$  задавалась в программе Elcut в виде кривых  $Q_L(T)$ , однако, как было установлено в ходе предварительных физических экспериментов, данная функция также зависела от основного технологического фактора – тока индуктора  $I$  (рис. 2).

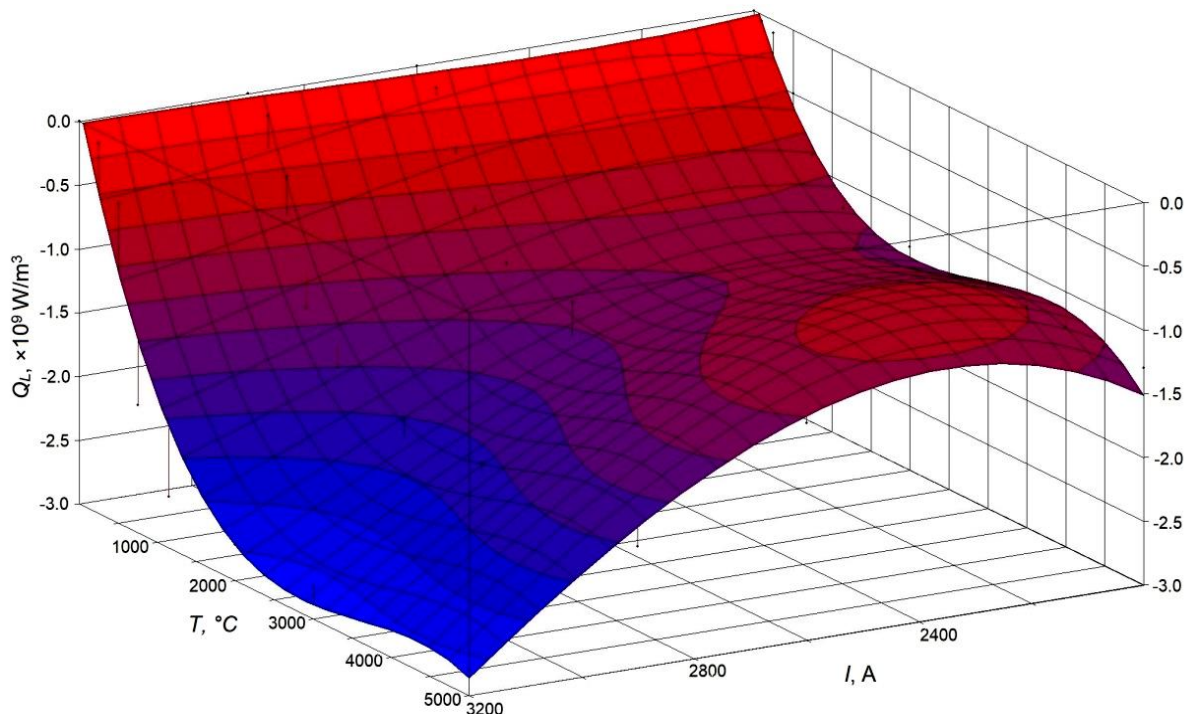
Обобщение данных компьютерного и физического (исходных результатов [17]) экспериментов предусматривало получение двухпараметрического функционала  $Q_L(T, I)$ ,

аппроксимированного полиномом 3-го порядка с учетом взаимодействия факторов:

$$\begin{aligned} Q_L(T, I) = & -20,2 \times 10^9 + (22,9 \times 10^6) \cdot I + \\ & + (-2,7 \times 10^6) \cdot T + (-8,4 \times 10^3) \cdot I^2 + \\ & + (0,4 \times 10^3) \cdot T^2 + (1,3 \times 10^3) \cdot I \cdot T + \\ & + (0,01 \times 10^{-2}) \cdot I^3 + (-7,20 \times 10^{-2}) \cdot T^3 + \\ & + (11,97 \times 10^{-2}) \cdot I \cdot T^2 + \\ & + (-41,71 \times 10^{-2}) \cdot I^2 \cdot T. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент корреляции полученной регрессионной зависимости составил  $R^2 = 0,93$ , что достигалось только в случае полиномиальной зависимости не менее 3-го порядка и парного взаимодействия факторов  $I \cdot T$ ,  $I \cdot T^2$  и  $I^2 \cdot T$ . Ошибка расчета согласно данной зависимости в области температур выдержки (свыше  $800^\circ\text{C}$ ) изменялась от 35 до 16-22 %.

Введение эндотермического функционала  $Q_L(T, I)$  при расчете критических температур обрабатываемых образцов с покрытиями обеспечивало корректность решения тепловой задачи, что верифицировалось исходными данными физического эксперимента (рис. 3).

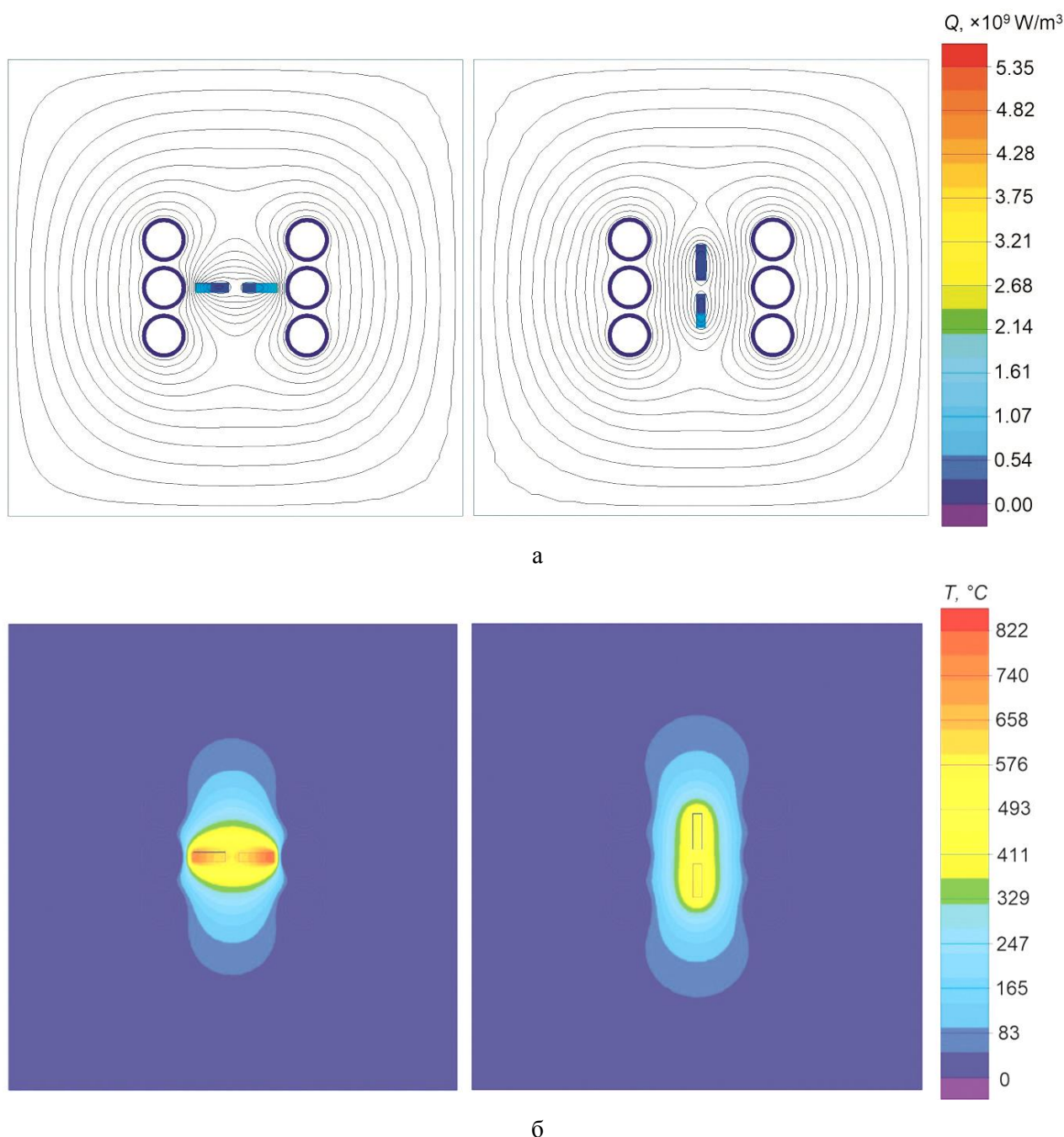


**Рис. 3.** Эндотермический функционал  $Q_L(T, I)$ , определяемый физико-химическим воздействием активной среды с металлическими элементами («блоками» модели) при соответствующих значениях тока индуктора  $I$  в широком диапазоне изменения температуры  $T$

### Результаты моделирования процесса нагрева ТВЧ титановых образцов с танталовыми покрытиями

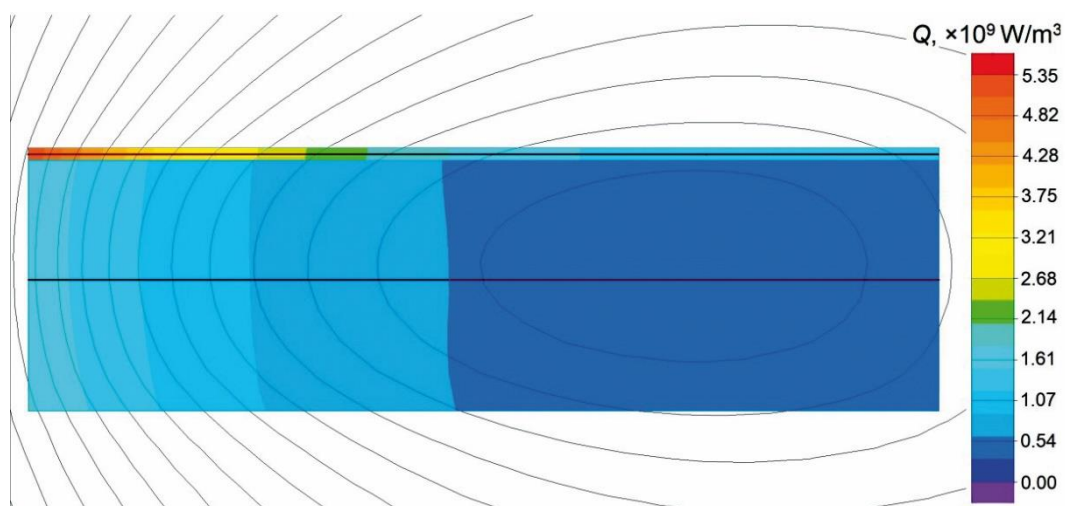
При решении задачи электродинамики для системы «индуктор – образец» установлено, что участки образцов с танталовым покрытием характеризовались более интенсивным объемным тепловыделением  $Q$  (рис. 4 а, 5, 6).

При минимальном токе индуктора  $I = 2$  кА в титановом диске возникает объемный источник тепловыделения  $Q$  с максимальной мощностью  $\sim 1,7 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> (рис. 5 а, в). Данная величина  $Q$  имеет экспоненциальное распределение в глубину, интенсивность которого спадает в  $e$  раз на расстоянии от края диска  $\sim 3,1$  мм.

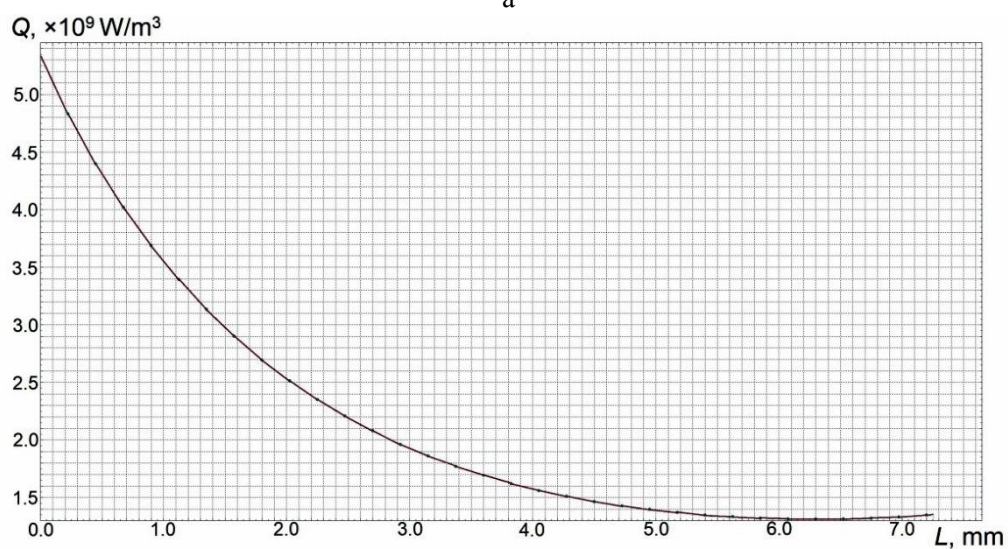


**Рис. 4.** Характерные 2D-картины полей распределения объемного тепловыделения  $Q$  при токе индуктора  $I = 2,0$  кА (а) и температуры  $T$  (б) при наибольшей выдержке ( $t = 120$  с) для диска (сегменты слева) и стержней (сегменты справа)

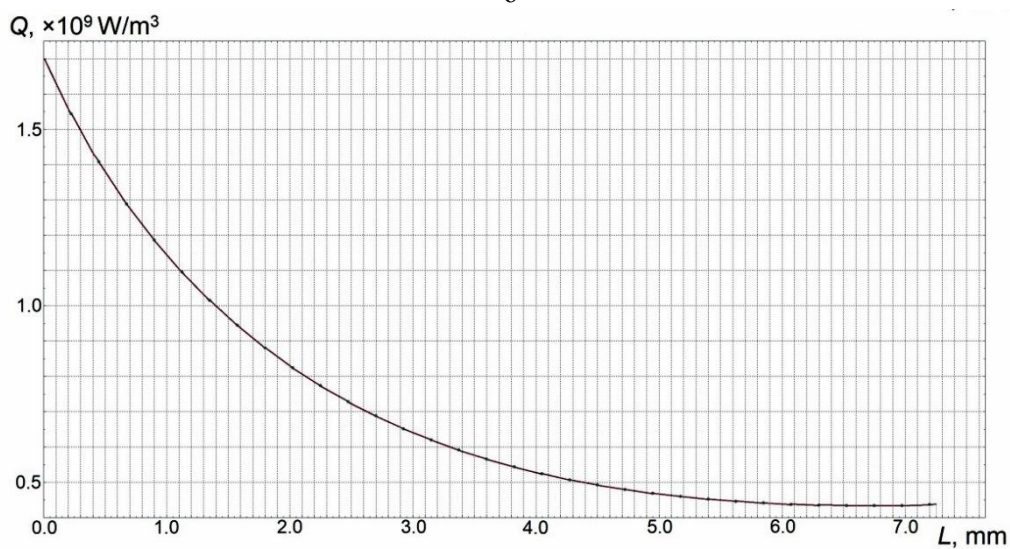




а



б



в

**Рис. 5.** Распределение объемного тепловыделения  $Q$  для образца «титановый диск – танталовое покрытие» при  $I = 2,0$  кА (а) с детализацией радиального распределения по сечению для танталового покрытия (б) и титановой основы (в)

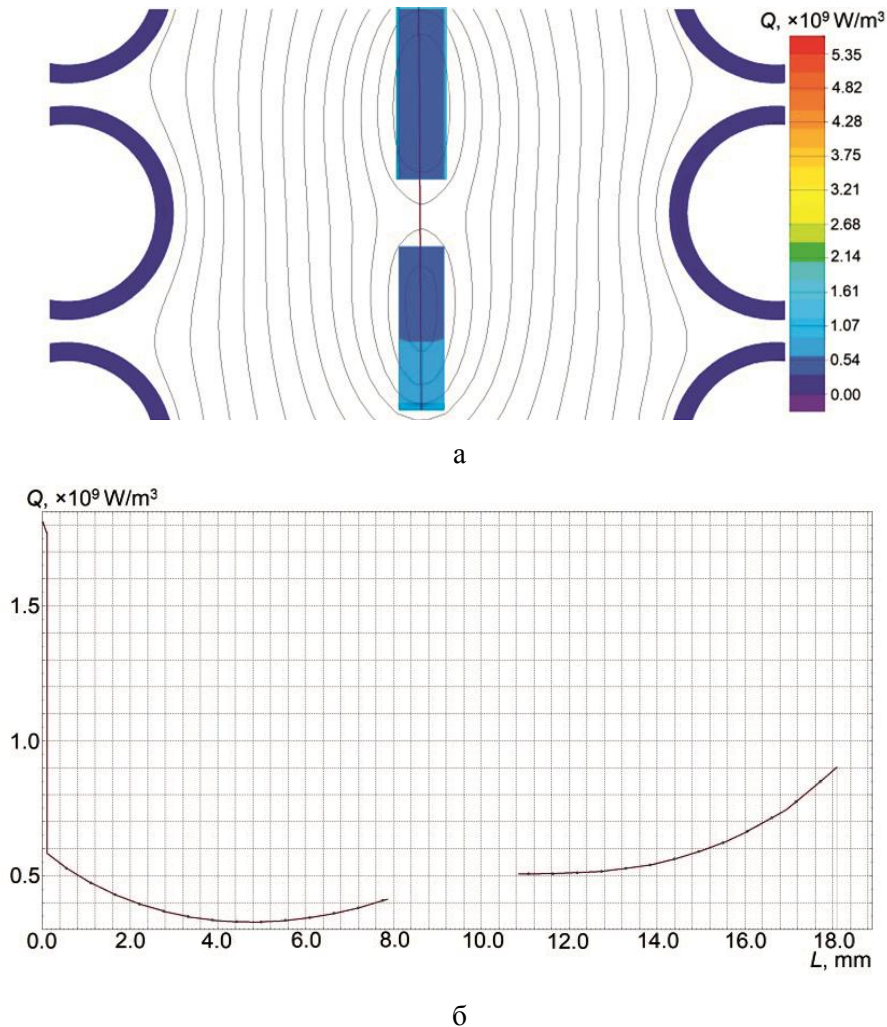
В танталовом покрытии возникает источник с максимальной мощностью  $\sim 5,3 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>, что в  $\sim 3$  раза больше, чем в титане (рис. 5 б). Источник объемного тепловыделения  $Q$  в танталовом покрытии имеет выраженный экспоненциальный спад в глубину таким образом, что его интенсивность спадает в  $e$  раз на расстоянии от края диска  $\sim 2,9$  мм.

Во всех случаях при расчете радиального распределения мощности объемного источника не наблюдается ее спад до нулевой отметки. В случае титанового диска минимальное значение мощности составляет  $\sim 0,45 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>, что вчетверо меньше максимума, локализованного на поверхности. Для танталового покрытия локальный минимум составляет

$\sim 1,3 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>, что практически эквивалентно максимальному значению тепловыделения в титане.

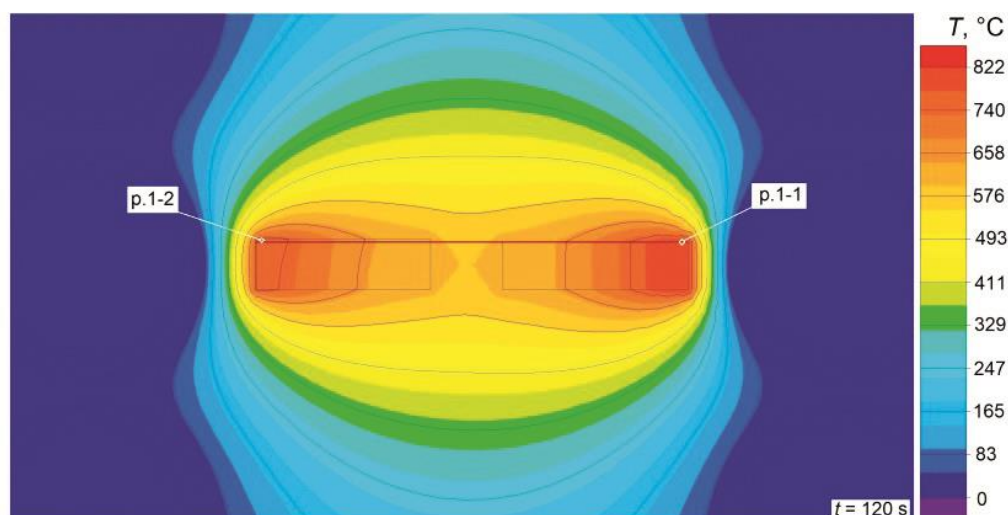
Для образцов II типа (стержней) максимум тепловыделения составил  $\sim 1,8 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>, что локализовалось в танталовом покрытии (рис. 6).

Для титанового стержня без покрытия величина  $Q$  не превышала  $\sim (0,5-0,9) \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> (рис. 6 б). Из-за большого зазора между внутренней поверхностью индуктора  $D$  и диаметром стержней  $d_{s2}$  существенного перепада объемного тепловыделения по длине стержня  $h_{s2}$  не наблюдалось. Это особенно выражено для стержня с танталовым покрытием, для которого  $Q$  изменялось в диапазоне  $\sim (0,3-0,6) \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>.

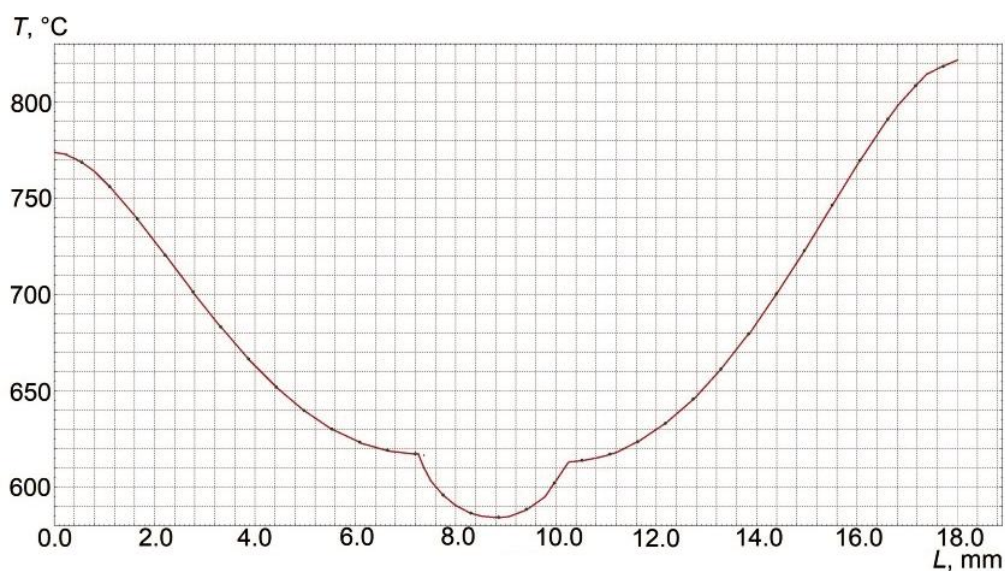


**Рис. 6.** Распределение объемного тепловыделения  $Q$  для образцов «титановый стержень – танталовое покрытие» при  $I = 2,0$  кА (а) с детализацией осевого распределения по сечению стержней с танталовым покрытием (верхний) и без покрытия (нижний)





а



б

**Рис. 7.** Асимметричное распределение температуры  $T$  для образца «титановый диск – танталовое покрытие» при  $I = 2,0$  кА в момент времени  $t = 120$  с (а) с детализацией радиального распределения по сечению в приповерхностном слое танталового покрытия и титановой основы (б)

Температурное поле в образце I типа (диске) было несколько асимметричным, из-за наличия танталового покрытия (рис. 7). Фрагмент конструкции титанового диска с покрытием (точка p. 1-2) был холоднее на 30-35 °C по сравнению с титановым фрагментом без покрытия (точка p. 1-1).

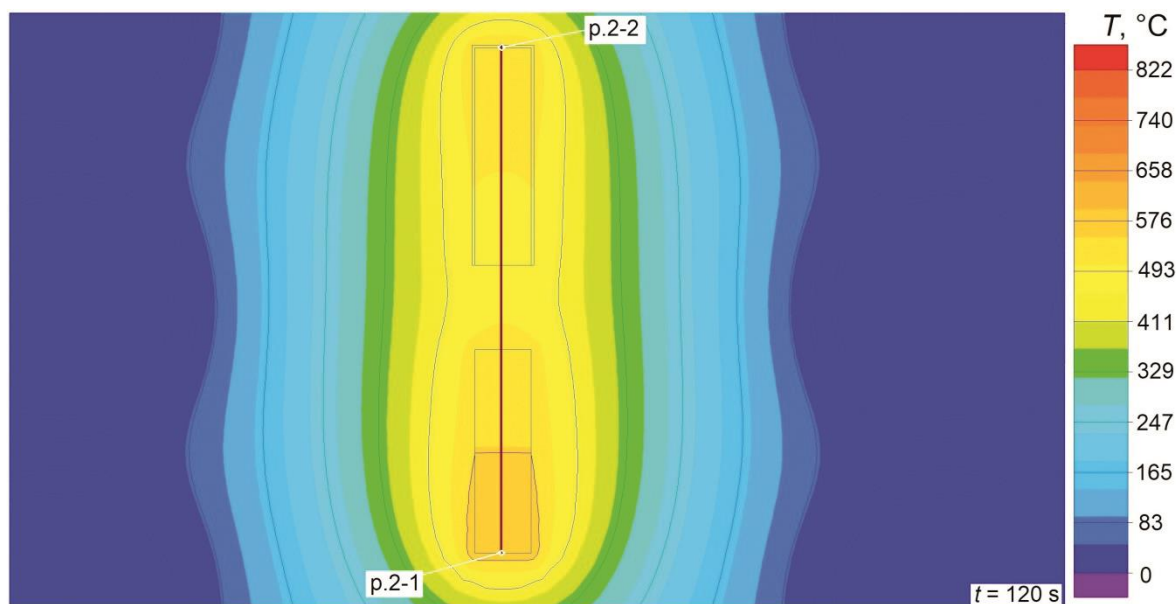
Для титановых стержней осевое распределение температуры имело более выраженный перепад в центральной части, однако разница температур в характерных (точки p. 2-1 и p. 2-2) и прочих фрагментах конструкции не превышала 40-45 °C.

Кинетика нагрева титановых образцов двух типов (дисков и стержней) при минимальном токе индуктора  $I = 2,0$  кА характеризовалась участком быстрого разогрева за  $t \approx 12-14$  с и последующей высокотемпературной выдержки при квазистационарной температуре (рис. 9 а). При данном токе индуктора температура выдержки для диска умеренно отличалась на 230-250 °C от температуры стержней.

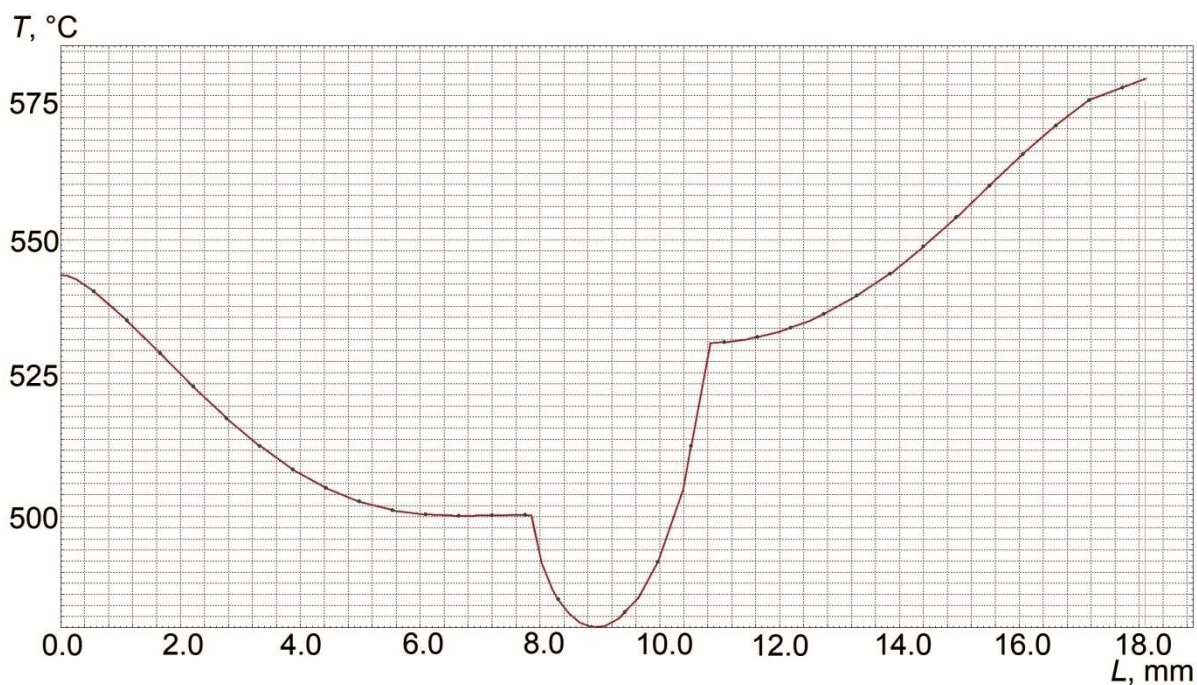
Увеличение тока индуктора до максимума  $I = 3,2$  кА способствовало снижению

длительности этапа разогрева до  $t \approx 6-8$  с (рис. 9 б). При этом температура выдержки для диска отличалась от стержней на большую величину, которая достигла 350-450 °С. Эффективность разогрева стержней оставалась невысокой, увеличение темпе-

ратуры составило около 125-150 °С. Температура выдержки дисков увеличилась с 780-820 до 1040-1140 °С. Нижнее значение указанных диапазонов соответствовало фрагментам конструкции с танталовым покрытием.



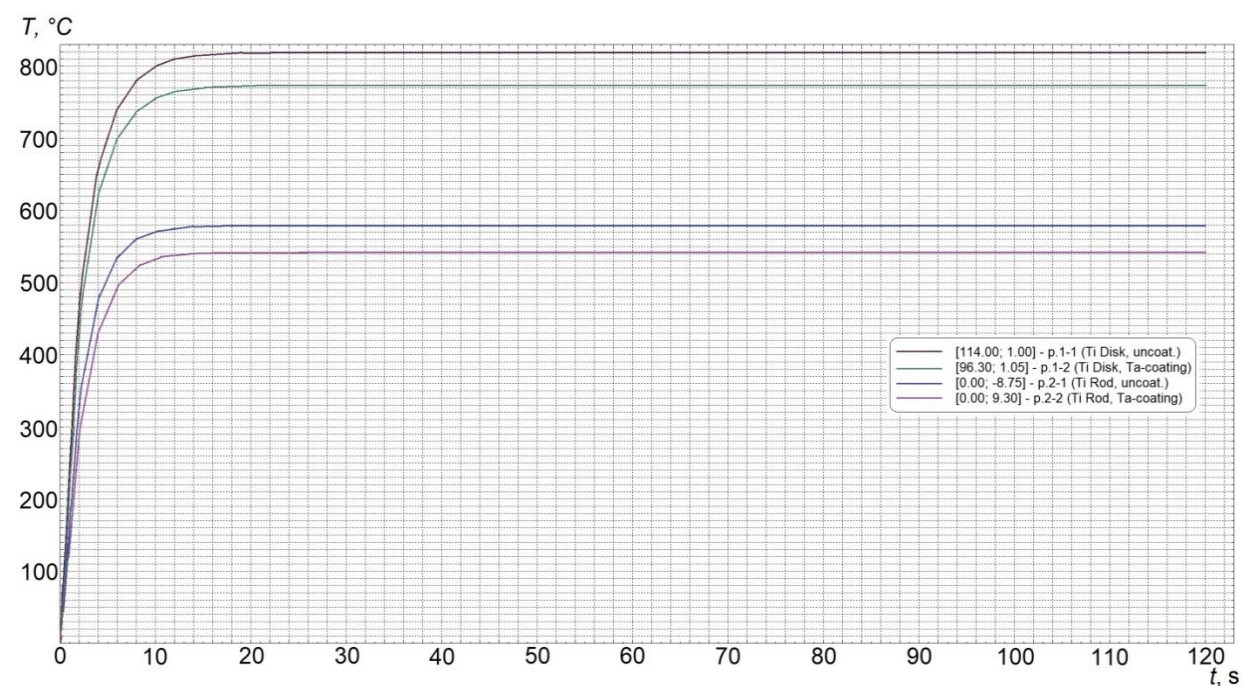
а



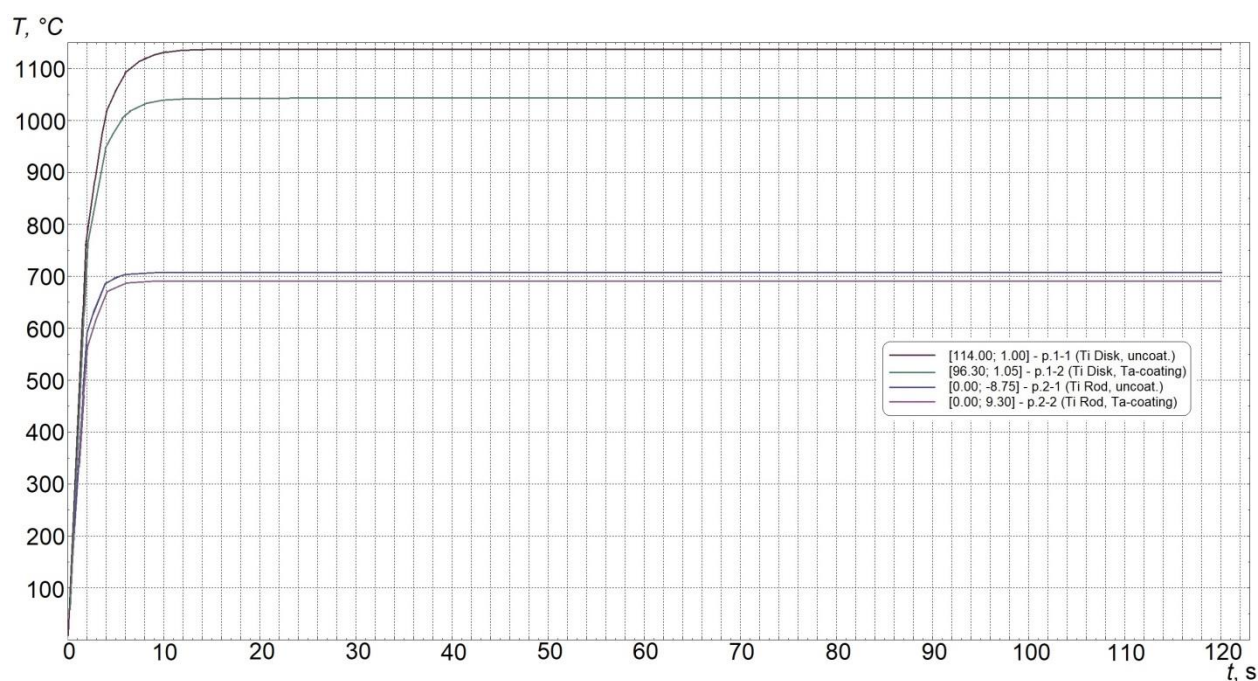
б

**Рис. 8.** Асимметричное распределение температуры  $T$  для образцов «титановые стержни – танталовое покрытие» при  $I = 2,0$  кА в момент времени  $t = 120$  с (а) с детализацией осевого распределения по сечению (б) стержней с танталовым покрытием (верхний) и без покрытия (нижний)





а



б

**Рис. 9.** Кинетика нагрева ТВЧ титановых дисков (точки р. 1-1, р. 1-2) и стержней (точки р. 2-1, р. 2-2) при минимальном  $I = 2,0$  кА (а) и максимальном  $I = 3,2$  кА (б) токах индуктора в характерных фрагментах конструкций с танталовым покрытием (точки р. 1-2, р. 2-2) и без покрытия (точки р. 1-1, р. 2-1)

### Выводы

Таким образом, в результате численного моделирования установлено, что по абсолютному значению величина мощности объемного тепловыделения в танталовом покры-

тии в 3 раза превышает данную величину в титановой основе. Анализ температурных полей в нагреваемых титановых образцах с танталовым слоем характеризуется умеренным влиянием покрытия на кинетику нагрева

различных фрагментов конструкций. Несмотря на большую величину тепловыделения в слое тантала, фрагмент конструкции с покрытием нагревался менее интенсивно, а перепад температуры между участками с покрытием и без него достигал 30-50 °С. При решении тепловой задачи обработки ТВЧ титановых образцов в воздушной атмосфере была скорректирована температура процесса выдержки за счет ввода эндотермического

функционала  $Q_L(T, I)$ . Данная величина представлена полиномом 3-го порядка температурного и токового факторов с учетом их парного взаимодействия, что обеспечило адекватность теоретических данных кинетики нагрева.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00010, <https://rscf.ru/project/25-29-00010/>.*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Lupi S., Forzan M., Aliferov A.** Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling. Springer, Cham, 2015. 370 p.
2. **Lupi S.** Fundamentals of electroheat: electrical technologies for process heating. Springer Nature, 2017. 620 p.
3. **Бабат Г.И.** Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Москва – Ленинград: Энергия, 1965. 552 с.
4. Numerical and experimental investigation of induction heating process of heavy cylinder / J. Sun, S. Li, C. Qiu, Y. Peng // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 134. P. 341-352.
5. 12.15 – Induction hardening: technology, process design, and computer modeling / V.I. Rudnev, D. Loveless / Editor(s): S. Hashmi, G.F. Batalha, C.J. Van Tyne, B. Yilbas // Comprehensive Materials Processing. Elsevier, 2014. P. 489-580.
6. A dynamic model for the simulation of induction heating devices / J. Nerg, K. Tolsa, P. Silventoinen et al. // IEEE Transactions on Magnetics. 1999. Vol. 35 (5). P. 3592-3594.
7. Investigations of parameters of induction heating of metal coatings of cylindrical steel products / A.R. Lepeshkin, M.A. Fedin, A.B. Kuvaldin et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. Vol. 88. P. 1752-1755.
8. Studying the EMF in rotating disks in the electromagnetic field of permanent magnets / A.R. Lepeshkin, A.B. Kuvaldin, Y.Y. Zakharov et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. Vol. 86. P. 1050-1053.
9. Modeling the thermal state of parts with ceramic coatings in a high-frequency electromagnetic field / A.B. Kuvaldin, A.R. Lepeshkin, O.I. Ilyinskaya et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. P. 1507-1509.
10. Optimization control of induction hardening process / Y. Ge, R. Hu, Z. Zhang, Q. Shen // 2006 International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang, Henan, 2006. P. 1126-1130.
11. Properties of ultrathin molybdenum films for interconnect applications / V. Founta, J.-P. Soulié, K. Sankaran et al. // Materials. 2022. Vol. 24. P. 101511.
12. Anodic pine cone-like WO<sub>3</sub>/MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> film with well-defined nanoflakes on Ti-6Al-7Nb implant / A.R. Rafieerad, A.R. Bushroa, B. Nasiri-Tabrizi et al. // Journal of the Australian Ceramic Society. 2018. Vol. 54. P. 129-137.
13. Superhard Ta-O-N coatings produced on titanium using induction physical vapor deposition / V. Koshuro, M. Fomina, A. Zakharevich, A. Fomin // Ceramics International. 2022. Vol. 48 (13). P. 19467-19483.
14. Патент 2806687 РФ, С1 МПК С14/24, А61L 27/06, А61 L27/50. Способ формирования танталсодержащего биосовместимого покрытия на поверхности цилиндрического титанового имплантата / В.А. Кошуро, А.В. Красников, А.А. Фомин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский госу-

дарственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». № 2023113305; заявл. 22.05.2023; опублик. 02.11.2023. Бюл. № 31. 10 с.: ил.

15. Microstructure and mechanical properties of Mo-Ta-W refractory multi-principal element alloy thin films for hard protective coatings / Y. Zhang, Z. Xu, Z. Zhang et al. // Surface and Coatings Technology. 2022. Vol. 431. P. 128005.

16. Plasma thermal performance of a dual-process PVD/PS tungsten coating on carbon-based panels for nuclear fusion application / H. Kim, H.J. Lee, S.H. Kim, C. Jang // Fusion Engineering and Design. 2016. Vol. 109-111(A). P. 590-595.

17. Fomina M.A., Koshuro V.A., Fomin A.A. Superhard Ti-Ta-O coatings produced on titanium with electrospark deposited tantalum-containing layers using induction heat treatment // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2023. Vol. 115. P. 106314.

18. Koshuro V.A., Fomina M.A., Fomin A.A. Niobium/molybdenum coatings produced on alumina using induction thermal vacuum deposition // Ceramics International. 2025. Vol. 51 (25). P. 45613-45627.

19. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. изд. Москва: Металлургия, 1989. 384 с.

**Фомина Марина Алексеевна** – научный сотрудник лаборатории «Индукционные, плазменные и лазерные технологии обработки материалов», аспирант кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Кошуро Владимир Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия», старший научный сотрудник лаборатории «Индукционные, плазменные и лазерные технологии обработки материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Фомин Александр Александрович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия», ведущий научный сотрудник лаборатории «Индукционные, плазменные и лазерные технологии обработки материалов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Marina A. Fomina** – Research Fellow at the Induction, Plasma and Laser Technologies Laboratory for Materials Processing, Postgraduate at the Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Vladimir A. Koshuro** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Senior Research Fellow at the Induction, Plasma and Laser Technologies Laboratory for Materials Processing, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Aleksander A. Fomin** – Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Leading Research Fellow at the Induction, Plasma and Laser Technologies Laboratory for Materials Processing, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 14.11.25, принята к опубликованию 26.11.25*

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 620.179.14

## РАСЧЁТ ИНДУКТИВНОСТИ КЛАСТЕРА ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А.Ю. Лавров, А.В. Паршина, С.А. Борминский

## INDUCTANCE CALCULATION OF AN EDDY CURRENT CONVERTERS CLUSTER FOR ELECTROMAGNETIC EXPRESS MONITORING OF RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES

A.Yu. Lavrov, A.V. Parshina, S.A. Borminskii

*Рассмотрен принцип выбора оптимальных геометрических параметров кластера вихретоковых преобразователей с сильной электромагнитной связью. Первичные преобразователи представляют собой индуктивные катушки с магнитопроводом, расположенные в пазах электропроводящего экрана. Предложена методика расчёта вносимой индуктивности для каждого элемента кластера на основе выбора сечения магнитного потока. Миниатюрные размеры устройства предполагают его использование в труднодоступных зонах контроля, например при проведении контроля размеров головки железнодорожного рельса.*

**Ключевые слова:** вихретоковый преобразователь, магнитный поток, индуктивность, кластер, контроль, железнодорожный рельс

### Введение

Контроль геометрических параметров изделий сложной формы является важной составляющей их технологии производства и эксплуатации. При этом возникает ряд проблем, связанных с необходимостью

*The principle for selecting optimal geometric parameters of an eddy current converters cluster with strong electromagnetic coupling is considered. The primary converters are inductive coils with the magnetic circuit located in the grooves of an electrically conductive shield. A method for calculating the introduced inductance for each cluster element, based on the selection of the magnetic flux cross the section, is proposed. Mini-dimensions of the device allow for its use in hard-to-reach areas, such as when size inspection of a railroad rail head.*

**Keywords:** eddy current converter, magnetic flux, inductance, cluster, control, railroad rail

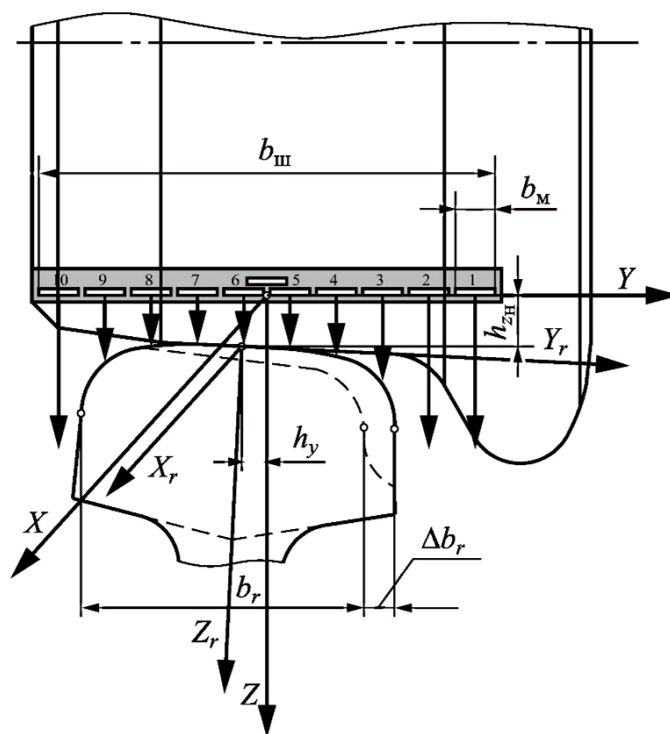
оперативного контроля изделия в рабочем, часто нагруженном состоянии в нескольких точках одновременно.

Для контроля машиностроительных изделий из проводящего материала широко используются вихретоковые методы, осно-

ванные на измерении вносимых параметров первичных преобразователей от влияния вихревых токов на поверхности контролируемого изделия (КИ) [1-4]. При контроле изделий сложной формы, таких, например, как головка железнодорожного рельса, требуется компактное размещение группы вихретоковых преобразователей (ВТП) в ограниченном пространстве зоны контроля. Несомненным преимуществом обладают миниатюрные параметрические ВТП, имеющие достаточно простую конструкцию. Для организации одновременного контроля нескольких точек изделия сложной формы реализуют объединение одиночных вихретоковых преобразователей в единый кластер [5]. Боковой износ железнодорожного рельса зачастую контролируют методом визуального осмотра или про-

ведения контрольных замеров ручным инструментом, что не позволяет оперативно оценить достижения изменения геометрических параметров рельсовой колеи критических значений [1, 6]. Оперативный экспресс-контроль состояния рельсовой колеи позволяет своевременно планировать организацию работ по поддержанию пути в рабочем состоянии и повысить скорость перевозок при сохранении высокого уровня безопасности.

На рис. 1 представлена структурная схема расположения кластера вихретоковых преобразователей, установленных на тележке колесной пары подвижного состава для реализации оперативного бесконтактного метода электромагнитного контроля геометрии головки железнодорожного рельса.



**Рис. 1.** Расположение кластера ВТП и головки железнодорожного рельса

Все вихретоковые преобразователи, входящие в кластер, имеют одинаковое значение начальной индуктивности  $L_n$ . Вихревые токи, наводимые на поверхности головки рельса, изменяют величину индуктивности рабочих ВТП в зависимости от геометрии головки железнодорожного рельса. Метод оперативного электромаг-

нитного контроля состояния объектов железнодорожной инфраструктуры позволяет на основании данных о геометрии рельсовой колеи судить о безопасности движения железнодорожного транспорта.

В случае наличия внешних электромагнитных полей в ограниченной зоне контроля ВТП следует экранировать, что нала-



гает ограничения на конструкцию преобразователя. Экранирование существенно ухудшает характеристики компланарных ВТП, с плоскостью витка параллельного поверхности объекта контроля. Решение подобной задачи возможно с использованием ортогональных ВТП (ОВТП), плоскость витка которых перпендикулярна поверхности объекта контроля [7]. Однако такое расположение ВТП, объединённых в единый кластер, индуцирующий единое магнитное поле в зоне контроля, вызывает проблему оценки как начальной, так и вносимой индуктивности каждого элемента кластера. С применением ортогональных ВТП задача существенно упрощается.

### Расчётная токовая модель

Существующие методы расчёта базируются на уравнениях Максвелла классической электродинамики, которые имеют аналитическое решение для небольшого круга практических задач [2], где распределение электромагнитного поля имеет симметричный характер. Современная вычислительная техника и пакеты специализированного программного обеспечения класса ANSYS существенно расширяют круг решаемых задач за счёт широкого использования численных методов расчёта, в частности, метода конечных элементов (МКЭ) [8, 9]. Зона контроля разбивается сеткой конечных элементов, для которых определяются параметры электромагнитного поля. При этом возникает противоречие: точность решения требует значительного количества элементов сетки разбиения, что приводит к высоким вычислительным затратам и снижению скорости вычисления. Кластер ортогональных ВТП представляет собой линейную матрицу, создающую на поверхности объекта контроля единое русло вихревых токов, определяющих вносимые параметры элементов кластера [10]. Размещение преобразователей в плоскости экрана определяет их сильное взаимное влияние.

Для расчёта электромагнитного поля, имеющего сложный трёхмерный характер в зоне контроля, удобно представить систему кластер ВТП-КИ в виде дискретных

токовых шин, образуемых токовыми элементами (ТЭ) конечной длины (рис. 2). Рациональный выбор конечноэлементной модели позволяет снизить математические трудности, связанные с получением функциональных связей между влияющими факторами и параметрами первичных преобразователей.

Измерительная система координат связана с кластером ВТП так, что ТЭ, образующие её, располагаются в плоскости  $XU$ . Ось  $X$  перпендикулярна направлению тока ТЭ, а ось  $Z$  – дополняет систему координат до правой.

Дискретную токовую шину представим в виде совокупности линейных токовых элементов (ТЭ) размером  $b_m$ , расположенных в плоскости  $XU$ . По направлению  $X$  задаётся длина  $l$  конструктивных элементов:  $l_k$  – длина катушки ОВТП;  $l_m$  – длина магнитопровода;  $\Delta l_k$  – расстояние между ТЭ;  $l_e$  – длина русла вихревых токов на поверхности объекта контроля. По направлению  $U$  задаётся ширина  $b$  конструктивных элементов:  $b_{ш}$  – ширина токовой шины, создающей возбуждающее электромагнитное поле;  $b_m$  – ширина одиночного токового элемента кластера ВТП;  $b_e$  – ширина ТЭ русла вихревых токов.

Геометрические параметры ортогонального ВТП таковы, что линейные размеры преобразователя в плоскости  $XU$  значительно больше его толщины ( $l_m > b_m \gg d_m$ ). Преобразователь расположен на экране, выполненном из проводящего материала, в котором индуцируется электродвижущая сила в результате воздействия переменного магнитного поля тока преобразователя. При этом вихревые токи, индуцируемые в экранирующем корпусе, образуют вторичное магнитное поле, которое компенсирует возбуждающее поле [5, 11]. Таким образом, токовые элементы, обращённые в сторону поверхности контролируемой головки рельса, создают однопольное возбуждающее поле. Магнитное поле будет сосредоточено внутри пространства, ограниченного зоной расположения кластера преобразователей и контролируемым объектом.

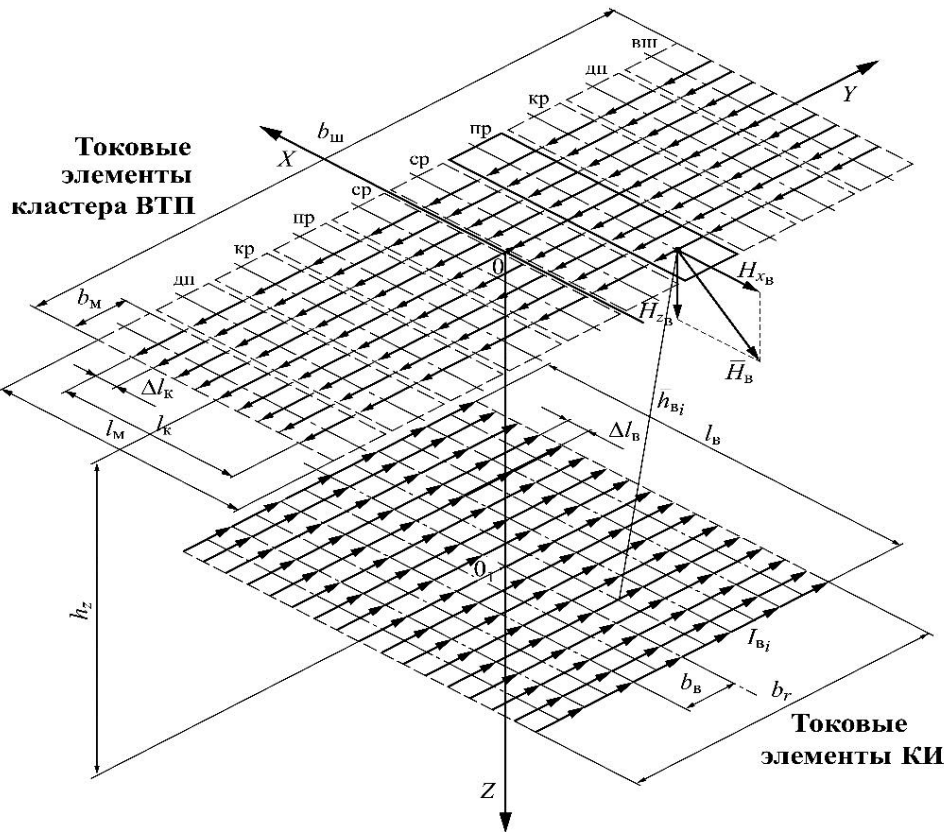


Рис. 2. Расчётная модель дискретной токовой шины

При уменьшении рабочего зазора до нуля (кластер ВТП находится на поверхности КИ,  $h_z = 0$ ) имеет место полная компенсация. Такое взаимное расположение кластера ВТП и поверхности КИ позволяет в расчёте учитывать только часть токовых катушек ортогональных ВТП, обращённую к поверхности КИ.

Конструктивная компоновка кластера ВТП определяет магнитные потоки  $\Phi_{nn}$  преобразователей, определяющие их начальную индуктивность  $L_n$ . Отметим, что при описании поля рассматриваются только вихревые токи, наводимые на контролируемую поверхность железнодорожного рельса  $I_g$  и токи  $I_k$  токовых элементов дискретной токовой шины. Отметим, что электромагнитное поле в контролируемой зоне между рассматриваемым объектом сложной формы и кластером преобразователей будем считать отвечающим случаю квазистационарного поля, поскольку в рассматриваемом диапазоне частот отношение  $D_\lambda$  к  $\lambda$  будет много больше 0,01, излучением поля в пространство можно пренебречь.

### Функции пространственного распределения

Функция пространственного распределения вектора  $\vec{B}$  магнитной индукции описывается уравнением Био-Савара – Лапласа, которое в дифференциальной форме имеет вид

$$d\vec{B} = \mu_0 \mu_r d\vec{H} = \mu_0 \mu_r \frac{I_k}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{b}_m \times \vec{h}^0}{|\vec{h}|^2}, \quad (1)$$

где  $I_k$  – ток проводника, возбуждающего магнитное поле;  $d\vec{b}_m$  – элемент проводника;  $\vec{h}$  – радиус-вектор, проведённый в направлении от ТЭ  $I_k d\vec{b}_m$  к точке пространства, в которой определяется значение  $d\vec{B}$ ;  $\vec{h}^0$  – единичный радиус-вектор в направлении  $\vec{h}$ . Учитывая, что основное пространство рабочего зазора системы кластер ВТП-КИ занимает воздушная среда, для расчёта магнитного поля ограничимся вычислением его напряжённости  $\vec{H}$ .

Собранные в единую измерительную группу (кластер) ортогональные вихретоковые преобразователи (см. рис. 1) будут рассматриваться как дискретная токовая шина шириной  $b_{ш}$ , включающей  $n_x$  преобразователей, размещенных вдоль оси  $Y$  декартовой системы координат.

Чтобы получить выражение, описывающее напряженность магнитного поля в точке на расстоянии  $h_z$  до контролируемого объекта, проинтегрируем (1)

$$\vec{H} = \frac{I_k}{4\pi h_z} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (2)$$

здесь  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, которые образуются при основании треугольника, если провести радиус-векторы из концов токового элемента кластера ВТП к точке, в которой оценивается  $\vec{H}$ . Таким образом, становится возможной оценка магнитного поля одиночного проводника.

$$H_x = -\frac{(z_i - z_k)I_k}{4\pi [(x_i - x_k)^2 + (z_i - z_k)^2]} \times \frac{(y_i - y_k)}{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - x_k)^2}};$$

$$H_z = -\frac{(x_i - x_k)I_k}{4\pi [(x_i - x_k)^2 + (z_i - z_k)^2]} \times \frac{(y_i - y_k)}{\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - x_k)^2}},$$

где  $(x, y, z)_i$  – координаты точки рабочего пространства кластера ВТП, в которой определяются составляющие напряженности магнитного поля, создаваемые ТЭ, имеющим координаты  $(x, y, z)_k$ . Результирующее поле дискретной токовой шины определяется на основании принципа суперпозиции:

$$H_x = \sum_{k=1}^N H_{xk}, \quad H_z = \sum_{k=1}^N H_{zk},$$

где  $N = n_x \times n_y$  – количество ТЭ в шине.

Кривые на рис. 3 иллюстрируют зависимости  $H_x(h_z)$  для двух случаев: для одного токового элемента (рис. 3 а) и для нескольких токовых элементов при различных вариантах  $b_{ш}$ .

Данные графики показывают, что напряженность поля одиночного ТЭ резко убывает с увеличением зазора  $h_z$  и при

Поскольку токовые элементы кластера ВТП смещены относительно начальной системы координат, (2) будет иметь вид

$$\vec{H} = \sum_1^{n_x} \frac{I_k}{4\pi h_z} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \cos \beta, \quad (3)$$

здесь  $\beta$  – угол, образующийся между нормалью, идущей из рассматриваемой точки поля к токовому элементу, и осью  $Z$ . Уравнение (3) позволяет вычислить магнитное поле, создаваемое ТЭ токовой шины в рабочем пространстве кластера ВТП при вариации геометрических параметров токовой шины.

В случае ТЭ в виде линейного проводника длиной  $b_m$  нормальная и тангенциальная составляющие напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  могут быть рассчитаны на основании уравнения Био-Савара – Лапласа:

$h_z < 2,5$  мм слабо зависит от изменения ширины токовой шины. При увеличении ширины дискретной токовой шины,  $b_{ш} \gg \Delta h_z$ , характеристики оказываются очень близкими к характеристикам ТЭ с  $b_{ш} \rightarrow \infty$ . Напряженность  $\vec{H}$  магнитного поля определяется ближайшим к точке контроля участком проводника. Увеличение количества  $n_x$  ТЭ позволяет увеличить  $\vec{H}$  в диапазоне изменения зазоров  $h_z$ . Увеличение  $l_k$  ведет к тому, что функция  $H_x(h_z)$  становится более пологой, что позволяет получить высокие значения эквивалентного диаметра  $D_e$  русла вихревых токов. Характер изменения функции  $H_x(h_z)$  позволяет рассматривать единое возбуждающее магнитное поле, наводящее вихревой ток на поверхности КИ [5].

Для оценки влияния  $D_e$  обозначим напряженность поля при начальном зазоре  $H_{xm}$ , тогда магнитный поток бесконечно

длинного проводника определяется напряжённостью  $\vec{H}$  магнитного поля:

$$H_x = H_{xm} \cdot \exp\left(-\frac{3h_z}{D_9}\right).$$

Выражая эквивалентный диаметр русла вихревых токов  $D_9$ , получим

$$D_9 = \frac{3h_z}{\ln H_{xm} - \ln H_x}.$$

Кластер ВТП образован ортогональными преобразователями с независимым возбуждением, что позволяет выбрать схемно-конструктивную компоновку, обеспечивающую оптимальный диаметр  $D_9$  русла вихревых токов на поверхности КИ.

Графики изменения  $D_9(h_z)$ , позволяют оценить влияние параметров  $l_K$  и  $b_{ш}$  шины на ослабление магнитного поля при изменении  $h_z$  [5]. В принятой расчётной модели (рис. 2) электромагнитное поле создаётся дискретной токовой шиной с количеством токовых элементов  $(n_x \times n_y)$ .

На рис. 4 показаны результаты расчёта  $D_9$  для одиночного ТЭ и токовой шины при различных значениях  $b_{ш}$ . Значение эквивалентного диаметра  $D_9$  русла вихревых токов напрямую зависит от рабочего зазора  $h_z$ . Поскольку напряжённость  $H_x$  определяется ближайшими к точке контроля  $(x, y, z)_i$  токовыми элементами проводника, в рассмотренном диапазоне  $h_z$  параметр  $D_9$  остаётся меньше  $D_{9 \min}$ .

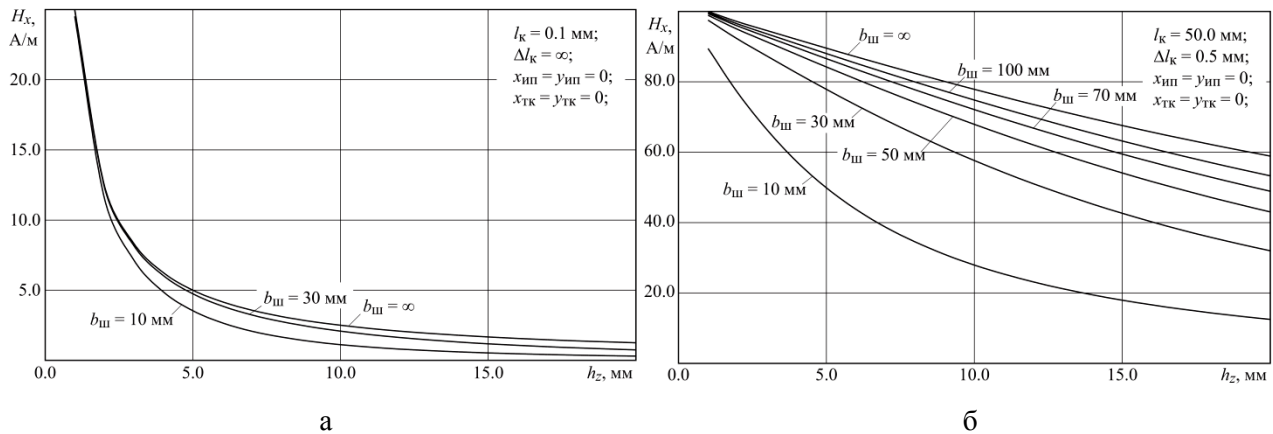


Рис. 3. Изменение напряженности магнитного поля кластера ВТП при вариации  $b_{ш}$

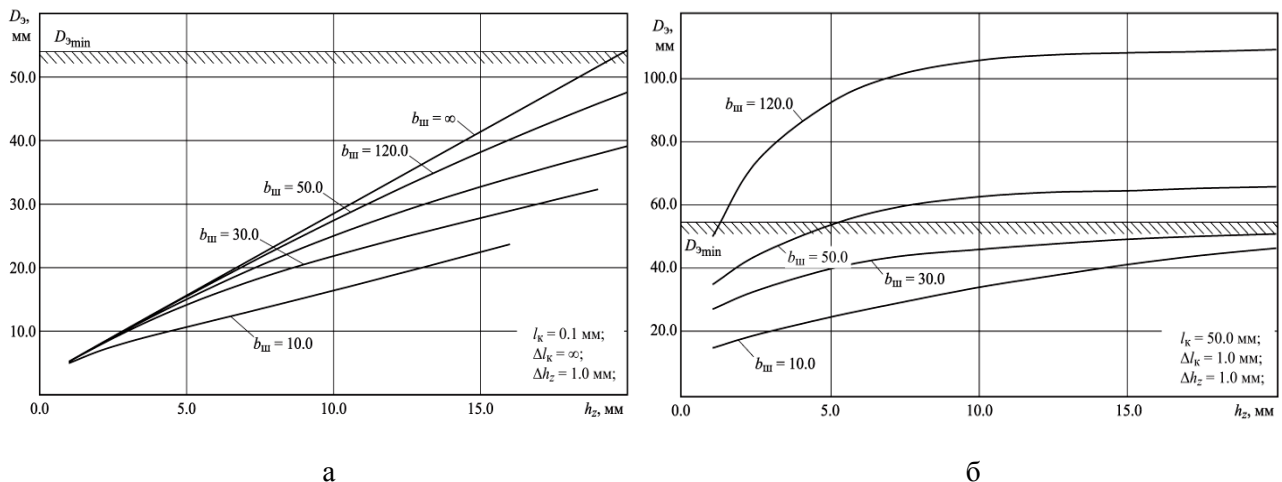


Рис. 4. Изменение эквивалентного диаметра  $D_9$  русла вихревых токов при вариации ширины  $b_{ш}$  токовой шины

Повышение количества токовых элементов дискретной шины приводит к увеличению эквивалентного диаметра  $D_э$ . Из графика на рис. 3 б видно, что для обеспечения эквивалентного диаметра  $D_э$  более  $D_{э\min}$  необходим параметр  $b_{ш\min} = l_{к\min}$  более 50 мм. Общий анализ графиков зависимости  $D_э$  от  $h_z$  показывает значительное влияние длины  $l_k$  токовой шины на величину  $D_э$ .

### Расчёт результирующей индуктивности

Согласно методике контроля состояния изделий сложной формы параметры контролируемого объекта оказывают влияние на результирующую индуктивности группы используемых вихретоковых преобразователей  $L_p$ . При этом необходимо определить начальную индуктивность используемого кластера преобразователей с учётом изменения сечений  $S_m$  магнитных потоков возбуждающего поля. Представим магнитное поле как совокупность элементарных трубок магнитного потока, создаваемых каждым токовым элементом:

$$\begin{aligned} \Phi_{TЭ} &= \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} \Phi_{t_z, t_y} = \\ &= \mu_0 \mu_r \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} H_{xt_z, t_y} \Delta S_m, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Phi_t = \mu_0 \mu_r H_{xt} \Delta S_m$  – магнитный поток  $t_{z,y}$ -й элементарной трубки. Размеры единичного ВТП кластера  $l_m > b_m \gg d_m$ .

Выражение (4) позволяет определить магнитный поток, создаваемый одиночным токовым элементом. В плоскости XY общее количество токовых элементов в кластере  $n_x \times n_y$ . Для учёта взаимного влияния токовых элементов друг на друга применим принцип суперпозиций, в результате чего магнитный поток  $i$ -го токового элемента будет представлен в виде суммы:

$$\Phi_{TЭ_i} = \Phi_{c_i} + \sum_{j=1}^{(n_x-1)n_y} \Phi_{m_{ij}} \quad (5)$$

магнитного потока  $\Phi_{c_i}$ , создаваемого  $i$ -м токовым элементом и магнитных потоков

$$\sum_{j=1}^{(n_x-1)n_y} \Phi_{m_{ij}}, \text{ создаваемых } j\text{-ми ТЭ, и охва-}$$

тывающих  $i$ -й токовый элемент [5].

Вдоль оси Y электромагнитное поле, создаваемое ТЭ, конструктивно не ограничено, что требует определения ширины  $b_s$  магнитного потока с учётом взаимодействия ТЭ дискретной шины. Согласно методу зеркальных изображений, в котором проводящая среда мысленно заменяется проводником с током  $I_k = -I'_k$ , представляющим собой зеркальное отражение исходного проводника, токовый элемент с током  $I'_k = -I_k$ , расположенный на удалении  $h_z$  от исходного токового элемента, создаёт электромагнитное поле с напряжённостью  $H'_x$ . Поле проводника с током  $I'_k$  симметрично полю исходного проводника. При этом для линии, образованной точками  $h_{zp} = h_z / 2$ , равноудалёнными от проводников, выполняется условие:  $H_x = H'_x$ .

Симметрия функций распределения напряжённостей  $H_x, H'_x$  в рабочем пространстве позволяет рассматривать электромагнитное взаимодействие соседних токовых элементов как взаимное отражение электромагнитных полей. При этом поверхность, удовлетворяющая условию  $H_x = H'_x$ , рассматривается как граница сечений магнитных потоков соседних токовых элементов. С учётом суммирования трубок магнитного потока для  $i$ -го ТЭ выражение (5) можно представить как

$$\begin{aligned} \Phi_{TЭ_i} &= \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} \Phi_{c_{it_z, t_y}} + \\ &+ \sum_{j=1}^{(n_x-1)n_y} \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} \Phi_{m_{ij} t_z, t_y}, \end{aligned}$$

где  $\Phi_{c_{it_z, t_y}}$  – магнитный поток  $t_{z,y}$ -й элементарной трубки, создаваемый  $i$ -м ТЭ,  $\Phi_{m_{ij} t_z, t_y}$  – магнитный поток  $j$ -го ТЭ, охва-

тывающий  $i$ -й ТЭ,  $t_{z0} = m_{zi} - m_{zij}$  – порядковый номер трубки магнитного потока  $j$ -го

ТЭ, начиная с которой  $\Phi_{m_i j t_z, t_y}$  охватывает  $i$ -й ТЭ. Каждый преобразователь дискретной токовой шины включает  $n_x$  ТЭ, поэтому

$$\Phi_{nn} = \sum_{i=1}^{n_x} \left( \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} \Phi_{c i t_z, t_y} + \sum_{j=1}^{(n_x-1)n_y} \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} \Phi_{m_i j t_z, t_y} \right), \quad i \neq j.$$

Таким образом, начальная индуктивность кластера вихретоковых преобразователей определяется как

$$L_n = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} \left( \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} \Phi_{c i t_z, t_y} + \sum_{j=1}^{(n_x-1)n_y} \sum_{t_z=1}^{m_z} \sum_{t_y=1}^{m_y} \Phi_{m_i j t_z, t_y} \right)}{I_k}.$$

### Выводы

Рассмотрена методика определения начальной и результирующей индуктивностей ортогональных вихретоковых преобразователей, включенных в единый измерительный кластер. Система взаимодействия кластера вихретоковых преобразователей с контролируемым объектом сложной формы для расчета электромагнитного поля моделируется с помощью дискретной токовой шины, образуемой токовыми элементами конечной длины. Рассмотренный

метод оценки параметров вихретоковых преобразователей упрощает расчет функций пространственного распределения магнитного поля кластера при наличии индуктивных связей между его элементами. Метод электромагнитного контроля состояния объектов железнодорожной инфраструктуры, основанный на описанной методике расчета индуктивности, позволяет производить оперативный мониторинг параметров в условиях ограниченного доступа и воздействия мешающих факторов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. RU2236971C2. Устройство для измерения износа боковой поверхности головки железнодорожного рельса / Б.В. Турбов, О.Ю. Дегтярев, Д.Э. Дрындрожик. Опубл. 27.09.2004.
2. **Бинс К., Лауренсон П.** Анализ и расчёт электрических и магнитных полей. Москва: Энергия, 1970. 375 с.
3. **Malcolm K. Lim, Honggang Cao.** Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. Construction and Building Materials, ISSN. 2003:0950-618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2011.01.011.
4. Giant Magnetoresistance Sensors: A Review on Structures and Non-Destructive Eddy Current Testing Applications / D. Rifai, A. Abdalla; K. Ali, R. Razali // Sensors 2016. 16, 298. DOI: 10.3390/s16030298.
5. **Меркулов А.И., Лавров А.Ю., Бурков Д.С.** Особенности компьютерного моделирования характеристик кластера электромагнитных преобразователей // Вестник СГАУ. 2014. № 2 (44). С. 98-103.
6. **Каргапольцев С.К., Батбаатар Д.** Статистический анализ бокового износа рельсов по результатам мониторинга пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 147-151.
7. **Меркулов А.И.** О подобии конструкций параметрических накладных электромагнитных преобразователей // Приборы и системы управления. 1992. № 8. С. 20-23.

8. Шубочкин А.Е., Мартьянов Е.В. Модернизация вихретоковых средств неразрушающего контроля трубного и сортового металлопроката // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. № 12. С. 42-45.

9. Assous F., Ciarlet C. (Jr.), Labrunie S. Theoretical tools to solve the axisymmetric Maxwell equations // Math. Meth. Appl. Sci. 2002. 25. P. 49-78.

10. Лавров А.Ю., Меркулов А.И. Линейный матричный электромагнитный преобразователь перемещений с односторонним доступом к объекту контроля // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. № 3. С. 823-830.

11. Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 120 с.

**Лавров Андрей Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

**Паршина Александра Валерьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

**Борминский Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

**Andrey Yu. Lavrov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

**Aleksandra V. Parshina** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

**Sergei A. Borminskii** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

*Статья поступила в редакцию 27.10.25, принята к опубликованию 26.11.25*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ КОМБИНИРОВАННОГО И ДВУХКАНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ АДФР В РЕЖИМЕ УДЕРЖАНИЯ

Г.М. Рязанов, А.И. Билалова, Д.Г. Мурзаков

## COMPARATIVE ANALYSIS OF COMBINED AND DUAL-CHANNEL CONTROL SCHEMES FOR A WRIM IN THE HOLDING MODE

G.M. Rjazapov, A.I. Bilalova, D.G. Murzakov

Исследуется режим электромеханического удержания для асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) в схеме комбинированного управления, при которой обмотки статора и ротора включены последовательно. Разработана и представлена в координатах  $x$ - $y$  математическая модель для анализа данного режима. Показано, что ключевым недостатком схемы является сниженный по сравнению с двухканальным управлением момент удержания. В качестве решения предложено включение батареи конденсаторов в силовую цепь для компенсации реактивного сопротивления и увеличения тока. Для модифицированной схемы разработана уточненная математическая модель и структурная схема. Результаты математического моделирования подтверждают, что увеличение емкости конденсаторов приводит к значительному росту синхронизирующего момента (удержания). Однако установлен компромиссный характер решения: рост момента сопровождается увеличением колебательности электромагнитных процессов в системе.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, режим удержания, обмотки, координаты  $x$ ,  $y$ , момент синхронизации

This paper investigates the electromechanical holding mode of a wound-rotor induction motor (WRIM) in a combined control scheme with a series-connected stator and rotor windings. A mathematical model in the  $x$ - $y$  coordinates is developed and presented for analyzing this operating mode. The study identifies the scheme's key drawback: a reduced holding torque compared to a dual-channel control system. To mitigate this, the paper proposes integrating a capacitor bank into the power circuit to compensate for reactive impedance and increase the current flow. A refined mathematical model and a structural diagram are developed for the given modified circuit. The simulation results confirm that increasing the capacitance effect allows the capacitor to significantly enhance the synchronization (holding) torque. However, a key trade-off is established: the torque increase is accompanied by a rise in the torque oscillations and system dynamic response fluctuations.

Keywords: induction motor, holding mode, windings,  $x$ ,  $y$ , coordinates, synchronization moment



## Введение

Развитие тяжелого машиностроения, включая горно-шахтное, подъемно-транспортное и металлургическое, является одним из приоритетов стратегии обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и далее [1]. Ключевыми задачами в этой области являются обеспечение стабильного роста производства и расширение экспортного потенциала, что требует внедрения современных и эффективных технических решений.

В тяжелом машиностроении широко применяются асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР). Однако традиционные системы, не использующие режим электромеханического удержания, часто приводят к необходимости механического торможения. Резкое торможение и последующий пуск сопряжены с значительными динамическими нагрузками и большими ускорениями, что создает риски для сохранности груза и оборудования.

Решить эту проблему электрическим путем можно двумя основными способами. Первый – создание сложной следящей системы с датчиком положения, что существенно удорожает и усложняет систему управления. Второй, более функциональный подход предполагает использование асинхронных машин с фазным ротором с подачей питания одновременно на статор и ротор, что реализует режим удержания.

Питание на обмотки может подаваться по схеме двухканального управления, которая уже апробирована, но имеет существенный недостаток – большое количество силовых ключей, что снижает надежность и увеличивает стоимость. Альтернативой является комбинированное управление, при котором обмотки статора и ротора включаются последовательно. Данная схема позволяет сократить количество полупроводниковых ключей, однако ее основной недостаток – сниженный по сравнению с двухканальным управлением момент удержания, поскольку суммарное напряжение распределяется между статором и ротором.

Таким образом, актуальной задачей является поиск способа увеличения момента

удержания в схеме комбинированного управления без усложнения силовой части. В данной статье предлагается и исследуется решение этой проблемы путем включения конденсаторов в цепь питания двигателя.

## Применяемые методы

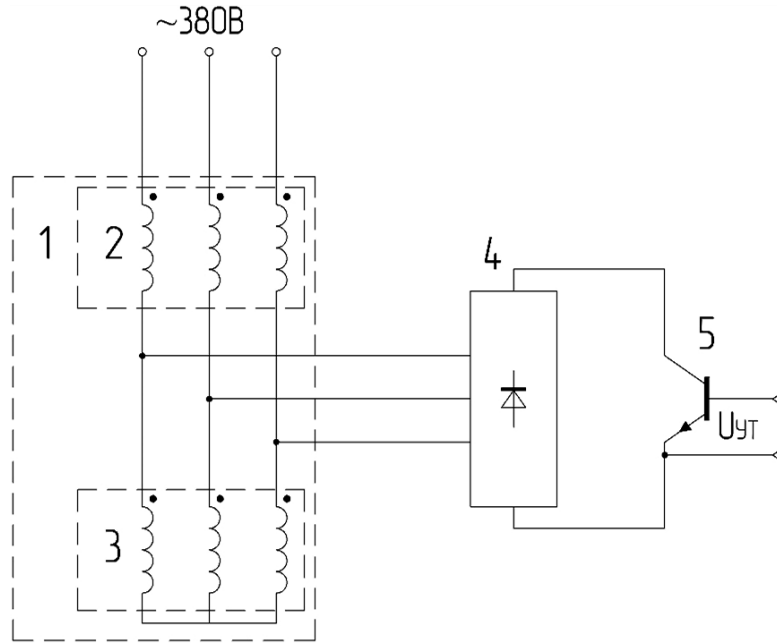
Рассматривается управление АДФР. В этом случае обмотки статора включаются последовательно с обмотками ротора. Точки соединения обмоток подключены к входам трёхфазного выпрямителя, полярные входы которого подключены к полупроводниковому ключу, работающему в ШИМ режиме (рис. 1).

В работе [2] описывались характеристики комбинированного управления АДФР. Для построения системы управления необходимо создать математическую модель двигателя при таком включении АДФР. Одним из важнейших преимуществ комбинированного управления является режим удержания, который использует обобщенные векторы и системы координат, вращающиеся с угловой скоростью  $\omega_s$ . Можно составить систему уравнений, описывающую асинхронный двигатель [3-6]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_s &= \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + \bar{I}_s R_s + j\omega_s \bar{\Psi}_s & (1.1) \\ \bar{U}_r &= \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \bar{I}_r R_r + j\omega_r \bar{\Psi}_r & (1.2) \\ \bar{\Psi}_s &= L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r & (1.3) \\ \bar{\Psi}_r &= L_r \bar{I}_r + L_m \bar{I}_s & (1.4) \\ M_{\text{ос}} &= \frac{3}{2} L_m [\bar{\Psi}_s \cdot \bar{I}_s] & (1.5) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\bar{U}_s, \bar{U}_r$  – векторы напряжений обмоток статора и ротора;  $\bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$  – векторы потокоцеплений статора и ротора;  $\bar{I}_s, \bar{I}_r$  – векторы токов обмоток статора и ротора;  $R_s, R_r$  – сопротивления обмоток статора и ротора;  $\omega_s, \omega_r$  – угловая скорость статора и ротора;  $L_s, L_r$  – индуктивность статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $M_{\text{ос}}$  – момент двигателя.

При  $U_{\text{ynp}} = 0$  ключ разомкнут (рис. 1), поэтому  $\bar{U}_{\text{num}} = \bar{U}_s + \bar{U}_r$ ,  $\bar{I}_s = \bar{I}_r = \bar{I}$  и  $\omega_r = 0$ .



**Рис. 1.** Схема включения АДФР в режиме комбинированного управления, где 1 – АДФР; 2 – обмотки статора; 3 – обмотки ротора; 4 – трехфазный выпрямительный мост; 5 – транзисторный (полупроводниковый) ключ

С учетом этого систему уравнений (1) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Psi}_s &= (L_s + L_m) \bar{I} = L_{s\Sigma} \bar{I} \\ \bar{\Psi}_r &= (L_r + L_m) \bar{I} = L_{r\Sigma} \bar{I} \\ \bar{U}_s &= \bar{I} \cdot R_s \left( 1 + \frac{L_{s\Sigma}}{R_s} p \right) + j\omega_s \bar{I} L_{s\Sigma} \\ \bar{U}_r &= \bar{I} \cdot R_r \left( 1 + \frac{L_{r\Sigma}}{R_r} p \right) \\ M_{\partial\theta} &= \frac{3}{2} L_m [\bar{\Psi}_s \cdot \bar{I}] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $L_{s\Sigma}, L_{r\Sigma}$  – сумма индуктивностей (суммарная индуктивность) статора и ротора.

От векторной формы записи перейдем в координаты  $x, y$ :

$$\left. \begin{aligned} U_{sx} &= I_x \cdot R_s (1 + T_s p) - \omega_s L_{s\Sigma} \cdot I_y & (3.1) \\ U_{sy} &= I_y \cdot R_s (1 + T_s p) + \omega_s L_{s\Sigma} \cdot I_x & (3.2) \\ U_{rx} &= I_x \cdot R_r (1 + T_r p) & (3.3) \\ U_{ry} &= I_y \cdot R_r (1 + T_r p) & (3.4) \\ M_{\partial\theta} &= \frac{3}{2} Z_p L_m [I_{sy} \cdot I_{rx} - I_{sx} \cdot I_{ry}] = & (3.5) \\ &= \frac{3}{2} Z_p L_m [I_y \cdot I_x - I_x \cdot I_y] = 0 \end{aligned} \right\}, (3)$$

где  $U_{sx}$  – напряжение статора в проекции  $x$ ;  $U_{sy}$  – напряжение статора в проекции  $y$ ;  $U_{rx}$  – напряжение ротора в проекции  $x$ ;  $U_{ry}$  – напряжение ротора в проекции  $y$ ;  $I_x, I_y$  – ток в проекции  $x$  и  $y$ ;  $T_s, T_r$  – постоянная времени статора и ротора;  $Z_p$  – число пар полюсов;  $I_{sy}$  – ток статора в проекции  $y$ ;  $I_{rx}$  – ток ротора в проекции  $x$ ;  $I_{sx}$  – ток статора в проекции  $x$ ;  $I_{ry}$  – ток ротора в проекции  $y$ .

Из формулы (3.5) видно, что в этом режиме  $M_{\partial\theta} = 0$ , режим удержания создается при внешнем моменте  $M_c$  аналогично работе дифференциального сельсина [7]

$$M_{y\partial} = M_{\max} \cdot \sin Q, \quad (4)$$

где  $M_{y\partial}$  – момент удержания;  $M_{\max}$  – максимальное значение момента;  $Q$  – угол сдвига фаз между токами статора и ротора (угол отклонения от состояния при  $M_c = 0$ ).

С учётом этого структурная схема АДФР в режиме удержания принимает вид рис. 2.

На рисунке приняты обозначения:

$$T_\Sigma = \frac{L_s + L_r}{R_s + R_r}; R_\Sigma = R_s + R_r.$$

На рис. 3 приведены переходные процессы в режиме удержания.

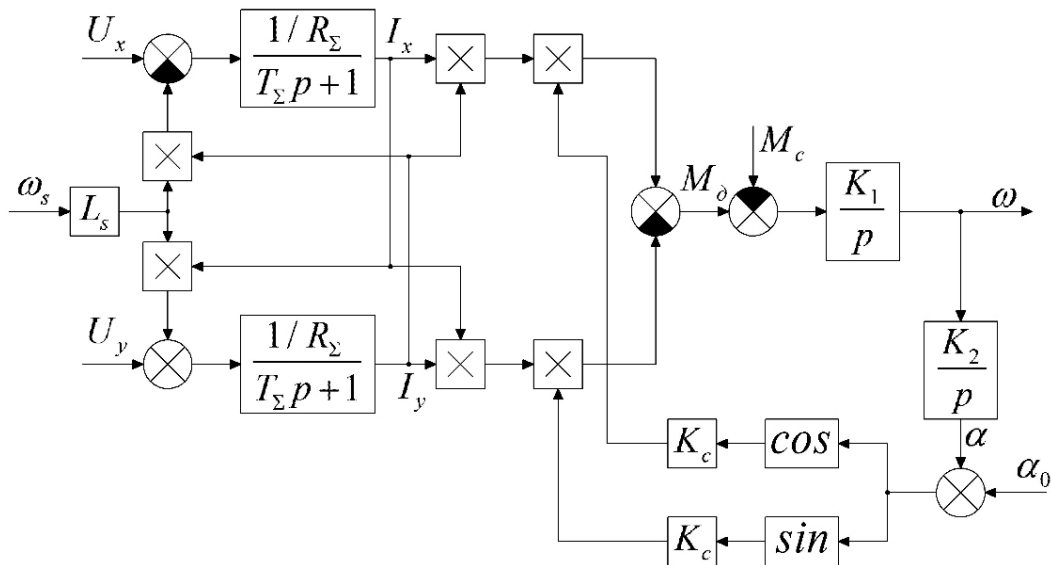


Рис. 2. Структурная схема АДФР в режиме удержания

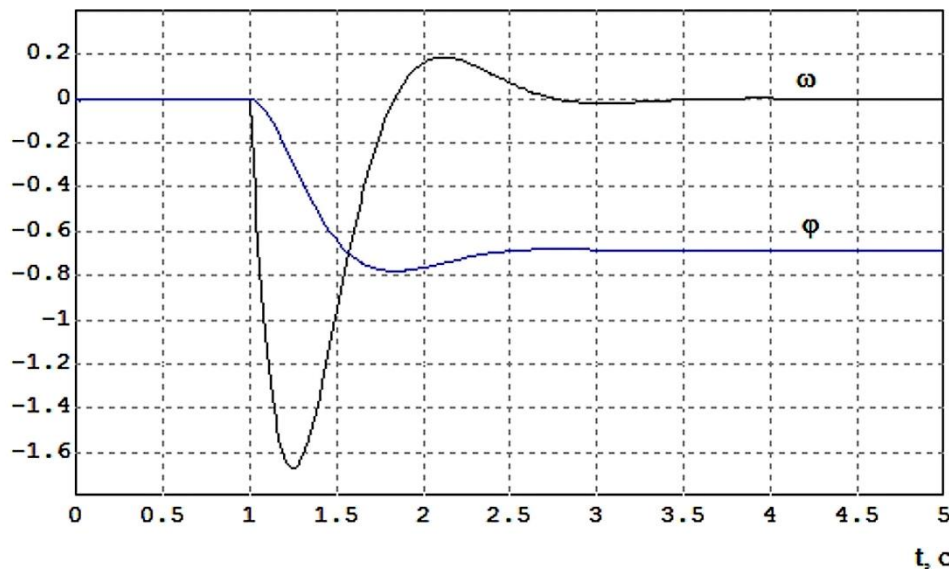


Рис. 3. Переходный процесс по углу и скорости в режиме удержания

На рис. 4 показан фазовый портрет в режиме удержания для рассматриваемого случая. По сравнению с двухканальным управлением [8, 9] рассматриваемая схема развивает меньший момент удержания. Это связано с тем, что при комбинированном управлении  $U_s \approx 0,5 U_{ном}$  и  $U_R \approx 0,5 U_{ном}$ .

#### Увеличение момента синхронизации

Для устранения этого недостатка

предлагается включить ёмкости в последовательные цепи статор – ротор (рис. 5) [10].

Это позволит увеличить токи в фазных цепях. В этом случае

$$\bar{U}_{num} = \bar{U}_s + \bar{U}_r + \bar{U}_C \quad (5)$$

где  $\bar{U}_{num}$  – вектор напряжения сети;  $\bar{U}_C$  – вектор напряжения конденсатора.

Переход от векторной формы записи в координаты  $x, y$  даёт

$$U_{sx} = I_x \cdot R_s (1 + T_s p) - \omega_s L_{s\Sigma} I_y - p U_{sy} + X_C I_y \quad (6)$$

$$U_{sy} = I_y \cdot R_s (1 + T_s p) + \omega_s L_{s\Sigma} I_x + p U_{sx} - X_C I_x \quad (7)$$

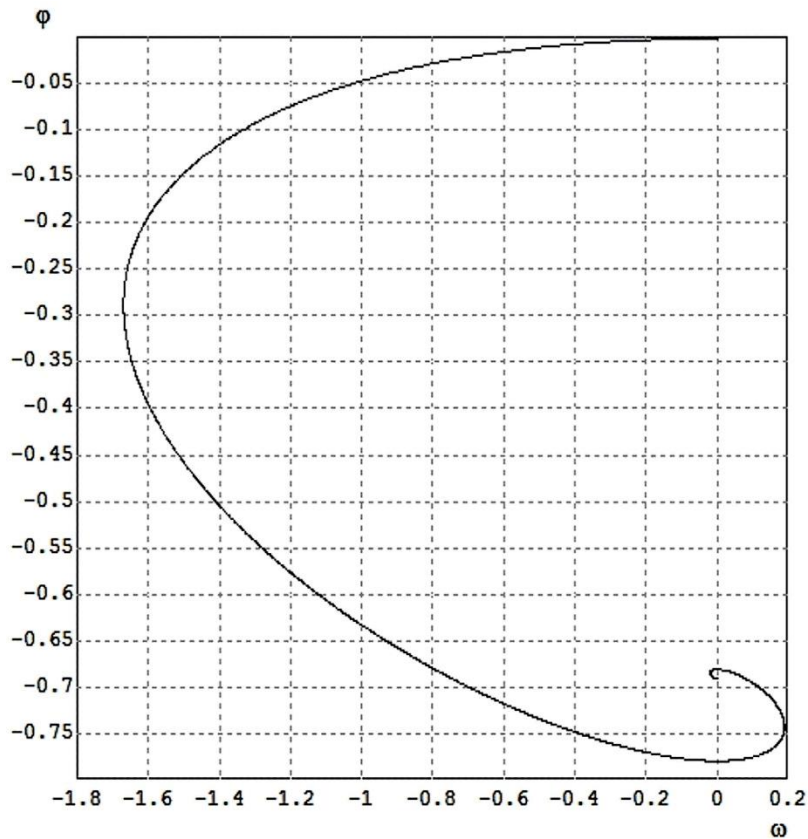


Рис. 4. Фазовый портрет по углу и скорости в режиме удержания

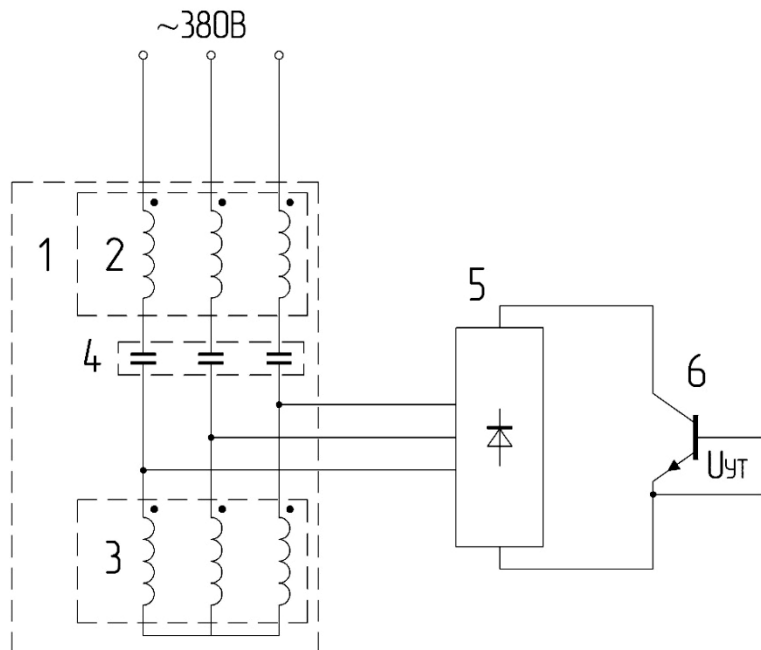


Рис. 5. Схема включения АДФР с увеличением момента синхронизации, где 1 – АДФР; 2 – обмотки статора; 3 – обмотки ротора; 4 – конденсаторы; 5 – трехфазный выпрямительный мост; 6 – транзисторный (полупроводниковый) ключ

Напряжения  $U_{sx}$ ,  $U_{sy}$  – constant, поэтому составляющие  $p U_{sy}$ ,  $p U_{sx}$  можно учитывать в новой структуре.

Структурная схема в этом случае принимает вид рис. 6. Моделирование схемы, приведенной на рис. 6, показывает, что

увеличение влияния сигналов  $X_C$  с увеличением емкости приводит к возрастанию колебательности в системе и росту момен-

та удержания. На рис. 7 приведены графики для  $X_C = 4$ . Для сравнения на рис. 3  $X_C = 0$ .

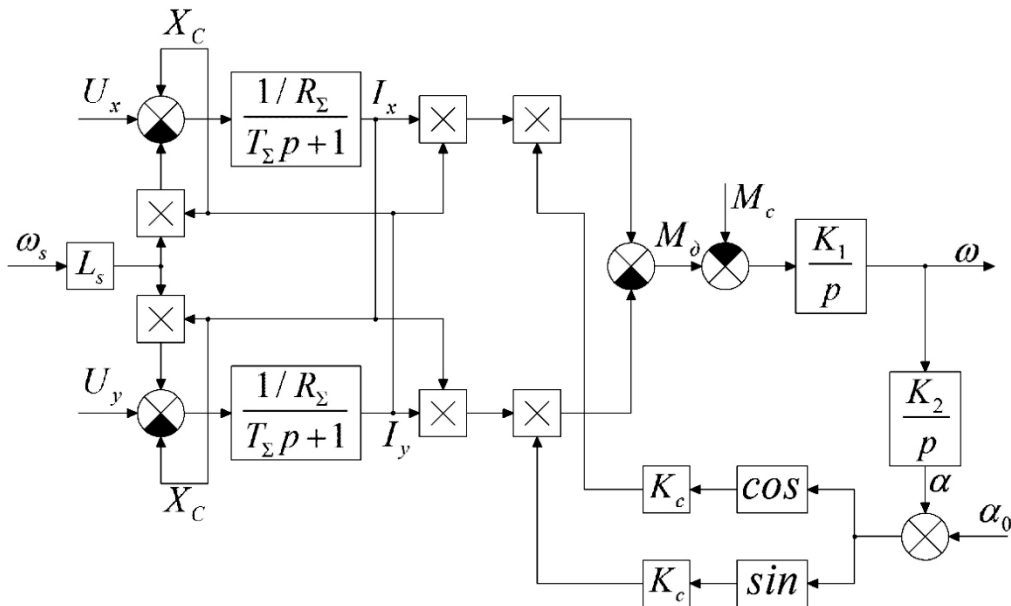


Рис. 6. Структурная схема АДФР в режиме удержания с включением конденсаторов

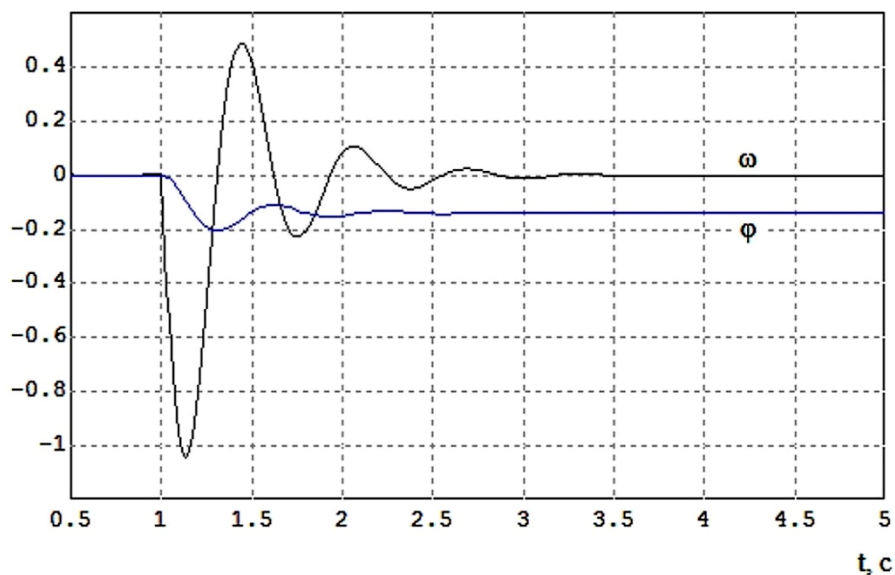


Рис. 7. Переходный процесс по углу и скорости в режиме удержания с увеличением момента синхронизации

### Заключение

1. Разработана модель АДФР при комбинированном управлении в режиме удержания.
2. Модель позволяет анализировать влияние различных параметров двигателя на исследуемый режим.
3. Показано, что по сравнению с двухканальным управлением момент удержания

в рассматриваемой схеме меньше. Для устранения этого недостатка предложено включение конденсаторов в цепь питания.

4. Для этого случая доработана модель АДФР.

5. Моделирование показало, что включение конденсаторов позволяет увеличить момент синхронизации, но вместе с этим возрастает колебательность в системе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Официальный сайт Правительства Российской Федерации. URL: <http://government.ru> (дата обращения 20.01.25).
2. Доманов В.И., Доманов А.В., Чугунов К.А. Комбинированное управление асинхронным двигателем с фазным ротором // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 1. С. 38-40.
3. Елисеев В.А., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
4. Стариков А.В. Линеаризованная математическая модель асинхронного электродвигателя как системы частотного управления // Вестник СамГТУ. Сер.: Физико-математические науки. 2002. Вып. 16. С. 175-180. doi: 10.14498/vsgtu117.
5. Мурзаков Д.Г., Доманов В.И., Халиуллов Д.С. Математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором в системе координат d-q // Вопросы электротехнологии. 2021. № 3. С. 57-64.
6. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. 464 с.
7. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. Москва: Высшая школа, 1986. 335 с.
8. Мурзаков Д.Г., Доманов В.И., Доманов А.В. Управление асинхронным двигателем по упрощенной схеме двойного питания // Математические методы в технике и технологиях: XXX Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург: Политехнический университет, 2017. Т. 5. С. 24-28.
9. Мурзаков Д.Г., Доманов В.И., Доманов А.В. Исследование работы асинхронного двигателя по упрощенной схеме двойного питания // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 2. С. 35-37.
10. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. Москва: Энергоиздат, 1981. 184 с.

**Рязанов Газинур Маратович** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

**Билалова Алиса Ильдаровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

**Мурзаков Дмитрий Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

**Gazinur M. Rjazapov** – Postgraduate student, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

**Alisa I. Bilalova** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

**Dmitriy G. Murzakov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

*Статья поступила в редакцию 07.10.25, принята к опубликованию 26.11.25*

УДК 621.313.282.2

## СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Ю. Коняев, В.И. Мошкин, Д.Н. Шестаков

### BENCH TESTING OF LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTORS

A.Yu. Konyaev, V.I. Moshkin, D.N. Shestakov

*Показано широкое применение линейных электромагнитных двигателей в производственных технологиях. Обоснована необходимость создания стендов для исследований и испытаний таких двигателей на основе современных технических средств и информационных технологий. Описаны изготовленные испытательные стенды. Приведены примеры характеристик линейных электромагнитных двигателей, полученных на стендах. Показана возможность улучшения энергетических и функциональных характеристик двигателей.*

**Ключевые слова:** линейные электромагнитные двигатели, статические и динамические характеристики, испытательные стенды, техника и методики испытаний, примеры снятых характеристик, повышение эффективности двигателей

#### Введение

Поступательное или возвратно-поступательное перемещение рабочего органа востребовано во многих машинах и механизмах. Для создания таких перемещений могут использоваться разные типы приводов: пневматические, гидравлические, электромеханические. Чаще всего применяются электромеханические приводы, включающие в себя электродвигатель вращательного движения и механическую передачу, преобразующую вращательное движение в поступательное. Преимуществами электроприводов являются более высокая экономичность, удобство монтажа и обслуживания, хорошие регулировочные свойства. В то же время возможности ука-

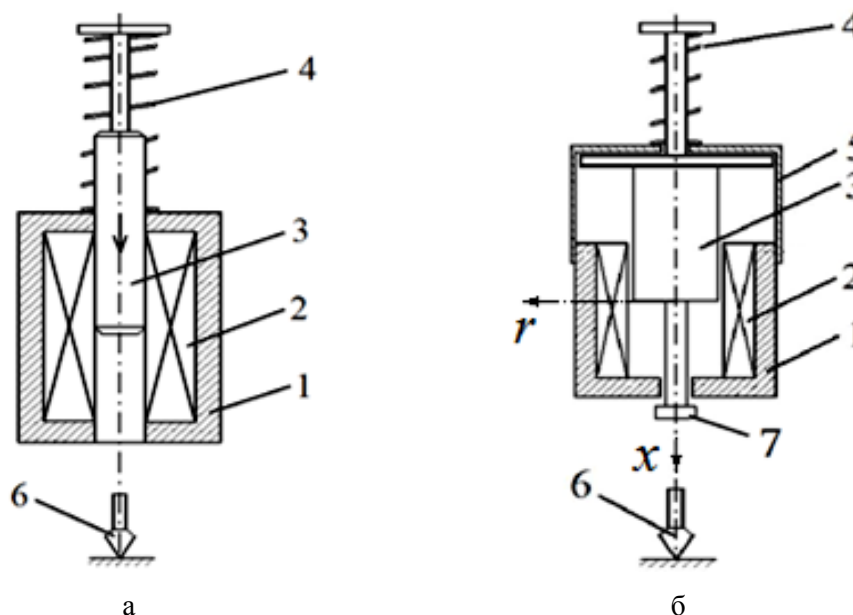
*The article shows a wide range of application of linear electromagnetic motors in production technologies. The necessity for creating the stands for research and testing these motors based on modern technical means and information technologies is substantiated. The manufactured test stands are described. Examples of the characteristics of linear electromagnetic motors obtained on the stands are given. A possibility for improving the energy and functional characteristics of the motors is shown.*

**Keywords:** linear electromagnetic motors, static and dynamic characteristics, test benches, testing equipment and methods, examples of recorded characteristics, increasing motor efficiency

занных электромеханических приводов ограничиваются наличием механических передач. Поэтому во многих случаях более эффективными являются электроприводы на основе линейных электродвигателей, в которых реализуется непосредственное поступательное перемещение рабочего органа, не требующее промежуточных механических звеньев [1-6]. Такой электропривод становится более компактным и надежным. Линейные двигатели легко встраиваются в рабочие машины и механизмы. Наибольшее распространение на практике получили линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД), реализуемые в широком диапазоне габаритов и мощности и позволяющие решать широкий круг тех-

нологических задач [7-12]. На основе ЛЭМД создаются механизмы разного функционального назначения: ударного и силового действия, возвратно-поступательного (циклического) перемещения, вибрационного действия. Как пра-

вило, такие электродвигатели отличаются простотой конструкции, что обуславливает низкую стоимость их изготовления и обслуживания, высокую надежность. Примеры конструктивного исполнения ЛЭМД ударного действия представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструктивные схемы ЛЭМД ударного действия с одним (а) и с двумя рабочими зазорами (б): 1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — якорь; 4 — возвратная пружина; 5 — немагнитный направляющий корпус; 6 — инструмент; 7 — боёк

Широкое распространение ЛЭМД обуславливает актуальность исследований, направленных на улучшение их энергетических и функциональных характеристик. Теоретические исследования таких двигателей осложняются тем, что их работа сопровождается электрическими переходными процессами в обмотке и электро-механическим переходным процессом при движении якоря. Поэтому при математическом моделировании ЛЭМД приходится решать систему нелинейных уравнений: уравнения электрического состояния обмоток и уравнения движения подвижной части двигателя. Нелинейность уравнений обусловлена тем, что в рабочих режимах ЛЭМД изменяются как параметры электрической цепи, так и силы, действующие на якорь. Это существенно усложняет расчеты таких электрических машин и обуславливает применение упрощающих допущений при расчетах [8, 9, 12, 13].

С учетом этого возрастает роль экспериментальных исследований ЛЭМД, задачами которых являются проверка достоверности результатов расчетов и полученных теоретических выводов, оценка влияния на характеристики машин различных факторов, испытания установок на основе ЛЭМД с целью апробации различных технологий. Для решения таких задач необходимо соответствующее испытательное оборудование и методики экспериментов, позволяющие исследовать как статические, так и динамические характеристики ЛЭМД. В настоящей статье обобщается опыт работы авторов в указанном направлении.

#### Описание стендов и результаты исследований

Для целенаправленного совершенствования конструкций ЛЭМД и формирования режимов их работы, направленных на по-



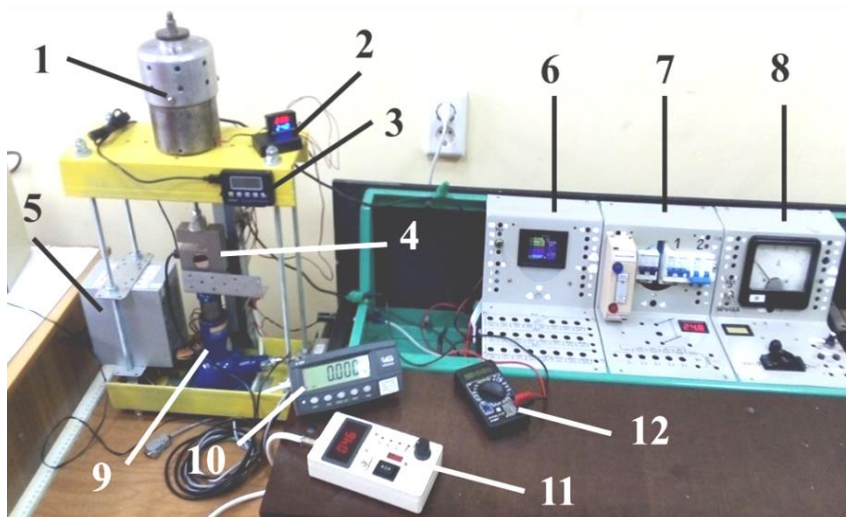
вышение энергоэффективности и улучшение функциональных свойств двигателей, необходимо изучение закономерностей протекания физических процессов в них. Для оценки эффективности работы ЛЭМД в разных технологических режимах необходимо знание как статических (при неподвижном якоре), так и динамических характеристик. Основными статическими характеристиками являются зависимость электромагнитного усилия от положения якоря – тяговая (силовая) характеристика  $F(i, x)$  (начало координат системы  $(x, r)$  соответствует начальному положению якоря при максимальном зазоре  $\delta$ , как показано на рис. 1 б) и зависимости тока от времени при подключении обмотки к разным источникам питания в различных положениях якоря  $i(t, x)$ . При оценке рабочих (динамических) режимов работы ЛЭМД представляют интерес изменение электрических характеристик (напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$  обмотки) при перемещении якоря, а также параметры движения якоря (перемещение  $x(t)$ , скорость  $V(t)$ , ускорение  $a(t)$ ). Очевидно, что для получения экспериментальных статических и динамических характеристик ЛЭМД требуется разное техническое и методическое обеспечение. Поэтому целесообразно создание двух отдельных стендов, ориентированных на соответствующие режимы испытаний.

Экспериментальным исследованиям ЛЭМД посвящено достаточно много работ [6-9, 14-16]. Однако анализ этих публикаций указывает на необходимость совершенствования испытательных стендов и методик исследований. В ряде указанных работ исследования выполнялись с использованием устаревших технических средств, не допускающих обработку результатов измерений с помощью современной вычислительной техники [6-9]. Например, при снятии динамических характеристик ранее использовали светолучевые осциллографы, применявшиеся для регистрации аварийных процессов в энергетических системах [17]. Они требовали значительных ресурсов времени на расшифровку записей, а сами измерения от-

личались значительными погрешностями (до 5-10 %). Требуют совершенствования и методики экспериментов. Например, при оценке динамических режимов имеются трудности в измерениях таких характеристик, как скорость  $V(t)$  якоря и его ускорение  $a(t)$ . В работе [15] такие измерения выполняются с помощью пьезодатчиков. При этом отмечается, что при малой длительности переходных электро-механических процессов (миллисекунды) такие измерительные преобразователи скорости и ускорения не обладают достаточной точностью и сложны в настройке. В то же время при получении зависимости перемещения якоря от времени  $x(t)$  в цифровой форме соответствующие характеристики скорости и ускорения могут быть получены дифференцированием зависимости  $x(t)$ . При этом отпадает необходимость их измерений. С учетом сказанного была поставлена задача создания испытательных стендов, оснащенных современными высокоточными средствами получения измерительных сигналов в цифровой форме с последующей обработкой их средствами вычислительной техники. Другая задача, решаемая при создании стендов, заключалась в расширении их функциональных возможностей, позволяющих испытывать ЛЭМД разных конструктивных исполнений, питаемых от различных источников.

На первом этапе был разработан и создан стенд для снятия статических тяговых характеристик ЛЭМД. Внешний вид и основные элементы стенда показаны на рис. 2.

Для измерения усилия, создаваемого якорем ЛЭМД, используется электронный динамометр ДОУ-3 (4) с измерительным терминалом R320 (10) [18]. В качестве источника питания установки применены 2 батареи суперконденсаторов (ионисторов) напряжением до 30 В и ёмкостью 600 Ф каждая, включённые последовательно. В качестве стабилизированного источника тока (6) используется электронная нагрузка ATORCH DL24MP на 600 Вт [19], обеспечивающая работу ЛЭМД с установившимся постоянным током.



**Рис. 2.** Внешний вид стенда для снятия тяговой характеристики ЛЭМД:

- 1 – исследуемый ЛЭМД; 2 – дисплей датчиков температуры; 3 – дисплей положения подъёмного механизма; 4 – датчик измерения силы (тензодатчик); 5 – блок питания; 6 – стабилизатор тока; 7 – блок переключения конденсаторов; 8 – блок заряда конденсаторов; 9 – подъёмный механизм с двигателем и редуктором; 10 – дисплей датчика измерения силы R320; 11 – пульт управления подъёмным механизмом; 12 – мультиметр

Для отыскания тяговой характеристики ЛЭМД необходимо определить, какое усилие создает двигатель при различной величине зазора между якорем и статором (различном положении якоря по оси  $x$ ). Для регулирования зазора в установке применяется подъёмный механизм (9), в качестве которого использован винтовой домкрат с двигателем и редуктором. Управление подъемом осуществляется с пульта (11). Величина зазора между якорем и статором контролируется по показаниям на дисплее положения подъёмного механизма (3), подключенном к цифровой линейке [20] с диапазоном измерения: 0-200 мм, разрешением: 0,01 мм и точностью:  $\pm 0,08$  мм.

Снятие тяговой характеристики ЛЭМД на рассматриваемом стенде производится в два этапа. На подготовительном этапе проводится калибровка датчика положения подъёмного механизма (3) и датчика измерения силы (4) (здесь и далее указаны обозначения, приведенные на рис. 2) и выставляется начальное положение якоря. На этапе измерений на обмотку ЛЭМД (1) от стабилизатора тока (6) подаётся ток необходимой величины. По дисплею датчика измерения силы (10) фиксируется величина тягового усилия, создаваемого ЛЭМД, а по

дисплею положения подъёмного механизма (3) заданное начальное положение якоря. Далее после отключения тока, с помощью подъёмного механизма, якорь ЛЭМД опускается на необходимую величину (например, с шагом  $\Delta x = 1$  мм), и измерения повторяются. По полученным значениям строится зависимость тягового усилия ЛЭМД от положения якоря  $F(x)$ .

Для исключения влияния люфта в месте соединения датчика положения с подъёмным механизмом, рекомендуется после подъёма подвижной части в верхнее положение, двигаться только в одном направлении (вниз), тем самым исключая вносимую люфтом погрешность. При выполнении такой рекомендации погрешность измерения зазора составляет не более 0,1 мм. При проведении длительных экспериментов контролируется температура обмотки. Контроль температуры осуществляется по показаниям на дисплее датчиков температуры (2). Рабочая температура обмотки не должна превышать 80 °С.

На рис. 3 схематично представлена конструкция и обозначения размеров одного из двигателей, используемых в опытах. Значения основных параметров ЛЭМД даны в табл. 1 [13].

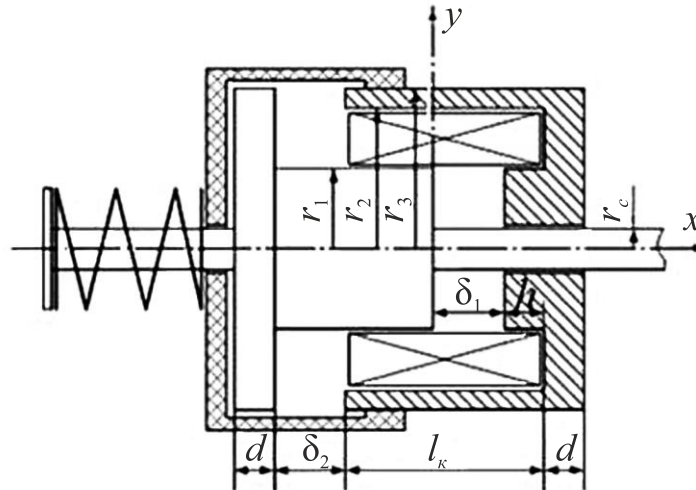


Рис. 3. Схема и конструктивные параметры исследуемого ЛЭМД

Таблица 1 – Основные параметры исследуемого ЛЭМД

Параметр	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$r_3$ , мм	$r_c$ , мм	$l_k$ , мм	$h$ , мм	$d$ , мм	Число витков обмотки	Ток обмотки, А	Масса якоря, кг
Величина	16,4	25	30	10	50	9,5	9	320	15	0,505

На рис. 4 показаны примеры тяговых характеристик для такого двигателя, полученные при разных токах обмотки.

Наряду с опытными характеристиками на графиках представлены зависимости усилия от положения якоря, рассчитанные с применением метода конечных элементов, реализованного в программе Elcut в осесимметричной постановке [13].

Для снятия динамических характеристик ЛЭМД и испытаний двигателей в рабочих режимах был разработан и изготовлен стенд, показанный на рис. 5.

Для измерения перемещения якоря применяется резистивный датчик линейного перемещения типа KTR-25, питаемый от источника стабилизированного напряжения. Основные параметры такого датчика приведены в табл. 2 [21].

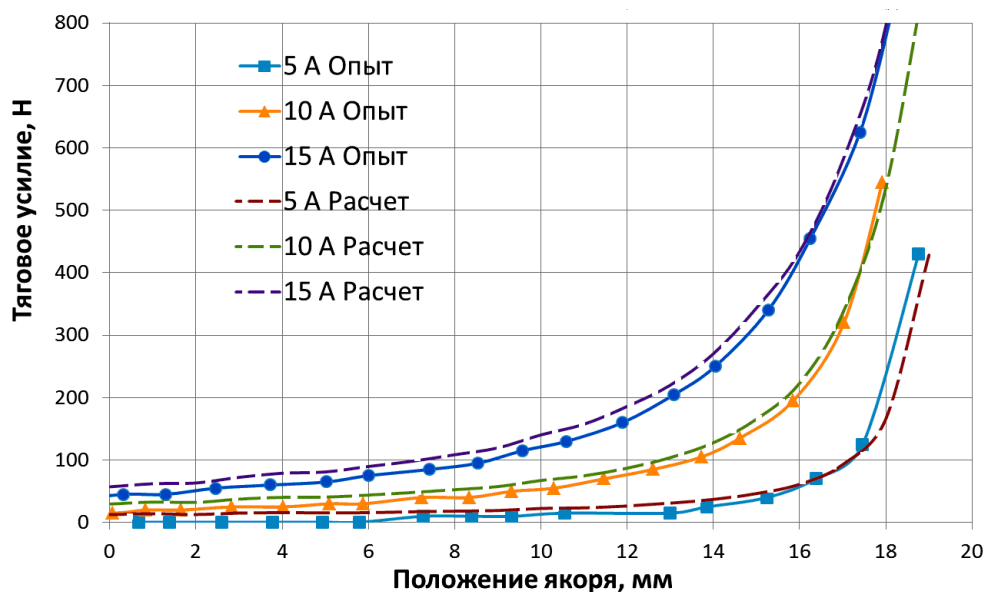
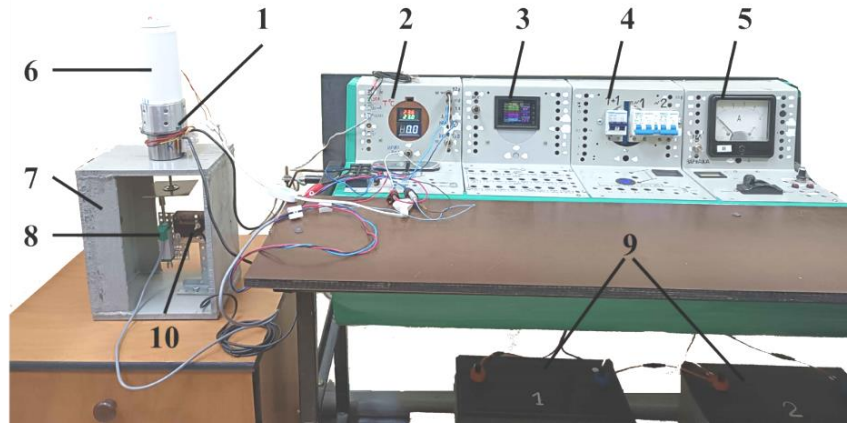


Рис. 4. Тяговые характеристики опытного ЛЭМД



**Рис. 5.** Внешний вид и оборудование стенда для снятия динамических характеристик ЛЭМД: 1 – ЛЭМД; 2 – измерительный блок; 3 – стабилизатор тока; 4 – блок переключения конденсаторов; 5 – блок заряда конденсаторов; 6 – устройство удержания якоря; 7 – станина; 8 – резистивный датчик линейного перемещения; 9 – два суперконденсатора; 10 – лазерный датчик положения якоря

Таблица 2 – Основные параметры датчика линейного перемещения

Модель	KTR-25
Длина измерения	0-25 мм
Механический ход	28 мм
Сопротивление, +/- 10%	2 кОм
Линейная точность (+/- FS)	0,05 %
Рабочее напряжение	5-24VDC (вход 10V, выход 10V)
Ток	10 мкА

В установке используется также лазерный датчик типа LC-S100MN (BL-100NM) [22], применяемый для измерения величины рабочего зазора и для калибровки резистивного датчика перемещения. К сожалению, такой лазерный датчик, имеющий высокую точность (0,1 мм в диапазоне  $\pm 35$  мм) не пригоден для измерений перемещения якоря ЛЭМД, поскольку его время отклика 1,5 мс соизмеримо со временем электромеханического переходного процесса.

Сигнал с резистивного датчика перемещения поступает на выходной блок, основу которого составляет цифровой измерительный прибор ИРИС-О-2 [23]. Схема выходного измерительного блока представлена на рис. 5. При исследовании электромеханического переходного процесса (получении зависимости  $x(t)$ ) выход датчика перемещения соединяется со входами 6-7 блока ИРИС. При исследовании электрических переходных процессов на входы 6-7 подается напряжение, равное напряжению на обмотке ЛЭМД, а на входы 4-5 напряже-

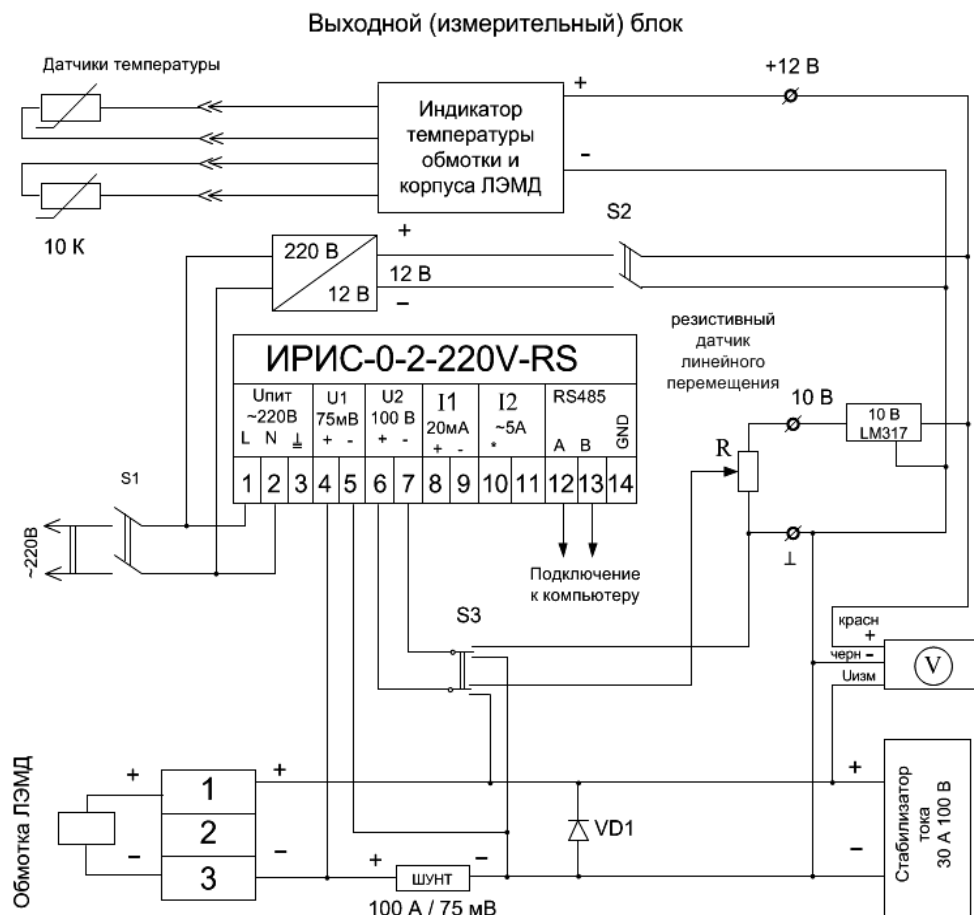
ние, пропорциональное току обмотки, снимаемое с шунта (100 А / 75 мВ). Помимо прибора ИРИС в выходном блоке размещаются индикаторы температуры, соединенные с датчиками, расположенными на корпусе двигателя и в его обмотке.

Через блок ИРИС обмотка ЛЭМД соединяется с источником питания. На рис. 5 показан вариант для снятия динамических характеристик двигателя при питании обмоток от источника стабилизированного тока. Возможны другие варианты питания ЛЭМД (например, от батареи конденсаторов).

В созданном стенде для определения динамических характеристик ЛЭМД (зависимости от времени  $u(t)$ ,  $i(t)$ ,  $x(t)$ ), решающая роль отводится измерительному прибору ИРИС-О-2, который преобразует аналоговые входные измерительные сигналы в цифровые, может осуществлять запись осциллограмм, а также передавать данные внешним устройствам по интерфейсам Bluetooth и RS-485 (протоколы Modbus-RTU, ГОСТ Р МЭК 60870-5-101-2006).

Связь с персональным компьютером (ПК) организована через преобразователь интерфейсов USB в RS-485 (CH340 + MAX485) по RS-485. Скачивание осциллограмм доступно через программу IRIS для

ПК [23]. Осциллограммы можно посмотреть с помощью ПО «KIWI-Viewer», устанавливается вместе с программой IRIS на ПК. Программа бесплатно предоставляется производителем [23].



**Рис. 5.** Схема выходного измерительного блока

Для удобства работы с полученными осциллограммами их можно экспортировать в математический пакет Excel. Для перевода применяемого в приборе ИРИС формата записи осциллограмм Comtrade в совместимый с Excel формат \*.csv можно использовать программу Waves, созданную для анализа аварийных осциллограмм [24].

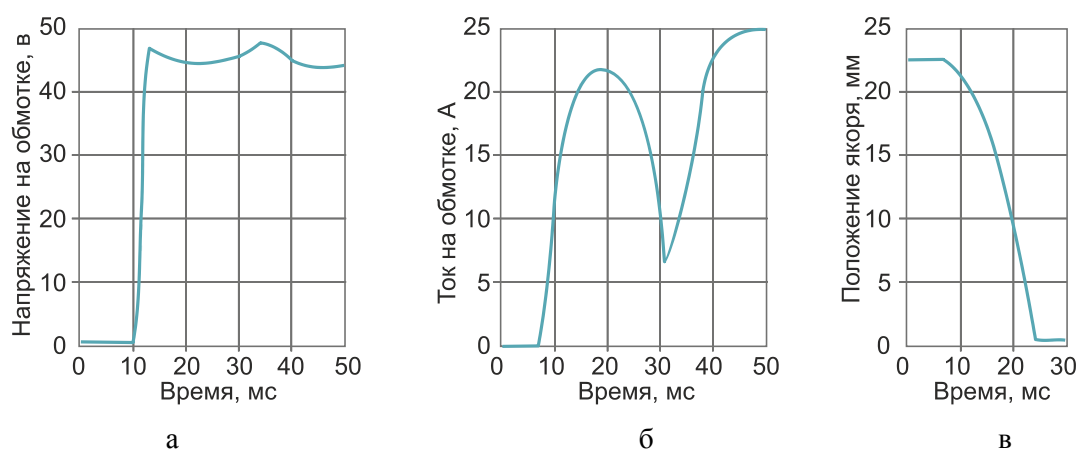
Примеры осциллограмм электромеханических переходных процессов исследуемого ЛЭМД, полученных на стенде через прибор ИРИС-О-2, показаны на рис. 7. На рисунке представлены осциллограммы напряжения (рис. 7 а) и тока (рис. 7 б) в обмотке, а также положения якоря (рис. 7 в) при подключении обмотки ЛЭМД к батарее конденсаторов.

Методика снятия динамических характеристик ЛЭМД на рассматриваемом стенде, как и в случае снятия статических характеристик, включает подготовительные операции (для калибровки датчиков перемещения и настройки приборов) и последующую запись осциллограмм через прибор ИРИС.

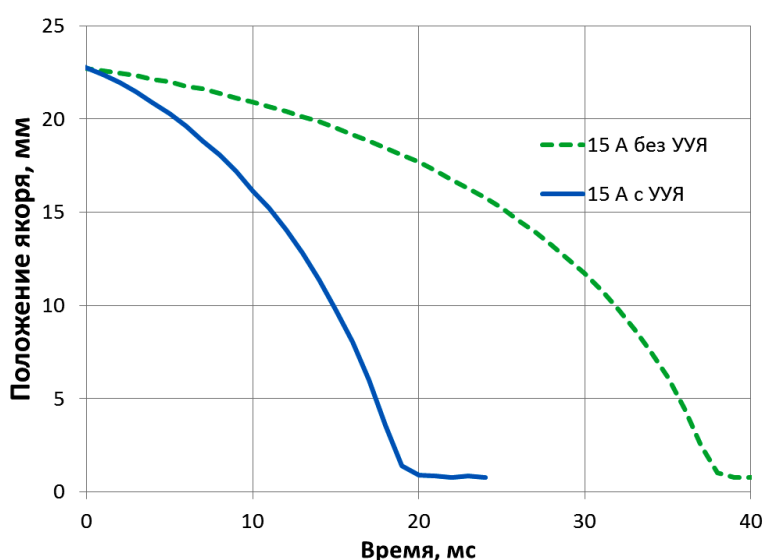
Отдельный интерес представляет получение рабочих характеристик ЛЭМД, содержащих устройство удержания якоря (УУЯ) [8-10]. Такое устройство препятствует движению якоря до момента окончания электрического переходного процесса (до достижения установившегося значения тока). Тем самым в начале рабочего хода якоря существенно увеличива-

ются значения электромагнитных усилий. Эффективность такого решения подтверждается графиками, показанными на рис. 8, где представлены экспериментальные

зависимости перемещения якоря от времени при заданном значении тока в обмотке 15 А, с использованием УУЯ и без него.



**Рис. 7.** Осциллограммы электромеханического переходного процесса при подключении ЛЭМД к батарее конденсаторов



**Рис. 8.** Перемещение якоря от времени при токе 15 А с использованием УУЯ и без него

Как видно на рис. 8, якорь двигателя с УУЯ достигает конечного положения за меньшее время, имеет в конце хода большую скорость, следовательно, больший запас кинетической энергии, что особенно важно для ЛЭМД ударного действия.

### Заключение

Таким образом, созданные испытательные стенды, позволяют получать как статические, так и динамические характеристики ЛЭМЛ разного конструктивного исполнения. При создании стендов использовались со-

временные цифровые приборы измерения и регистрации электрических параметров двигателя (ток и напряжение на обмотке), электромагнитных усилий и параметров движения якоря. Получение результатов измерений в цифровой форме позволяет использовать при их обработке возможности современной вычислительной техники. Созданные испытательные стенды позволяют расширить исследования физических процессов в ЛЭМД и поиск новых технических решений, направленных на улучшение энергетических и функциональных характеристик двигателей.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – области применения / В.Б. Баль, В.Я. Геча, В.И. Гончаров и др. // Вопросы электроме- ханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 149. № 6. С. 3-17.
2. Линейные электродвигатели в приво- дах подач многоцелевых станков / А.А. Махов, О.Г. Драгина, П.С. Белов, С.Л. Махов // Вестник машиностроения. 2020. № 4. С. 47-52.
3. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Са- рапулов. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
4. **Gieras J.F.** Linear Induction Drives. London: Oxford Univ. Press, 1994. 320 p.
5. Linear motors: application guide. Aero- tech Inc. URL: [https://www.aerotech.com/ prod- ucts/motors/](https://www.aerotech.com/products/motors/) (дата обращения 2025-06-09).
6. **Хитерер М.Я., Овчинников И.Е.** Синхронные электрические машины воз- вратно-поступательного движения. Санкт- Петербург: КОРОНА принт, 2004. 368 с.
7. **Ефимов И.Г., Соловьев А.В., Вик- торов О.А.** Линейный электромагнитный привод. Ленинград: Изд-во Ленинград. ун- та, 1990. 212 с.
8. Линейные электромагнитные двига- тели и приводы в импульсных процессах и технологиях / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, В.А. Каргин, А.В. Волгин. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. 202 с.
9. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Линей- ные синхронные электромагнитные маши- ны ударного действия. Новосибирск: Изд- во НГТУ. 2021. 480 с.
10. **Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Разра- ботка, создание и концепция развития си- ловых электромагнитных импульсных си- стем // Вопросы электротехнологии. 2020. № 3 (28). С. 38-45.
11. **Cao Z.Q., Zuo Y.G.** Electromagnetic riveting technique and its applications // Chi- nese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 33. № 1. P. 5-15. DOI: 10.1016/j.cja.2018.12.023.
12. **Plavec E., Petrinić M., Vidović M.** Improving the Force and Time Response of a DC Solenoid Electromagnetic Actuator by Changing the Lower Core Angle // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. 2021. Vol. 21. № 2. P. 95-103. DOI: 10.26866/jees.2021.21.2.95.
13. **Коняев А.Ю., Мошкин В.И., Ше- стаков Д.Н.** Оценка подходов к моделиро- ванию рабочих режимов линейных элект- ромагнитных двигателей // Вестник Перм- ского национального исследовательского политехнического университета. Электро- техника, информационные технологии, си- стемы управления. 2024. № 52. С. 5-24. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.4.01.
14. Методика цифрового измерения ди- намических и энергетических характери- стик породоразрушающей машины для безвзрывного разрушения горных пород / К.А. Васин, Е.К. Едыгенов, Н.У. Алдияров, В.В. Воронин // Вестник ТОГУ. Алматы: Изд-во ТОГУ. 2019. № 3 (54). С. 9-16.
15. Методика экспериментальных ис- следований линейных импульсных элект- ромеханических преобразователей / В.Ф. Болух, А.И. Кочерга, С.В. Алексеен- ко, И.С. Щукин // Электротехника и элект- ромеханика. 2017. № 2. С. 18-28. DOI:10.20998/2074-X.2017.2.03.
16. **Каргин В.А.** Повышение эффектив- ности технических средств для процессов и технологий АПК использованием машин с линейным электромагнитным приводом: дис. ... д-ра техн. наук. Саратов: Сарат. гос. аграр. ун-т, 2020. 375 с.
17. **Артамонов В.М., Лебедев Г.П., Хренков П.И.** Светолучевые осциллогра- фы. Ленинград: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. 104 с.
18. Динамометры электронные. Сайт компании ООО «ПетВес». Санкт- Петербург. URL: [https://petves.com/ dynamometer\\_dep\\_3](https://petves.com/dynamometer_dep_3) (дата обращения: 19.06.2025).
19. Электронная нагрузка ATORCH DL24MP, 600 Вт. URL: [https://aliexpress.ru/ item/1005004644040863.html?spm=a2g2w orde- tdetail.0.0.5a934aa6Q8kHll&sku\\_id=12000029 956808418&\\_ga=2.100214430.1247695313.175](https://aliexpress.ru/item/1005004644040863.html?spm=a2g2w.orderdetail.0.0.5a934aa6Q8kHll&sku_id=12000029956808418&_ga=2.100214430.1247695313.175)

0429521-102652098.1691352658 (дата обращения: 19.06.2025).

20. Цифровая линейка Shahe 0-200 мм. URL: [https://aliexpress.ru/item/32852272941.html?spm=a2g2w.orderdetail.0.0.2c344aa6MCWdf2&sku\\_id=12000042624818234&\\_ga=2.53496232.1247695313.1750429521-1102652098.1691352658](https://aliexpress.ru/item/32852272941.html?spm=a2g2w.orderdetail.0.0.2c344aa6MCWdf2&sku_id=12000042624818234&_ga=2.53496232.1247695313.1750429521-1102652098.1691352658) (дата обращения: 19.06.2025).

21. Линейный датчик перемещения Fivetecnc KTR 10/25/50/75/100 мм. URL: [https://aliexpress.ru/item/32950458065.html?spm=a2g2w.orderdetail.0.0.3aa94aa6wqmNiY&sku\\_id=12000031066524429&\\_ga=2.27918780.1247695313.1750429521-102652098.1691352658](https://aliexpress.ru/item/32950458065.html?spm=a2g2w.orderdetail.0.0.3aa94aa6wqmNiY&sku_id=12000031066524429&_ga=2.27918780.1247695313.1750429521-102652098.1691352658) (дата обращения: 19.06.2025).

22. Лазерный датчик измерения расстояния. URL: [https:// aliexpress.ru/item/](https://aliexpress.ru/item/)

1005002217699120.html?spm=a2g2w.orderdetail.0.0.367a4aa6mwrA9Q&sku\_id=12000019328861190&\_ga=2.66612910.1247695313.1750429521-1102652098.1691352658 (дата обращения: 19.06.2025).

23. Цифровой измерительный прибор ИРИС-О2. Руководство по эксплуатации. Новосибирск: ООО НПП «Микропроцессорные технологии», 2023. 36 с. URL: <https://i-mt.net/wp-content/uploads/2022/12/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-Iris-O2.pdf> (дата обращения: 19.06.2025).

24. Waves. Анализ аварийных осциллограмм. Руководство пользователя. ООО НПП «ЭКРА». 2024. 79 с. URL: <https://dev.ekra.ru/software/package?packageId=2> (дата обращения: 19.06.2025).

**Коняев Андрей Юрьевич** – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета

**Мошкин Владимир Иванович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Цифровая энергетика» Курганского государственного университета

**Шестаков Дмитрий Николаевич** – аспирант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, старший преподаватель кафедры «Цифровая энергетика» Курганского государственного университета

**Andrey Yu. Konyaev** – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Electrical Engineering, Ural Federal University

**Vladimir I. Moshkin** – Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head: Department of Digital Power Engineering, Kurgan State University

**Dmitry N. Shestakov** – Postgraduate Student, Department of Electrical Engineering, Ural Federal University, Senior Lecturer at Kurgan State University

*Статья поступила в редакцию 21.10.25, принята к опубликованию 26.11.25*

УДК 621.039:62-622

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПИКОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИЗНОГО ВОДОРОДА НА БАЗЕ ЗАМКНУТОГО ВОДОРОДНОГО ЦИКЛА

А.Н. Егоров, В.Е. Юрин

### COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF PEAK ELECTRICITY PRODUCTION AT NUCLEAR POWER PLANTS USING ELECTROLYTIC HYDROGEN BASED ON A CLOSED HYDROGEN CYCLE

A.N. Egorov, V.E. Yurin

Водородные технологии способны обеспечить эффективную работу атомных электрических станций в условиях неравномерного потребления электрической энергии в энергосистеме в течение суток. В ночные часы невостребованная электроэнергия может быть направлена на электролизное производство водорода и кислорода. В часы повышенного энергопотребления водород и кислород могут быть использованы как топливо для получения пара, который, в свою очередь, обеспечит привод паровой турбины с выработкой дополнительной электроэнергии в энергосистему. Энергия водородного топлива может быть также использована для теплоснабжения и промышленных нужд. Для обеспечения безопасности применения водородного топлива авторами предложена схема с замкнутым контуром водород-кислородной смеси, что исключает попадание водорода в прочее оборудование комплекса. В настоящей работе проведен сравнительный анализ технико-экономической эффективности разработанных схемно-параметрических решений производства пиковой электроэнергии на АЭС на базе замкнутого водородного цикла.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, электролизное производство водорода и кислорода, замкнутый водородный цикл

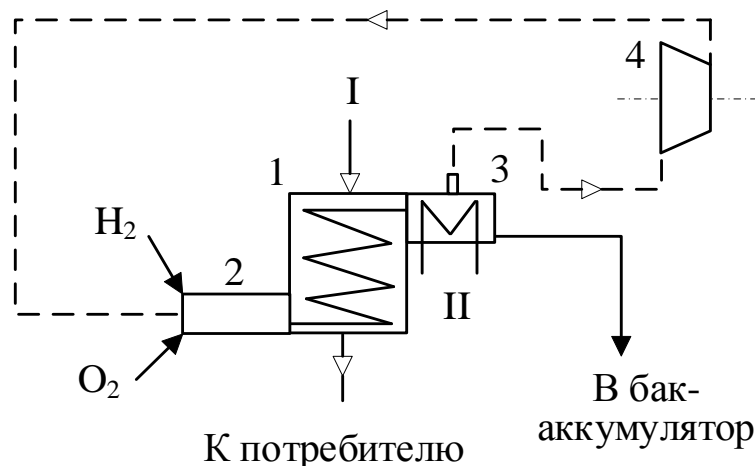
Hydrogen technologies can ensure effective operation of nuclear power plants under conditions of uneven power grid consumption throughout the day. During nighttime hours, unused electricity can be applied for electrolytic production of hydrogen and oxygen. During peak power consumption hours, hydrogen and oxygen can be used as fuel to generate steam that will drive a steam turbine to produce additional electricity for the grid. Hydrogen fuel energy can also be used for heating and industrial purposes. To ensure safety of the hydrogen fuel, the authors proposed a closed-loop hydrogen-oxygen mixture design that prevents hydrogen from entering other equipment within the plant. In this paper, the authors conducted a comparative analysis of the technical and economic efficiency of the developed circuit and parametric solutions for peak power generation at nuclear power plants using electrolytic hydrogen based on the closed hydrogen cycle.

Keywords: nuclear power plant, electrolytic production of hydrogen and oxygen, closed hydrogen cycle

Водородное топливо в энергетической сфере может быть применено для нагрева питательной воды, теплоснабжения жилых и промышленных предприятий, генерации пара или перегрева свежего пара, генерируемого на электростанциях, а также других целей, для выполнения которых необходим подвод тепла. В результате окисления водорода кислородом образуется высокотемпературный пар, который передает энергию водородного топлива потребителю в зависимости от назначения [1-3].

Безопасность и эффективность водородного парогенератора в значительной степени зависят от полноты сжигания водородного топлива, которая может значительно разниться в зависимости условий работы комплекса [4-6].

В качестве решения указанной проблемы авторы разработали способ сжигания водорода в кислородной среде с избытком окислителя в условиях замкнутого цикла водород-кислородной смеси. Схема исключает возможность попадания непрореагировавшего водорода в оборудование – потребителя тепловой энергии водородного топлива [7]. Данное решение также позволяет отказаться / снизить долю неэффективного охлаждения продуктов сгорания балластировочной водой, так как температура регулируется избытком окислителя. Принципиальная схема водородного парогенератора с замкнутым циклом водород-кислородной смеси представлена на рис. 1 [8]:



**Рис. 1.** Схема водородного парогенератора

с замкнутым циклом водород-кислородной смеси:

1 – парогенератор (пароперегреватель); 2 – камера сгорания;  
3 – теплообменник; 4 – компрессор; I – подача воды или пара; II – отвод тепла

Согласно схеме (рис. 1), избыточный окислитель направляется в камеру сгорания 2 после конденсации водород-кислородной смеси в теплообменнике 3.

Температура водород-кислородной смеси может достигать 3500 °С. Согласно настоящему исследованию несмотря на избыток окислителя после камеры сгорания температура достигает значений более 2700 °С. Такой уровень температуры требует применения в теплообменном оборудовании дорогостоящих материалов. Для решения этой проблемы разработана

трехступенчатая схема реализации водород-кислородного парогенератора.

Расчет конструкций и теплообменных поверхностей трехступенчатой схемы реализации водород-кислородного парогенератора с учетом требуемых параметров проведен в работе [9]:

1 ступень служит для снижения температуры водород-кислородной смеси в камере сгорания 2 до параметров, позволяющих использовать доступные материалы при изготовлении теплообменного оборудования. В работе [9] температура водо-

род-кислородной смеси после первой ступени принята равной 1000 °С. Необходимо отметить, что температура также ограничена процессом диссоциации водяного пара;

2 ступень (1 на рис. 1) используется для подведения дополнительного тепла потребителю энергии водородного топлива через кожухотрубный поверхностный теплообменник. В работе [9] рассмотрены три варианта реализации: частичное замещение подогревателей высокого давления (ПВД) паровой турбоустановки (ПТУ), подогрев питательной воды после ПВД, перегрев свежего пара;

3 ступень (3 на рис. 1) согласно работе [9] необходима для конденсации парогазовой смеси и удаления газов с подачей их на рециркуляцию. В качестве материала теплообменных труб принят титан. Данный материал используется в конденсаторах современных АЭС.

В результате объемного исследования [9] получены следующие значения капиталовложений в водородный энергокомплекс для вариантов схем использования водородного энергокомплекса при определенной дополнительно получаемой электрической мощности. Результаты исследования [9] показаны в табл. 1.

Таблица 1 – Капиталовложения в основное оборудование водородного энергокомплекса

Параметр	Схема 1 Частичное замещение ПВД энерго- блока АЭС	Схема 2 Подогрев питательной воды после ПВД энерго- блока АЭС	Схема 3 Перегрев свежего пара на дополнительную ПТУ (увеличенный расход пара за счет модернизации парогенераторов и реактора)
Сверхноминальная мощность на энергоблоке АЭС, МВт	58,7	100,2	127,8
Модернизация основной ПТУ АЭС, млн руб.	580,6	–	
Стоимость дополнительной ПТУ, млн руб.	-	2722	5523
Стоимость модернизации электрохозяйства и автоматизированной системы управления технологическим процессом, млн руб.	58,06	272,2	552,3
Стоимость модернизации реактора и парогенераторов с целью выработки дополнительного количества пара, млн руб. (принято на основании [10]) + переработка проекта АЭС, обоснование безопасности	–	–	1500+1500
Стоимость системы хранения водорода и кислорода, а также компрессоров, млн руб.	3962		
Стоимость основного теплообменного оборудования, млн руб.	52,38	59,35	99,9
Стоимость электролизных установок, млн руб.	4725		
Суммарные капвложения, млн руб.	9378	11741	17862

Для определения технико-экономических характеристик исследуемых вариантов реализации водородного комплекса на АЭС принята средневзвешенная плата за мощность 18750 \$/МВт в месяц на основании приказа № 1222/20 «О ценах на мощность, поставляемую по договорам купли-продажи (поставки) мощности в 2021 г. на оптовый рынок электрической энергии (мощности) с использованием новых объектов атомных станций и гидроэлектростанций» (\$=80 руб.).

Тариф на отпускную электроэнергию на основе анализа рынка энергосбыта принят в размере 2 cent/(кВт·ч). Ежегодное повышение тарифа принято в размере 3 % в год. Также рассмотрены варианты 4 и 8 cent/(кВт·ч), так как установка может быть реализована в различных регионах с различными системными условиями, в том числе на удаленных территориях.

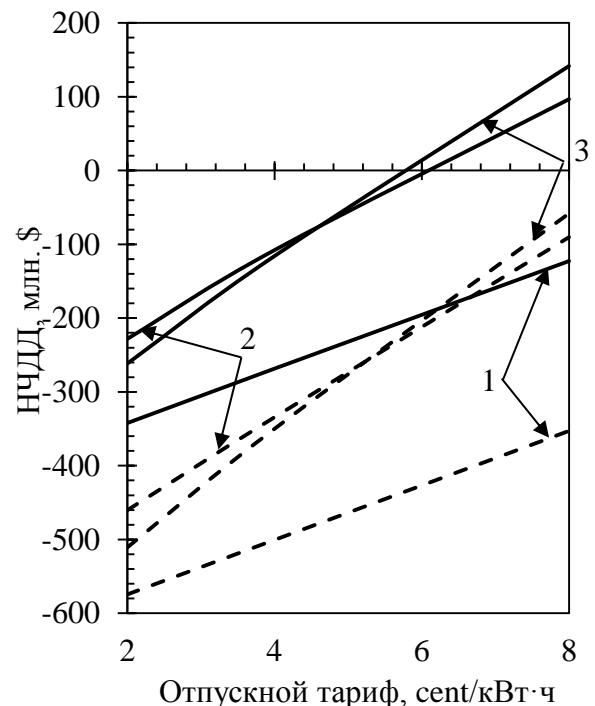
Стоимость ядерного топлива принята равной 24 \$/т у.т. [9].

Расход свежего пара на АЭС может быть увеличен различными способами с применением действующего оборудования и установкой нового. Так, например, на энергоблоке № 4 БалАЭС выполняются мероприятия по повышению выдаваемой мощности со 104 до 107 % от номинальной. Таким образом, повышение расхода пара может быть реализовано на основе действующего оборудования посредством его модернизации в процессе эксплуатации или на этапе проекта. Для третьего варианта перегрева пара такое повышение принято в качестве исходного условия, также на основе предыдущих исследований принята стоимость такой модернизации. Повышение мощности реакторной установки и парогенераторов позволяет повысить расход свежего пара, сохранив номинальные параметры работы основной ПТУ. В связи с увеличением расхода питательной воды ее температура снизится при сохранении расходов пара из основной турбины на регенеративные подогреватели. Это фактор также будет нивелирован посредством повышения мощности реактора. В работе для варианта перегре-

ва пара также учтено увеличение годового расхода ядерного топлива.

Горизонт расчёта принят равным 25 годам. Норма дисконта – 10 %, дисконтирование приведено к началу модернизации. Срок модернизации принят в размере 2-х лет.

Результаты расчета накопленного чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости исследуемых вариантов для выбранных условий эксплуатации представлены на рис. 2-3:



**Рис. 2.** Накопленный чистый дисконтированный доход (НЧДД) при реализации разработанных вариантов водородного энергокомплекса на АЭС в зависимости от тарифа на отпускную электроэнергию при стоимости внепиковой электроэнергии 0,63 (—) и 1,25 (-----) cent/(кВт·ч): 1, 2, 3 — схема 1, 2, 3, соответственно

Согласно результатам исследования, схемы 2 и 3 для принятых условий показывают наибольшую перспективность, демонстрируя положительную эффективность при сниженном внепиковом тарифе на диапазоне отпускного тарифа на электроэнергию выше 6 и 5,8 cent/(кВт·ч) соответственно. Необходимо отметить, что стои-



мость модернизации основного оборудования энергоблока АЭС оценить достоверно крайне затруднительно, так как понадобятся масштабные затраты на проведение обоснования безопасности, экспертиз, а также затраты на ремонт, приобретение комплектующих для дополнительного оборудования и так далее. Схема 1 показала низкую эффективность. В связи с этим для дальнейшего, детального и сравнительного с аналогами анализа экономической эффективности установки замкнутого водородного цикла на АЭС с учетом широкого диапазона системных условий планируется к исследованию схема 2 с подогревом питательной воды после ПВД энергоблока АЭС.

На основании проведенного расчета можно сделать вывод, что в исследуемых условиях эксплуатации водородного ком-

плекса турбина на перегретом паре показывает эффективность, сопоставимую с влажнопаровой ПТУ, несмотря на более высокий КПД у турбины с повышенными параметрами. Причина заключается в высокой стоимости ПТУ на перегретом паре. Однако для удаленных регионов ситуация может измениться ввиду высокой доли стоимости доставки оборудования и высоким тарифе на отпускную электроэнергию, в связи с которыми высокая удельная эффективность паровой турбины может оказать более весомое воздействие на общую экономическую эффективность комплекса.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10287, <https://rscf.ru/project/23-79-10287/>.*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Yurin V.E., Egorov A.N.** Primary frequency regulation in the power system by nuclear power plants based on hydrogen-thermal storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. I. 8. P. 5010-5018.
2. **Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г.** Введение в водородную энергетику. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.
3. Improved combustion efficiency of a H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> steam generator for spinning reserve application / O.J. Haidn, K. Fröhlke, J. Carl, S. Weingartner // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1998. Vol. 23. I. 6. P. 491-497.
4. **Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П.** Основные направления использования водорода в энергетике // *Российский химический журнал*. 1993. Т. 37. № 22. С. 10-17.
5. **Malysenko S.P.** JINT RAS research and development in the field of hydrogen energy technologies // *Alternative Energy and Ecology*. 2011. № 3 (95). P. 10-34.
6. Development and investigation of an experimental hydrogen-oxygen steam generator of 10-MW thermal capacity / I.N. Bebelin, A.G. Volkov, A.N. Gryaznov, S.P. Malyshe-
- ko // *Thermal Engineering*. 1997. Vol. 44. I. 8. P. 657-662.
7. **Aminov R.Z., Egorov A.N.** Hydrogen-oxygen steam generator for a closed hydrogen combustion cycle // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. I. 21. P. 11161-11167.
8. Пат. РФ 2661231. Способ водородного перегрева пара на АЭС / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров. 2018. Бюл. № 20.
9. **Егоров А.Н., Аношин Д.М., Макаров Д.А.** Оценка капитальных вложений и эксплуатационных затрат в основные элементы замкнутого водородного цикла // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2025. № 3. С. 21-33.
10. Исследование эффективности штатной работы дополнительной паровой турбины, обеспечивающей резерв собственных нужд АЭС с ВВЭР / В.Е. Юрин, Д.Ю. Кузнецов, Ю.Е. Николаев и др. // *Энергетик*. 2025. № 7. С. 16-20. DOI: 10.71527/EP.EN.2025.07.003.
11. **Аминов Р.З., Шкрет А.Ф., Гариевский М.В.** Тепловые и атомные электростанции: конкурентоспособность в новых экономических условиях // *Теплоэнергетика*. 2017. № 5. С. 5-14.

**Егоров Александр Николаевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук»

**Юрин Валерий Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Aleksander N. Egorov** – PhD (Technical Sciences), Leading Research Fellow, Federal State Budgetary Scientific Institution, Federal Research Center «Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»

**Valeriy E. Yurin** – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 05.11.25, принята к опубликованию 26.11.25*

УДК 66.048.3-932.2

## РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ НА БАЗЕ SCADA-ПЛК КОМПЛЕКСА И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В SIMINTECH

**А.В. Стоянова, Н.С. Попов, Е.А. Домахин, М.С. Попов**

### DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED SCADA-PLC CONTROL SYSTEM FOR A DISTILLATION COLUMN WITH A SIMULATION MODEL IN SIMINTECH

**A.V. Stoyanova, N.S. Popov, E.A. Domakhin, M.S. Popov**

*Разработан комплексный подход к созданию системы управления и визуализации информации ректификационной колонны на основе концепции цифрового двойника. Согласно предлагаемому подходу реализована имитационная математическая модель технологического процесса в среде SimInTech, адекватно описывающая динамику разделения многокомпонентной смеси и перераспределение фракций. Для управления технологическим процессом разработаны программные алгоритмы на языке ST в среде CoDeSys, реализующие автоматический пуск/останов, регулирование температуры и уровня, а также обработку аварийных ситуаций на основе метода конечных автоматов, обеспечивающего однозначность состояний системы. Визуализация и операторское управление обеспечены за счет интеграции с SCADA-системой MasterSCADA 4D.*

**Ключевые слова:** ректификационная колонна, система автоматизации, цифровой двойник, управление технологическим процессом, ПЛК, SCADA, математическое моделирование, конечный автомат

#### **Введение**

В современных условиях высокой конкуренции и динамичного развития технологий внедрение систем автоматизации становится ключевым фактором повышения эффективности производственных процессов. Автоматизация позволяет не только

*A comprehensive approach to the development of a control and information visualization system for a distillation column, based on the digital twin concept, has been designed. Following this approach, a simulation model of the technological process was implemented in the SimInTech environment, which adequately describes the dynamics of multicomponent mixture separation and fraction redistribution. To control the process, software algorithms were developed in the ST language within the CoDeSys environment, implementing automatic start/stop procedures, temperature and level regulation, as well as emergency situation handling based on a finite-state machine method, which ensures unambiguous system states. Visualization and operator control are provided through integration with the MasterSCADA 4D system.*

**Keywords:** Distillation column, automation system, digital twin, process control, PLC, SCADA, mathematical modeling, finite-state machine

увеличить скорость и объем выполнения задач, но и значительно снизить операционные затраты, связанные с рутинными операциями, обучением персонала и административным управлением. Кроме того, автоматизированные системы обеспечивают высокую точность, повторяемость

и надежность технологических процессов, что особенно важно в таких критически значимых отраслях, как нефтегазовая промышленность, энергетика, транспорт и авиация.

Особую актуальность автоматизация приобретает в нефтегазовом секторе, где ее внедрение способствует повышению производительности, минимизации человеческого фактора и снижению риска аварийных ситуаций. Одним из ключевых процессов в данной отрасли является ректификация нефти, требующая точного контроля и управления.

### 1. Методологические основы процесса электрообессоливания и обезвоживания нефти в составе АВТ

Современные технологии переработки нефти основаны на последовательном применении физических и химических методов преобразования углеводородного сырья. Ректификация (от лат. *rectus* – прямой и *facio* – делаю) – процесс разделения двойных или многокомпонентных смесей за счёт противоточного массообмена между паром и жидкостью. Ректификация – разделение жидких смесей на практически чистые компоненты, различающиеся температурами кипения, путём многократного частичного испарения жидкости и частичной конденсации паров. Этот сложный многостадийный процесс начинается с первичной перегонки, которая может осуществляться в различных технологических конфигурациях. В промышленной практике выделяют три основных типа установок первичной переработки: атмосферные (АТ), вакуумные (ВТ) и их комбинированные варианты, наиболее распространенным из которых является атмосферно-вакуумная трубчатка (АВТ) с блоком электрообессоливания (ЭЛОУ) [1].

ЭЛОУ АВТ представляет собой ключевой технологический модуль нефтеперерабатывающего комплекса. Её основное функциональное назначение заключается в подготовке и первичной переработке нефтяного сырья различного происхождения, включая смесевые композиции. Тех-

нологический процесс обеспечивает фракционирование нефти на целевые компоненты (бензиновые, керосиновые, дизельные фракции, мазут), которые в дальнейшем служат сырьевой базой для процессов вторичной переработки на специализированных технологических установках [2].

Основным компонентом ЭЛОУ АВТ является её атмосферная секция. АТ предназначена для разделения нефти на группу светлых нефтепродуктов с температурой кипения до 360 °С и кубовый остаток (мазут). Принципиальная схема блока атмосферной перегонки нефти установки ЭЛОУ АВТ представлена на рис. 1 [3].

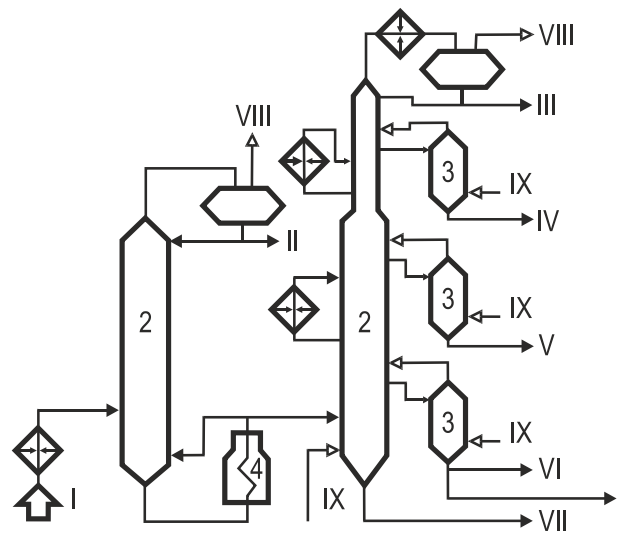


Рис. 1. Принципиальная схема блока атмосферной перегонки нефти установки ЭЛОУ АВТ

Обозначения: 1 – отбензинивающая колонна; 2 – атмосферная колонна; 3 – отпарные колонны; 4 – атмосферная печь; I – нефть с ЭЛОУ; II – легкий бензин; III – тяжелый бензин; IV – фракция 180...220 °С; V – фракция 220...280 °С; VI – фракция 280...350 °С; VII – мазут; VIII – газ; IX – водяной пар.

### 2. Архитектура автоматизированной системы: контрольные и управляющие узлы

Технологическая схема ЭЛОУ АВТ является достаточно большим объектом. Реализация полной модели такого крупного объекта требует значительных ресурсов и доста-

точно затруднительна, поскольку необходимо детальное понимание процесса, габаритные размеры конкретных агрегатов и глубокие познания в области химии и физики полного цикла ректификации. В рамках данной работы рассматривается часть этого объекта – атмосферная ректификационная колонна с ответными отпарными колоннами.

Предварительно нагретое до температуры 355...366 °С исходное сырье подается в ректификационную колонну для последующего разделения. При достижении нижней части колонны происходит термическое испарение компонентов с последующей их фракционной конденсацией на контактных устройствах (тарелках), расположенных в соответствующих температур-

ных зонах. В рамках технологического процесса осуществляется выделение четырех целевых фракций: бензиновой, керосиновой, газойлевой и мазута.

Каждая из полученных фракций, за исключением кубового остатка, направляется в индивидуальную отпарную колонну. В отпарных секциях происходит дополнительная обработка перегретым водяным паром, что способствует насыщению потока высококипящими компонентами (ВКК). Обогащенный пар рециркулирует в основную колонну, компенсируя потери ректификационного контакта при отборе боковых погонов. Функциональная схема автоматизации ректификационной установки представлена на рис. 2.

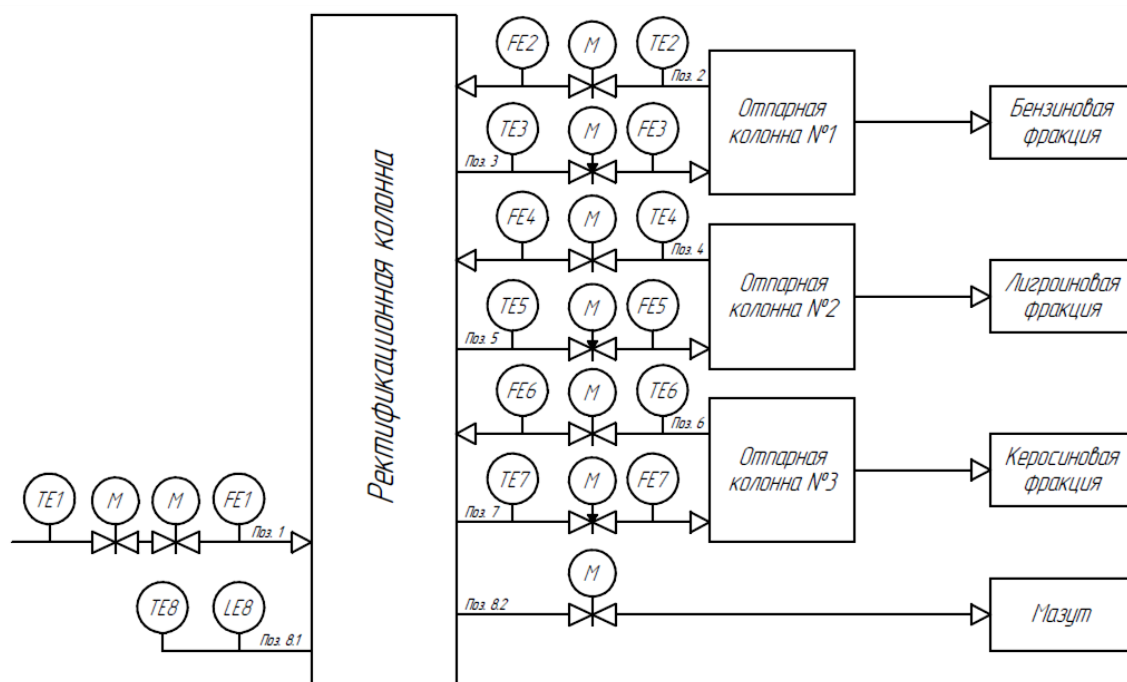


Рис. 2. – Функциональная схема автоматизации ректификационной установки

Для кубового остатка (мазута) принято технологическое допущение об отсутствии необходимости в отпарной обработке, что обосновано следующими факторами:

- минимизация энергетических потерь при выводе его из системы;
- продолжительный временной контакт с паровой фазой в нижней части колонны, что обеспечивает максимальное выделение низкокипящего компонента (НКК) и их по-

следующее использование для насыщения других фракций в колонне.

### 3. Теоретические основания и допущения при разработке модели ректификационной колонны

Разрабатываемая математическая модель строится на оценке материального баланса вещества и имеет ряд допущений:

1. *Распределение температурного поля.* Принято допущение о равномерном рас-

пределении температуры по высоте колонны с четкими температурными зонами отбора фракций. В реальных условиях существует температурный градиент, однако для упрощения модели принято, что отбор бензиновой фракции происходит при постоянной температуре  $T_1$ , отбор лигроиновой фракции при  $T_2$ , отбор керосиновой фракции при  $T_3$ . При этом температурой отбора кубового остатка принято считать максимальную температуру низа колонны.

2. *Конфигурация отпарных секций.* Модель учитывает наличие отпарных колонн для каждой из фракций, кроме мазута, поскольку длительное пребывание мазута в нижней части колонны позволяет массообменным процессам протекать максимально эффективно. Естественное насыщение восходящих потоков не требует дополнительной отпарки.

3. *Идеализация массообмена.* Для упрощения расчетов принято постоянство нагрузок по сырью, неизменность температурного режима, а также стабильность давления в колонне.

Принятые допущения позволяют сократить вычислительную сложность модели, а также сохранить адекватность описания ключевых технологических параметров.

Ректификационная колонна представляет собой ключевой аппарат процесса разделения нефтяного сырья на фракции, работа которого основана на разнице температур кипения компонентов. Для обеспечения гибкого управления технологическим процессом и точного отбора целевых фракций (бензина, лигроина, керосина) система оснащается запорно-регулирующей арматурой, в частности – клапанами.

В случае, если степень открытия клапанов на каждой из фракций 100 %:

- отбор каждой фракции (бензин, лигроин, керосин) осуществляется строго в соответствии с предустановленным процент-

ным соотношением, определяемым химическим составом перерабатываемой нефти.

Если степень открытия клапанов отличается от 100 %, тогда:

- неотобранная часть фракции задерживается в колонне, где подвергается дополнительному насыщению за счет взаимодействия с восходящими потоками;

- перераспределение «избыточного» сырья между соседними фракциями происходит пропорционально их базовому процентному соотношению в химическом составе нефти;

- остаточная часть, не вошедшая в соседние фракции, автоматически перенаправляется в мазутную фракцию.

Таким образом может быть получена система уравнений (1).

$$\begin{cases} F_1 = F_0 \cdot a_1 \cdot \sigma_1 \\ F_2 = F_0 \cdot a_2 \cdot \sigma_2 \\ F_3 = F_0 \cdot a_3 \cdot \sigma_3 \\ F_4 = F_0 - F_1 - F_2 - F_3 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $F_0, F_1, F_2, F_3, F_4$  – объемный расход на входе в РК и на выходе бензиновой, лигроиновой, керосиновой и мазутной фракций соответственно ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – весовые коэффициенты фракций, определяемые химическим составом (% / 100);  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – степень открытия клапана на выходе с РК (% / 100).

Данная система уравнений не обеспечивает перераспределение фракций между собой в случае регулирования степени открытия клапанов. В данном случае нераспределенное сырье будет перенаправлять в мазут, что не достаточно достоверно отражает суть процесса. Для реализации поставленной задачи уравнение по каждой из фракции (кроме фракции мазута) примет следующий вид (2):

$$\begin{cases} F_1 = F_0 \cdot a_1 \cdot \sigma_1 + F_0 \cdot a_2 \cdot (1 - \sigma_2) \cdot a_1 + F_0 \cdot a_3 \cdot (1 - \sigma_3) \cdot a_1 \\ F_2 = F_0 \cdot a_2 \cdot \sigma_2 + F_0 \cdot a_1 \cdot (1 - \sigma_1) \cdot a_2 + F_0 \cdot a_3 \cdot (1 - \sigma_3) \cdot a_2 \\ F_3 = F_0 \cdot a_3 \cdot \sigma_3 + F_0 \cdot a_1 \cdot (1 - \sigma_1) \cdot a_3 + F_0 \cdot a_2 \cdot (1 - \sigma_2) \cdot a_3 \\ F_4 = F_0 - F_1 - F_2 - F_3 \end{cases}. \quad (2)$$

На основании полученной системы уравнений выполнено моделирование системы в среде разработки SimInTech.

#### 4. Разработка математической модели в SimInTech

*Субмодель расчета выходной фракции без учета нераспределенных фракций*

Данная структура предназначена для расчета объема фракции, поступающей на отбор в зависимости от степени открытия клапана, также для определения нераспределенного остатка, который перенаправляется в другие секции колонны или мазутную фракцию.

Основное уравнение для выходной фракции:

$$F_n = F_0 \cdot a_n \cdot \sigma_n,$$

где  $F_n$  – объемный расход на выходе РК  $n$ -й фракции (без учета нераспределенных фракций) ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $a_n$  – весовой коэффициент  $n$ -й фракции (% / 100);  $\sigma_n$  – степень открытия клапана на выходе с РК  $n$ -й фракции (% / 100).

Расчет нераспределенного остатка  $n$ -й фракции:

$$F_m = F_0 \cdot a_n - F_n,$$

где  $F_m$  – объемный расход на выходе РК нераспределенного остатка  $n$ -й фракции ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ).

Математическая модель блока расчета выхода фракции (без учета других фракций), реализованная в SimInTech, представлена на рис. 3.

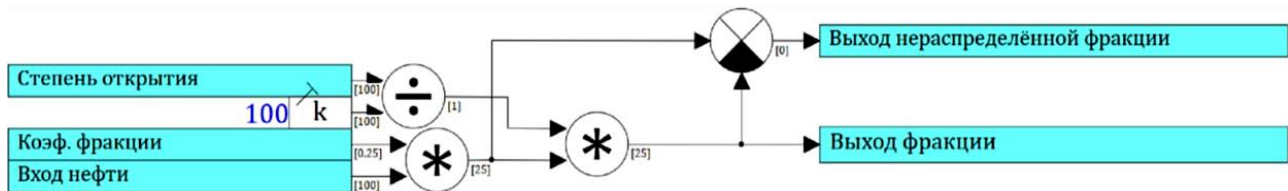


Рис. 3. Модель блока для расчета выхода  $n$ -й фракции (без учета других фракций)

*Субмодель перерасчета выходной фракции с учетом других нераспределенных фракций*

Основное уравнение:

$$F_N = F_n + \sum F_i \cdot \sigma_n \cdot a_n,$$

где  $F_i$  – объемный расход нераспределенного остатка от  $i$ -й фракции ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ).

Математическая модель блока перерасчета выходной фракции, реализованная в SimInTech, представлена на рис. 4.

На основании разработанных субмоделей создана интегрированная система автоматического расчета фракционного состава. Принцип работы системы основан на каскадной обработке потоков, где выход одной субмодели становится входом для другой, а автоматический перерасчет всех фракций происходит при изменении: степени открытия клапанов, состава исходного сырья и коэффициентов перераспределения. Модель расчета фракционного состава представлена на рис. 5.

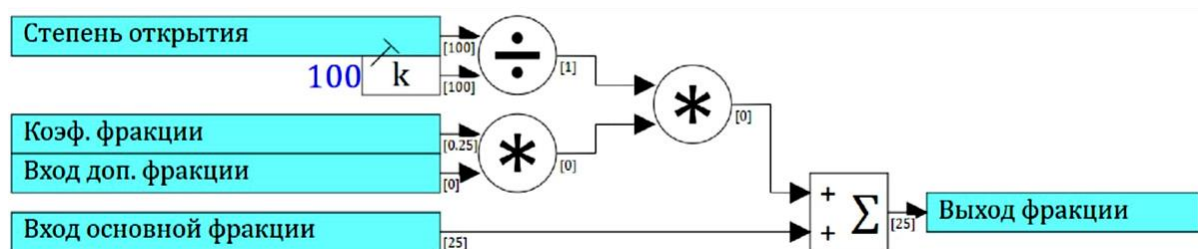


Рис. 4. Модель блока перерасчета выходной фракции



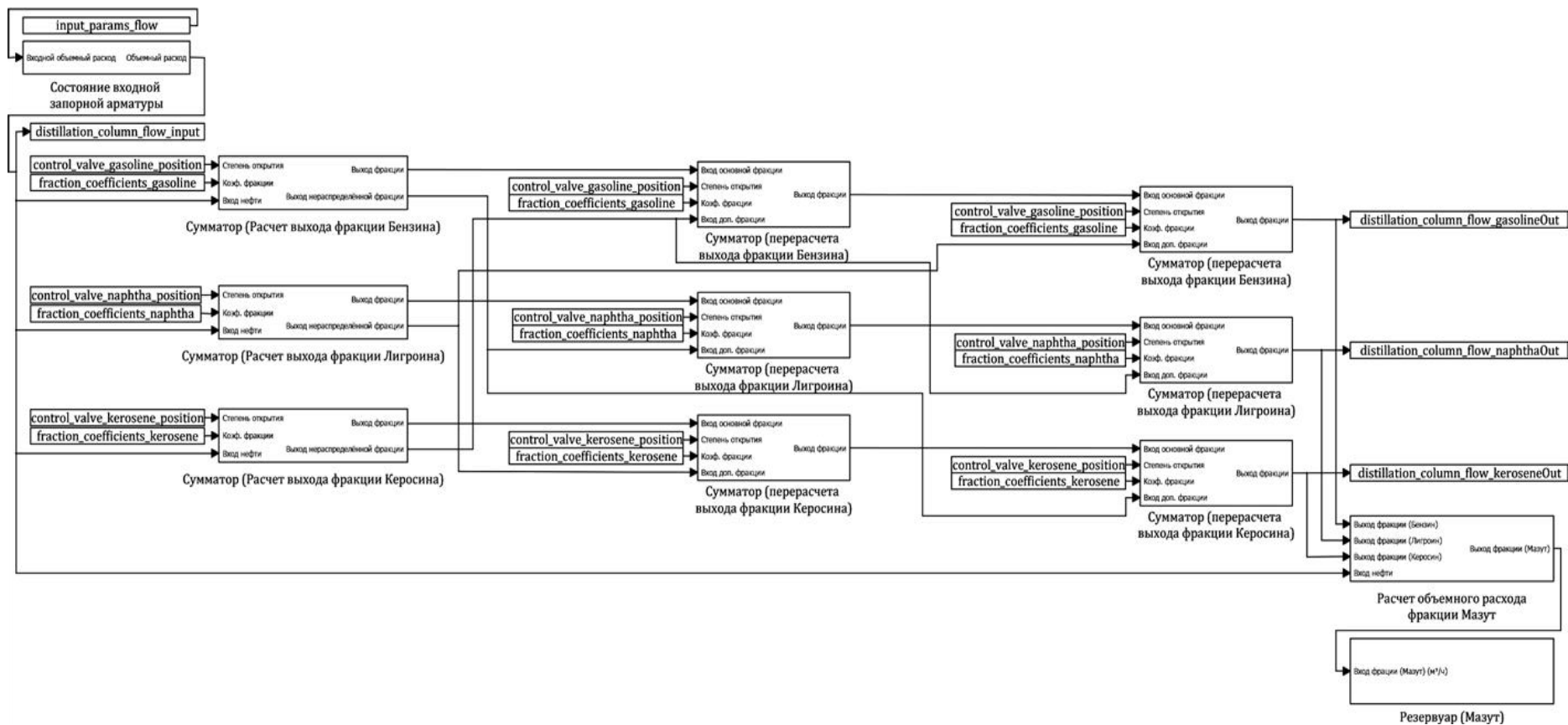


Рис. 5. Модель РК для расчета фракционного состава

## 5. Программная реализация системы управления

Программное обеспечение системы управления ректификационной колонной было реализовано на языке Structured Text (ST) в среде разработки CoDeSys. Архитектура программы построена по модульному принципу, что обеспечивает четкое разделение функциональности и упрощает сопровождение кода. Ключевым элементом системы является алгоритм обработки аварийных ситуаций, который непрерывно отслеживает состояние критически важного оборудования. Данный модуль выполняет комплексную диагностику, включая проверку состояний входных задвижек (`gateValveInput1_fault`, `gateValveInput2_fault`), исправности нагревателя (`heater_fault`), а также задвижек и регулирующих клапанов на линиях отбора фракций.

При обнаружении нештатной ситуации алгоритм присваивает уникальный код ошибки (`faultCode` в диапазоне 1-10), определяет ее приоритет (`priorityFault`) и инициирует соответствующий протокол безопасного останова через вызов специализированных функций-обработчиков.

Важнейшим технологическим контуром является управление нагревателем, от которого зависит запуск и поддержание стабильного температурного режима в колонне. Алгоритм обеспечивает автоматическое включение нагрева при снижении температуры ниже установленного минимума (`minTemp`) и его отключение при достижении верхнего допустимого предела (`maxTemp`), реализуя тем самым двухпозиционное регулирование с гистерезисом для предотвращения частых переключений. Логика управления дополнена системой контроля уровня мазута в кубе колонны. Этот модуль реализует двухпозиционное управление задвижкой сброса: при превышении максимального уровня активируется команда на открытие (`gateValveFuelOil_open`), что инициирует сброс излишков, а при падении уровня ниже минимальной отметки пода-

ется команда на закрытие (`gateValveFuelOil_close`), прекращая дренаж и позволяя уровню восстановиться.

Центральным звеном системы выступает главная программа управления, построенная на основе методологии конечных автоматов. Данный подход гарантирует однозначность переходов между состояниями системы и строгую последовательность выполнения технологических операций. Алгоритм последовательно вызывает ключевые функции: `fault_cycle()` для мониторинга аварий, `heater()` для регулирования температуры и `fuel_oil_drop()` для управления уровнем мазута. Запуск технологического процесса осуществляется только при одновременном выполнении ряда условий: наличии команды `start`, отсутствии аварийных сигналов (`fault = 0`) и ошибок запуска (`failureStart = 0`), а также при достижении минимальной рабочей температуры нагревателем (`tempSensor_heater > minWorkTemp`). После проверки всех условий выполняется каскадное открытие исполнительных механизмов: сначала активируются входные задвижки, и только после подтверждения их открытия (`gateValveInput1_opened`, `gateValveInput2_opened`) система разрешает открытие задвижек на выходе отпарных колонн для всех фракций, что обеспечивает безопасный и последовательный ввод установки в рабочий режим.

## 6. Интеграция SCADA-системы с системой управления

В рамках реализации системы автоматизированного управления ректификационной колонной была выполнена разработка операторского интерфейса в среде MasterSCADA 4D. Созданный интерфейс АРМ оператора обеспечивает визуализацию технологического процесса, контроль параметров работы установки и возможность оперативного вмешательства в процесс управления. Визуальное представление главного окна разработанного интерфейса приведено на рис. 6-8.

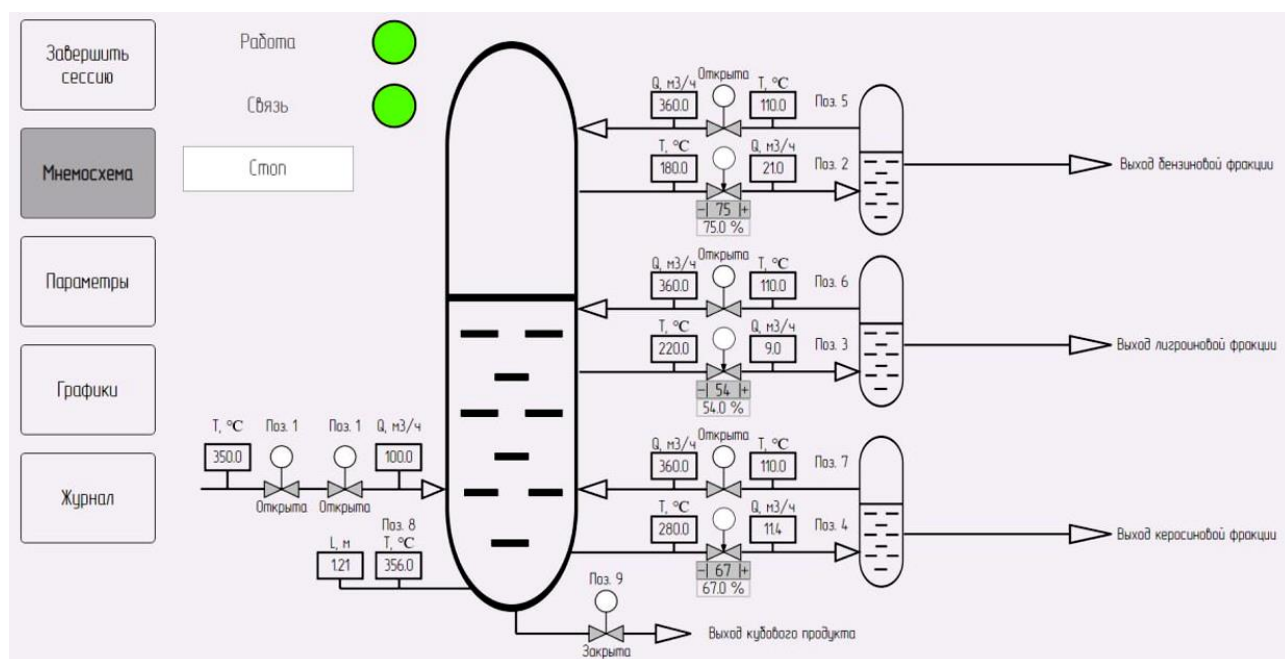


Рис. 6. Внешний вид главного окна АРМ оператора ПК

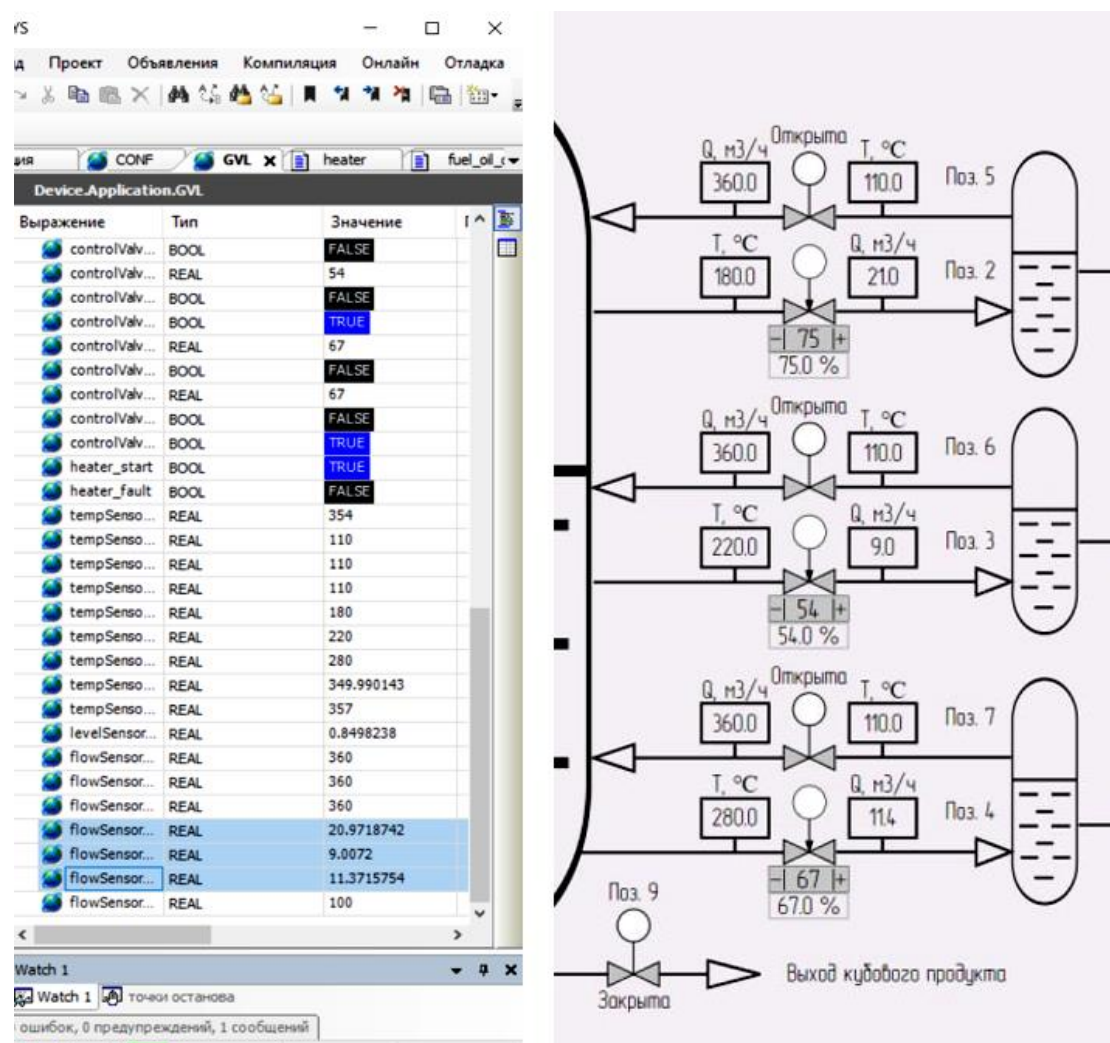


Рис. 7. Соответствие передаваемых параметров

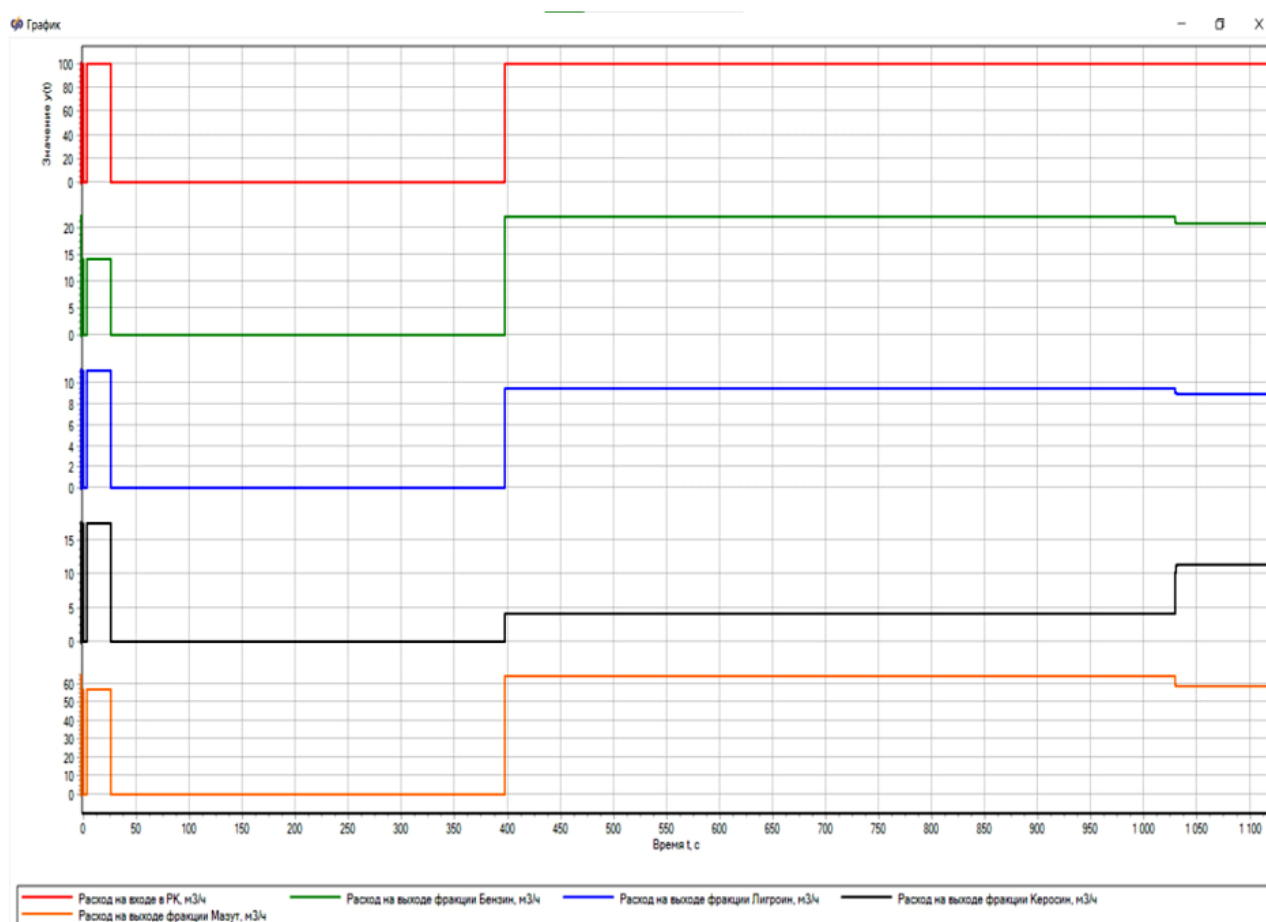


Рис. 8. Соответствие передаваемых параметров

Для обеспечения корректного обмена данными между SCADA-системой и контроллером, программируемым в CoDeSys, был выполнен комплекс настроечных мероприятий:

1) определение сетевых параметров: получение IP-адреса сетевого адаптера через системную консоль, учет особенностей работы MasterSCADA;

2) конфигурация подключения: установка параметров сетевого соединения, настройка протокола обмена данными, определение временных характеристик опроса;

3) работа с тегами (переменными): импорт тегов из среды CoDeSys, верификация соответствия передаваемых значений, настройка прав доступа для различных категорий пользователей.

### Выводы

Проведенная работа позволила разработать и верифицировать комплексный подход

к построению системы автоматизации технологического процесса атмосферной ректификации. В результате анализа объекта управления была сформирована функциональная схема, идентифицировавшая необходимый набор контрольно-измерительных приборов и исполнительных устройств.

Практическая реализация системы управления подтвердила корректность выбранной архитектуры на базе программируемого логического контроллера. Настройка конфигурации ПЛК в среде CoDeSys v3.5, включая организацию обмена данными с модулями ввода-вывода по промышленному протоколу Modbus TCP, обеспечила требуемую надежность сбора телеметрии и формирования управляющих воздействий. Разработанные программные алгоритмы, в особенности логика обработки аварийных ситуаций и каскадного пуска, продемонстрировали свою функциональную полноту и устойчивость.

Существенным результатом является создание диспетчерского интерфейса в среде MasterSCADA 4D, который интегрирован с низкоуровневой системой управления. Данный интерфейс предоставляет оператору инструменты для визуального контроля состояния технологического процесса, вмешательства в его ход и анализа заархивированных параметров. Обеспечение связи между SCADA-системой и контроллером в реальном времени создает целостный информационно-управляющий контур.

Таким образом, представленные решения в совокупности формируют готовую методику для автоматизации типовых ректификационных установок. Разработанная система не только решает задачи текущего контроля и управления, но и обладает потенциалом для дальнейшего развития, такого как внедрение адаптивных систем поддержки принятия оперативных решений и предиктивного анализа технологических режимов.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 6 (Ч. 2). С. 217-218. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11652>.

2. **Волосов И.В., Леденев С.М.** Совершенствование установки первичной переработки нефти // Наука, техника и образование. 2017. № 5 (35). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovaniye-ustanovki-pervichnoy-pererabotki-nefti>.

3. Капустин В.М. Технология переработки нефти. Ч. 1. Первичная переработка нефти. Москва: КолосС, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. 459 с. (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений).

**Стоянова Анастасия Владимировна** – инженер НИЛ «Испытания электроприводов» Новосибирского государственного технического университета

**Попов Никита Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета

**Домахин Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета

**Попов Матвей Сергеевич** – студент 4-го курса факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета

**Anastasia V. Stoyanova** – Engineer at the Research Laboratory for Electric Drive Testing of the Novosibirsk State Technical University

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

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

**Matvey S. Popov** – Undergraduate student, Faculty of Mechatronics and Automation, Novosibirsk State Technical University

*Статья поступила в редакцию 12.11.25, принята к опубликованию 15.12.25*

УДК 621.3.078

# ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ С РАЗДЕЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ МАГНИТОВ

**В.Д. Костюков, Г.А. Крылов, А.В. Стариков**

## DISCRETE MATHEMATICAL MODEL OF A DIGITAL CONTROL SYSTEM FOR AN ELECTROMAGNETIC BEARING WITH SEPARATE VOLTAGE CONTROL OF OPPOSITE MAGNETS

**V.D. Kostyukov, G.A. Krylov, A.V. Starikov**

*В статье рассматривается цифровая система управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений противоположных магнитов. Приведены функциональные схемы как самой системы управления, так и регулятора, включенного в каждый канал регулирования напряжения. Приведены также структурные схемы цифровой системы с учетом квантования сигналов по времени. Составлены уравнения движения цифровой системы управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений. Найдена дискретная передаточная функция цифровой системы управления, связывающая изображение перемещения ротора в поле электромагнитов с изображением сигнала задания. Приведен пример применения полученной дискретной передаточной функции для определения устойчивости и показателей качества регулирования в зависимости от периода дискретизации по времени.*

**Ключевые слова:** электромагнитный подшипник, цифровая система управления, дискретная передаточная функция, квантование по времени

*The article discusses a digital control system for an electromagnetic bearing with separate voltage regulation of opposite magnets. The functional diagrams of both the control system itself and the regulator included in each voltage regulation channel are presented. The structural schemes of the digital system are also given, taking into account the quantization of signals over time. The equations of motion of a digital control system for an electro-magnetic bearing with separate voltage regulation are compiled. A specific transfer function of the digital control system has been found, connecting the image of the rotor movement in the field of electromagnets with the image of the task signal. An example of application of the obtained discrete transfer function is given to determine stability and quality indicators of regulation depending on the sampling period over time.*

**Keywords:** electromagnetic bearing, digital control system, discrete transfer function, time quantization

### **Введение**

Система управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений противоположных

магнитов (рис. 1) позволяет повысить быстродействие и жесткость подшипника [1, 2]. Она содержит датчик положения ротора, два регулятора, два силовых пре-

образователя, первый и второй электромагниты ЭМ1 и ЭМ2 и блок задания смещения ротора. Каждый из регуляторов 1 и 2 может быть представлен совокупностью интегрального (И), пропорционального (П) и пропорционально-дифференциального (ПД) регуляторов и дифференцирующего звена с соответствующими связями (рис. 2) [2]. При этом предполагается, что рассматриваемая система управления электромагнитным подшипником принципиально является

цифровой, а регуляторы выполнены программно.

Целью проводимого исследования является разработка дискретной математической модели предлагаемой двухканальной системы управления электромагнитным подшипником, позволяющей на этапе проектирования определить требования к величине периода замыкания программного цикла (периода дискретизации) и вычислительной мощности контроллера или микроконтроллера.

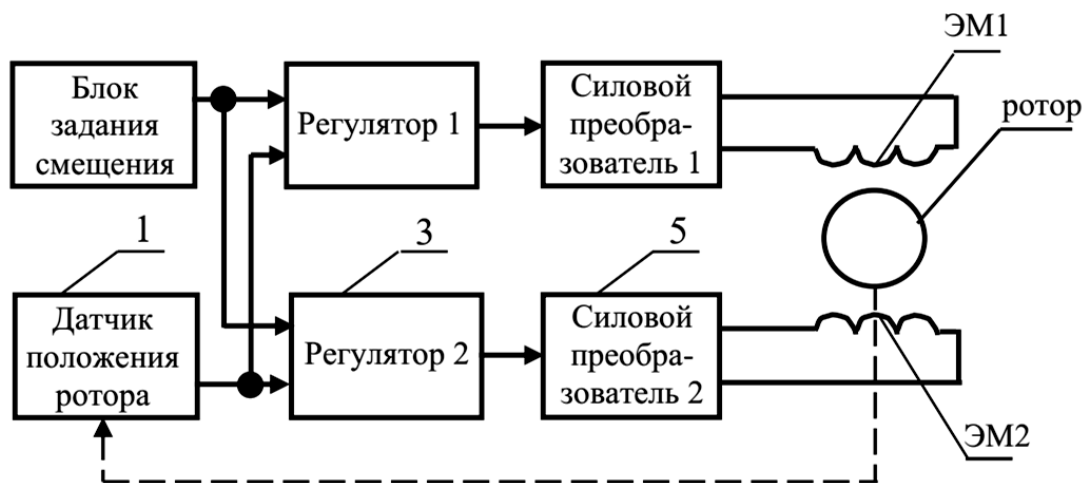


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемой системы управления электромагнитным подшипником

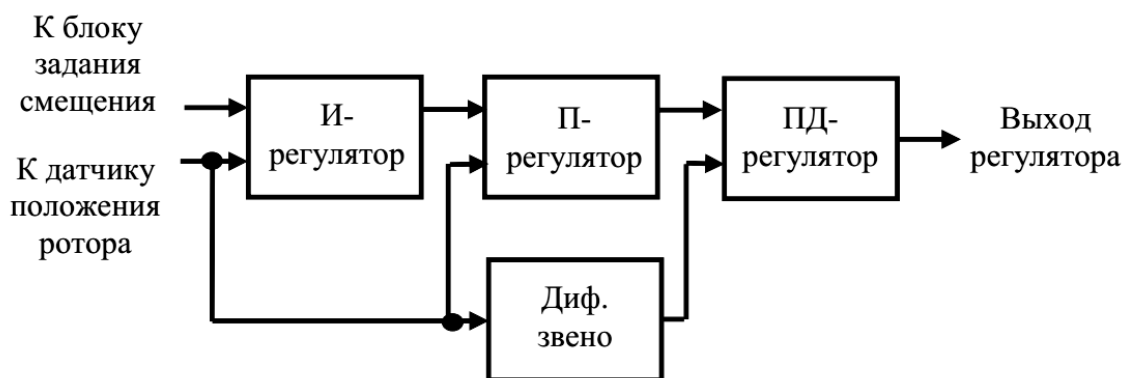


Рис. 2. Функциональная схема регулятора

### Решение задачи

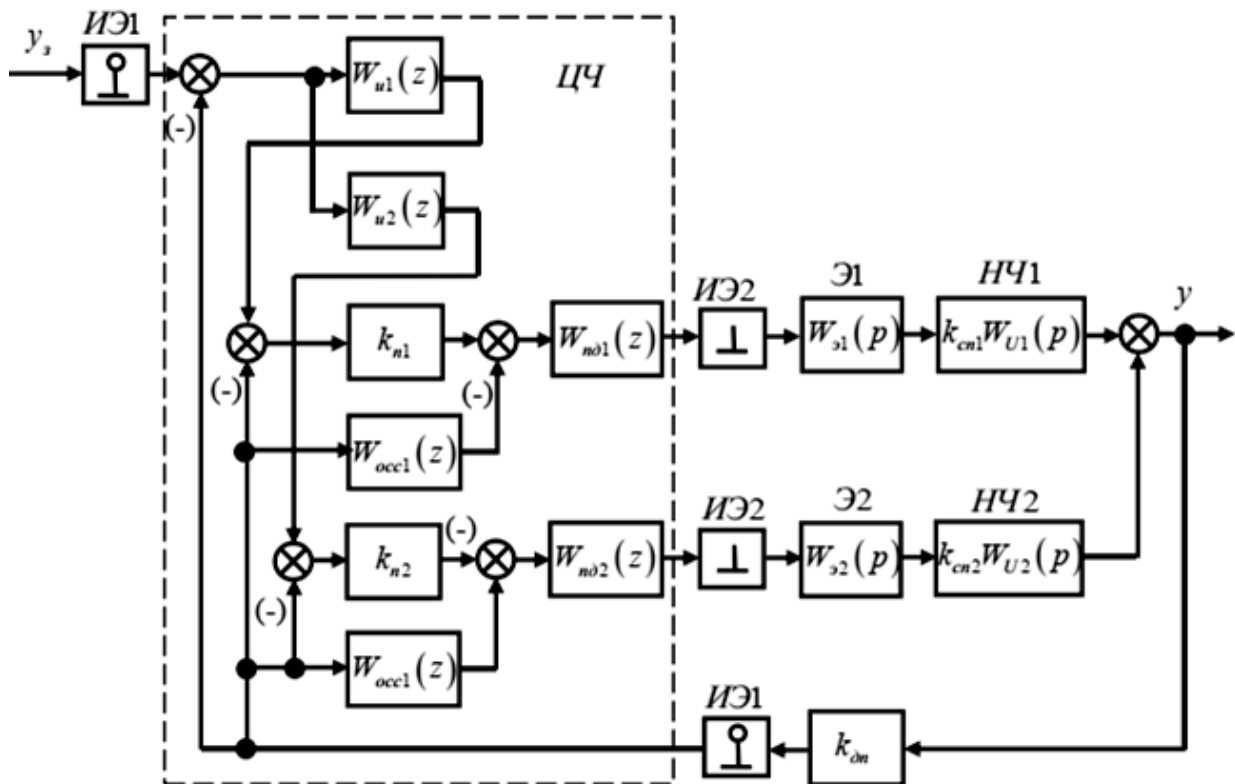
С учетом квантования по времени структурная схема системы с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов принимает следующий вид (рис. 3). Эффект квантования по времени отражают импульсные элементы ИЭ1, которые превращают непре-

рывный сигнал задания и обратной связи по перемещению ротора в решетчатую функцию. В цифровую часть ЦЧ системы входят два комплекта регуляторов, предназначенных для регулирования напряжений на каждом электромагните. Эти регуляторы представлены дискретными передаточными функциями  $W_{nd1}(z)$ ,  $W_{nd2}(z)$ ,



$k_{n1}$ ,  $k_{n2}$ ,  $W_{u1}(z)$  и  $W_{n02}(z)$ . В непрерывную часть НЧ системы входят два силовых преобразователя, электромагниты и собственно процесс перемещения ротора под действием сил, развиваемых электромагнитами. Непрерывная часть разделена на две составляющие НЧ1 и НЧ2. В НЧ1 входит силовой преобразователь верхнего электромагнита с коэффициентом передачи  $k_{cn1}$  и соответствующая непрерывная

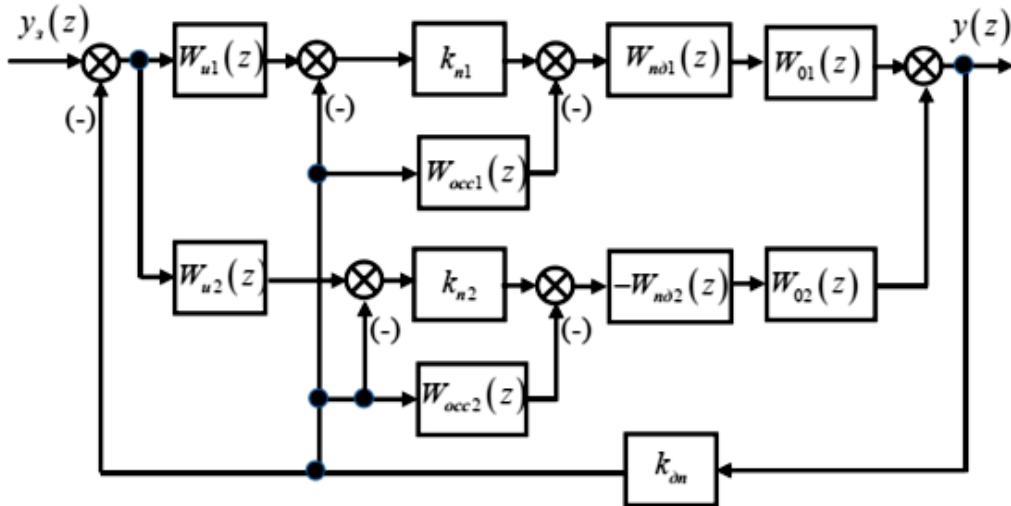
передаточная функция  $W_{U1}(p)$ , связывающая перемещение ротора  $y$  с напряжением  $U_1$  на первом магните. Во вторую составляющую непрерывной части НЧ2 входят второй силовой преобразователь с коэффициентом передачи  $k_{cn2}$  и нижний электромагнит с передаточной функцией  $W_{U2}(p)$ , связывающей перемещение ротора  $y$  с напряжением  $U_2$  на первом магните.



**Рис. 3.** Структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений противоположных магнитов с учетом процесса квантования по времени

Силовые преобразователи выполняют также функции экстраполяторов нулевого порядка Э1 и Э2, которые сигналы с цифровой части системы запоминают такт периода дискретизации (периода квантования). Для представления экстраполяторов в виде передаточных функций  $W_{s1}(p)$  и  $W_{s2}(p)$  в систему формально введены импульсные элементы ИЭ2, преобразующие дискретные последовательности цифровых кодов с регуляторов в последовательности  $\delta$ -функций [3].

При переходе к дискретным передаточным функциям структурная схема рассматриваемой цифровой системы управления электромагнитным подшипником будет выглядеть следующим образом (рис. 4). Здесь  $W_{01}(z)$  и  $W_{02}(z)$  – дискретные передаточные функции непрерывной части системы с учетом экстраполяторов нулевого порядка. В соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 4, составим ее уравнения движения рассматриваемой цифровой системы управления электромагнитным подшипником:



**Рис. 4.** Структурная схема рассматриваемой цифровой системы управления электромагнитным подшипником при переходе к дискретным передаточным функциям

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(z) &= y_3(z) - k_{on}y(z); \\ N_{u1}(z) &= W_{u1}(z)\varepsilon(z); \\ \varepsilon_3(z) &= N_{u1}(z) - k_{on}y(z); \\ N_{n1}(z) &= k_{n1}\varepsilon_3(z); \\ \varepsilon_1(z) &= N_{n1}(z) - k_{on}W_{occ1}(z)y(z); \\ N_{n01}(z) &= W_{n01}(z)\varepsilon_1(z); \\ y_1(z) &= W_{01}(z)N_{n01}(z); \\ N_{u2}(z) &= W_{u2}(z)\varepsilon(z); \\ \varepsilon_4(z) &= N_{u2}(z) - k_{on}y(z); \\ N_{n2}(z) &= k_{n2}\varepsilon_4(z); \\ \varepsilon_2(z) &= N_{n2}(z) - k_{on}W_{occ2}(z)y(z); \\ N_{n02}(z) &= W_{n02}(z)\varepsilon_2(z); \\ y_2(z) &= -W_{02}(z)N_{n02}(z); \\ y(z) &= y_1(z) + y_2(z), \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $N_{u1}(z)$  и  $N_{u2}(z)$  – изображения выходных сигналов первого и второго интегральных регуляторов;  $N_{n1}(z)$  и  $N_{n2}(z)$  – изображения выходных сигналов первого и второго пропорциональных регуляторов;  $N_{n01}(z)$  и  $N_{n02}(z)$  – изображения выходных сигналов первого и второго пропорционально-дифференциальных регуляторов;  $\varepsilon(z)$ ,  $\varepsilon_1(z)$ ,  $\varepsilon_2(z)$ ,  $\varepsilon_3(z)$  и  $\varepsilon_4(z)$  – изображения сигналов рассогласования на входе регуляторов;  $z = e^{pT}$ ;  $p$  – комплексная переменная;  $T$  – период дискретизации (период замыкания программного цикла).

Исключая последовательно из (1) промежуточные переменные  $N_{n01}(z)$ ,  $N_{n02}(z)$ ,  $\varepsilon(z)$ ,  $\varepsilon_1(z)$ ,  $\varepsilon_2(z)$ ,  $\varepsilon_3(z)$ ,  $\varepsilon_4(z)$ ,  $N_{n1}(z)$ ,  $N_{n2}(z)$ ,  $N_{u1}(z)$ ,  $N_{u2}(z)$ ,  $y_1(z)$  и  $y_2(z)$ , получим уравнение, связывающее изображение  $y(z)$  с  $y_3(z)$

$$\begin{aligned} & [1 + k_{on}k_{n1}W_{u1}(z)W_{n01}(z)W_{01}(z) + k_{on}k_{n1}W_{n01}(z)W_{01}(z) + k_{on}W_{occ1}(z)W_{n01}(z)W_{01}(z) - \\ & - k_{on}k_{n2}W_{u2}(z)W_{n02}(z)W_{02}(z) - k_{on}k_{n2}W_{n02}(z)W_{02}(z) - k_{on}W_{occ2}(z)W_{n02}(z)W_{02}(z)]y(z) = \\ & = [k_{n1}W_{u1}(z)W_{n01}(z)W_{01}(z) - k_{n2}W_{u2}(z)W_{n02}(z)W_{02}(z)]y_3(z) \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) следует дискретная передаточная функция цифровой системы управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений противоположных магнитов:

$$W_{эм}(z) = \frac{y(z)}{y_3(z)} = \frac{k_{n1}W_{u1}(z)W_{n01}(z)W_{01}(z) - k_{n2}W_{u2}(z)W_{n02}(z)W_{02}(z)}{1 + k_{on}k_{n1}W_{u1}(z)W_{n01}(z)W_{01}(z) + k_{on}k_{n1}W_{n01}(z)W_{01}(z) + k_{on}W_{occ1}(z)W_{n01}(z)W_{01}(z) - k_{on}k_{n2}W_{u2}(z)W_{n02}(z)W_{02}(z) - k_{on}k_{n2}W_{n02}(z)W_{02}(z) - k_{on}W_{occ2}(z)W_{n02}(z)W_{02}(z)} \quad (3)$$

В формулу (3) входят дискретные передаточные функции интегральных  $W_{u1}(z)$ ,  $W_{u2}(z)$  и пропорционально-дифференциальных  $W_{nd1}(z)$ ,  $W_{nd2}(z)$  регуляторов и обратных связей по скорости  $W_{occ1}(z)$ ,  $W_{occ2}(z)$ , вид которых зависит от алгоритмов вычисления интегралов и производных. Если в программном обеспечении цифровой системы управления электромагнитным подшипником интегралы вычисляются как полная сумма, а производные как первая обратная разность, то эти передаточные функции будут иметь вид

$$W_{nd1}(z) = \frac{b_{06}z + b_{16}}{z}, \quad (4)$$

$$W_{occ1}(z) = \frac{b_{07}z + b_{17}}{z}, \quad (5)$$

$$W_{u1}(z) = \frac{b_{08}z}{z-1}, \quad (6)$$

$$W_{nd2}(z) = \frac{b_{09}z + b_{19}}{z}, \quad (7)$$

$$W_{эм}(z) = \frac{y(z)}{y_э(z)} = \frac{b_{012}z^6 + b_{112}z^5 + b_{212}z^4 + b_{312}z^3 + b_{412}z^2}{z^7 + a_{112}z^6 + a_{212}z^5 + a_{312}z^4 + a_{412}z^3 + a_{512}z^2 + a_{612}z + a_{712}}, \quad (10)$$

где

$$b_{012} = k_{n1}b_{08}b_{06}b_{04} - k_{n2}b_{011}b_{09}b_{05}; \quad b_{112} = k_{n1}b_{08}(b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04}) - k_{n2}b_{011}(b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05});$$

$$b_{212} = k_{n1}b_{08}(b_{06}b_{24} + b_{16}b_{14}) - k_{n2}b_{011}(b_{09}b_{25} + b_{19}b_{15});$$

$$b_{312} = k_{n1}b_{08}(b_{06}b_{34} + b_{16}b_{24}) - k_{n2}b_{011}(b_{09}b_{35} + b_{19}b_{25}); \quad b_{412} = k_{n1}b_{08}b_{16}b_{34} - k_{n2}b_{011}b_{19}b_{35};$$

$$a_{112} = a_{14} - 1 + k_{on}[b_{06}b_{04}(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) - b_{09}b_{05}(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010})];$$

$$a_{212} = a_{24} - a_{14} + k_{on}[b_{06}b_{04}(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + (b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04})(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) - b_{09}b_{05}(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - (b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05})(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010})];$$

$$a_{312} = a_{34} - a_{24} + k_{on}[-b_{06}b_{04}b_{17} + (b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04})(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + (b_{06}b_{24} + b_{16}b_{14})(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) + b_{09}b_{05}b_{110} - (b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05})(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - (b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05})(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - (b_{09}b_{25} + b_{19}b_{15})(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010})];$$

$$a_{412} = a_{44} - a_{34} + k_{on}[-b_{17}(b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04}) + (b_{06}b_{24} + b_{16}b_{14})(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + (b_{06}b_{34} + b_{16}b_{24})(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) + b_{110}(b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05}) - (b_{09}b_{25} + b_{19}b_{15}) \times (b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - (b_{09}b_{35} + b_{19}b_{25})(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010})];$$

$$W_{occ2}(z) = \frac{b_{010}z + b_{110}}{z}, \quad (8)$$

$$W_{u2}(z) = \frac{b_{011}z}{z-1}, \quad (9)$$

где

$$b_{06} = \frac{k_{nd1}(T_{nd1} + T)}{T}; \quad b_{16} = -\frac{k_{nd1}T_{nd1}}{T};$$

$$b_{07} = \frac{k_{occ1}}{T}; \quad b_{17} = -\frac{k_{occ1}}{T}; \quad b_{08} = \frac{T}{T_{u1}};$$

$$b_{09} = \frac{k_{nd2}(T_{nd2} + T)}{T}; \quad b_{19} = -\frac{k_{nd2}T_{nd2}}{T};$$

$$b_{010} = \frac{k_{occ2}}{T}; \quad b_{110} = -\frac{k_{occ2}}{T}; \quad b_{011} = \frac{T}{T_{u2}}.$$

Подставляя (4)-(9) в (3), получим окончательный вариант дискретной передаточной функции цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов:

$$\begin{aligned}
 a_{512} = & -a_{44} + k_{\partial n} \left[ -b_{17} (b_{06} b_{24} + b_{16} b_{14}) + (b_{06} b_{34} + b_{16} b_{24}) (b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + \right. \\
 & + b_{16} b_{34} (k_{n1} b_{08} + k_{n1} + b_{07}) + b_{110} (b_{09} b_{25} + b_{19} b_{15}) - \\
 & \left. - (b_{09} b_{35} + b_{19} b_{25}) (b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - b_{19} b_{25} (k_{n2} b_{011} + k_{n2} + b_{010}) \right] \\
 a_{612} = & k_{\partial n} \left[ -b_{17} (b_{06} b_{34} + b_{16} b_{24}) + b_{16} b_{34} (b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + \right. \\
 & + b_{110} (b_{09} b_{35} + b_{19} b_{25}) - b_{19} b_{35} (b_{110} - b_{010} - k_{n2}) \left. \right] ; \\
 a_{712} = & k_{\partial n} \left[ -b_{17} b_{16} b_{34} + b_{110} b_{19} b_{35} \right] ;
 \end{aligned}$$

$b_{04}$ ;  $b_{14}$ ;  $b_{24}$ ;  $b_{34}$ ;  $a_{14}$ ;  $a_{24}$ ;  $b_{34}$ ;  $a_{44}$ ;  $b_{05}$ ;  $b_{15}$ ;  $b_{25}$  и  $b_{35}$  – коэффициенты передаточных функций  $W_{01}(z)$  и  $W_{02}(z)$ , определяемые по формулам, приведенным в [4].

Передаточная функция (10) позволяет на этапе проектирования определить требования к периоду замыкания программного цикла, который фактически является периодом дискретизации по времени  $T$ , и к вычислительной мощности контроллера или микроконтроллера, на котором планируется техническая реализация системы управления электромагнитного подшипника.

#### Пример применения полученной дискретной передаточной функции

Рассмотрим пример цифровой системы управления радиальным электромагнит-

ным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов применительно к нагнетателю газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16. При этом будем считать, что  $y_0 = 165$  мкм,  $k_{FI} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$  Нм<sup>2</sup>/А<sup>2</sup>,  $T_1 = 0,078$  с,  $T_2 = 0,0499$  с,  $R_1 = R_2 = 1,7$  Ом,  $k_{Fy} = 2,75 \cdot 10^7$  Н/м,  $k_{\partial n} = 10000000$  дискрет/м  $k_{cn1} = k_{cn2} = 0,0015$  В/дискрета, а параметры настроек регуляторов равны  $k_{n1} = k_{n2} = k_{n\partial 1} = k_{n\partial 2} = 2$ ,  $T_{n\partial 1} = 0,234$  с,  $T_{n\partial 2} = 0,15$  с,  $k_{occ1} = k_{occ2} = 0,0032$  с,  $T_{u1} = 0,0046$  с,  $T_{u2} = 0,0048$  с. Тогда при периоде дискретизации по времени  $T = 0,004$  с дискретная передаточная функция (10) принимает следующие численные значения

$$W_{\text{эм}}(z) = \frac{1,474 \cdot 10^{-10} z^6 + 2,9526 \cdot 10^{-10} z^5 - 8,7902 \cdot 10^{-10} z^4 + 2,9076 \cdot 10^{-10} z^3 + 1,4562 \cdot 10^{-10} z^2}{z^7 - 4,8996673 z^6 + 9,968058 z^5 - 10,6826251 z^4 + 6,1782675 z^3 - 1,6146685 z^2 - 0,0171691 z + 0,0678047} \cdot (11)$$

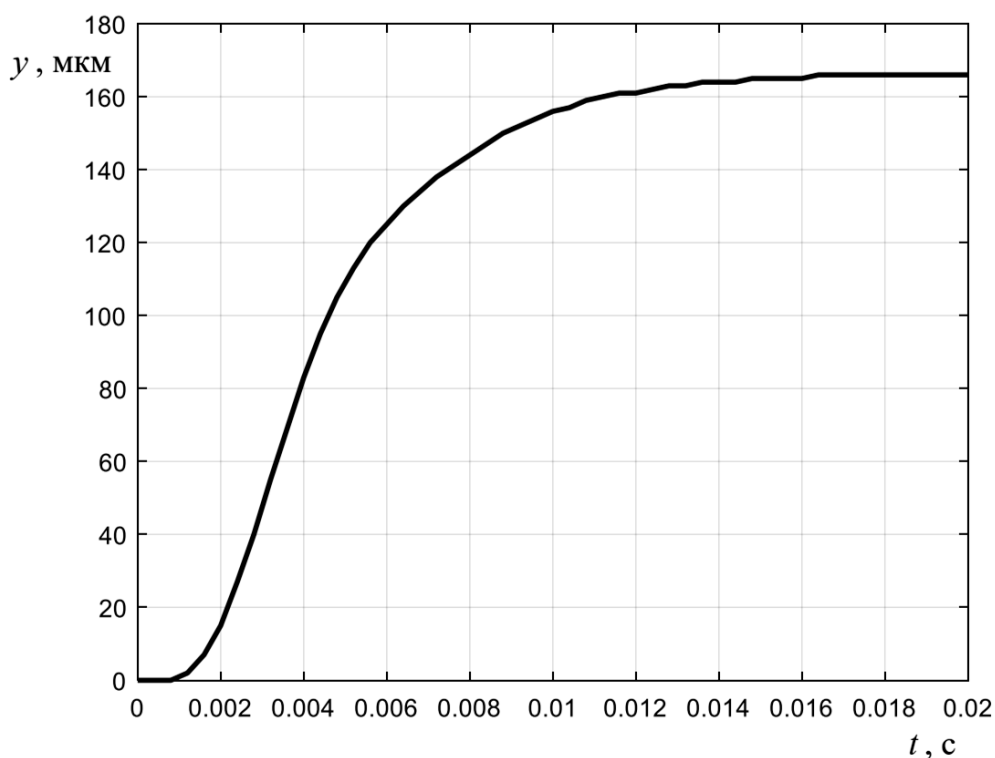
Расчет корней знаменателя передаточной функции (11) в программе MathCAD показывает, что все они имеют модуль меньше 1. Следовательно, при выбранных параметрах регуляторов и периоде замыкания программного цикла  $T = 0,0004$  с цифровая система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов будет устойчива. Действительно, построение графика переходного процесса

в рассматриваемой цифровой системе управления электромагнитным подшипником по передаточной функции (11) подтверждает ее устойчивость (рис. 5).

Кроме того, этот график позволяет также определить ориентировочное значение времени переходного процесса, в данном случае равное 0,0123 с.

В то же время при  $T = 0,001$  с дискретная передаточная функция (10) принимает вид

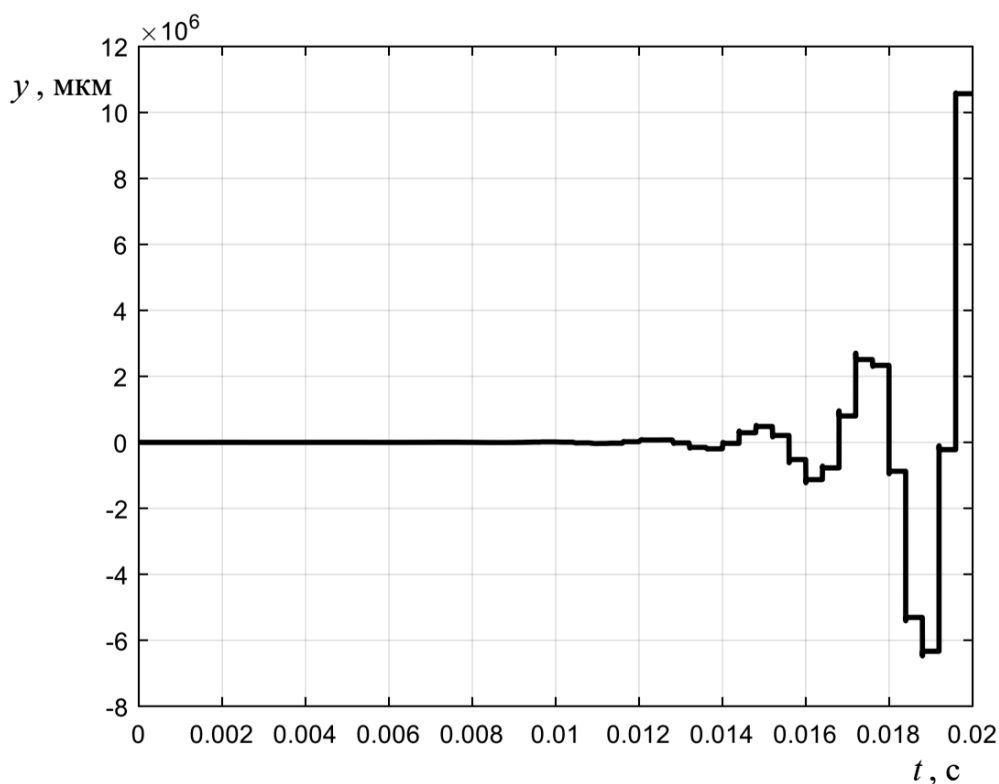
$$W_{\text{эм}}(z) = \frac{2,3048 \cdot 10^{-9} z^6 + 4,6278 \cdot 10^{-9} z^5 - 1,362 \cdot 10^{-8} z^4 + 4,4533 \cdot 10^{-9} z^3 + 2,2358 \cdot 10^{-9} z^2}{z^7 - 4,6658488 z^6 + 10,0262099 z^5 - 12,3232658 z^4 + 8,4621749 z^3 - 2,5603782 z^2 - 0,1054542 z + 0,1665739} \cdot (12)$$



**Рис. 5.** Переходный процесс, построенный по дискретной передаточной функции (11)

Анализ знаменателя в (12) показывает наличие корней с модулем больше 1, следовательно, при  $T = 0,001 \text{ с}$  рассматриваемая цифровая система будет

неустойчивой. Это наглядно показывает график переходного процесса, построенный по передаточной функции (12) (рис. 6).



**Рис. 6.** Переходный процесс, построенный по дискретной передаточной функции (12)

## Выводы

1. Полученная дискретная математическая модель электромагнитного подшипника с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов в виде дискретной передаточной функции позволяет обосновано выбирать период дискретизации по времени исходя из устойчивости и требуемых показателей качества регулирования.

2. Поскольку полученная дискретная передаточная функция подразумевает определенный алгоритм работы цифровых регуляторов, то это позволяет также определить требуемые вычислительные возможности контроллера или микроконтроллера, на котором планируется реализовывать цифровую систему управления электромагнитным подшипником.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент России № 2831082. Система управления электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, В.Д. Костюков (Россия). Оpubл. 02.09.2024. Бюл. № 25.

2. Выбор параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора / В.Д. Костюков, Г.А. Крылов, Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков // Вопросы электротехнологии. 2024. № 4 (45). С. 62-70.

3. Микропроцессорные системы автоматического управления / В.А. Бесекерский, Н.Б. Ефимов, С.И. Зиятдинов и др.; под общ. ред. В.А. Бесекерского. Ленинград: Машиностроение, 1988. 365 с.

4. Дискретная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / В.Д. Костюков, Г.А. Крылов, А.В. Стариков, В.Н. Козловский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 9. С. 186-195.

**Костюков Владислав Дмитриевич** – аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета

**Крылов Григорий Александрович** – аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета

**Стариков Александр Владимирович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета

**Vladislav D. Kostyukov** – Postgraduate student, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

**Gregory A. Krykov** – Postgraduate student, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

**Alexander V. Starikov** – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

*Статья поступила в редакцию 13.11.25, принята к опубликованию 15.12.25*

УДК 621.314

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ

И.И. Артюхов, А.И. Земцов

## MODERNIZATION OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT COMPLEX IN FAN COOLING TOWERS

I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov

*Принцип действия вентиляторных градирен предполагает затраты электроэнергии на работу электропривода. Электродвигатели вентиляторов имеют достаточно большую мощность, поэтому возникает задача снижения расхода электроэнергии, которая является частью актуальной проблемы улучшения эксплуатационных характеристик. Градирня является сложным гидротехническим сооружением с многофазными теплотехническими процессами, которые зависят от многих детерминированных и случайных метеофакторов. Поэтому эффективное решение указанной проблемы требует применения комплексного подхода. Этот подход рассмотрен на примере градирни СК-400, в рамках которого проводится радикальное изменение конструкции в габаритах существующего водосборного бассейна и модернизация электротехнического комплекса, предусматривающая оснащение вентиляторов частотно-регулируемым электроприводом.*

**Ключевые слова:** градирня, вентиляторы, частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, стабилизация температуры воды

В большом количестве технологических процессов существует необходимость отвода низкопотенциального тепла от промышленных агрегатов. Наиболее эффективно эта задача решается с помощью градирен, применение которых позволяет

*The operating principle of fan coolers involves electricity consumption for the operation of the electric drive. The electric motors of the fans have sufficiently high power. Therefore, the task of reducing power consumption arises, which is part of an urgent problem of improving operational characteristics. The cooling tower is a complex hydraulic structure with multiphase thermal processes which depend on various deterministic and random meteorological factors. Thus, an effective solution to this problem requires a comprehensive approach. This approach is illustrated using the example of the СК-400 cooling tower, where a radical redesign is carried out within the dimensions of the existing water collection basin, along with modernization of the electrical engineering complex, which includes equipping the fans with frequency-controlled electric drives.*

**Keywords:** cooling tower, fans, variable frequency drive, frequency converter, water temperature stabilization

экономить не менее 95 % свежей воды различного типа. Большое количество которых используется в энергетике, в химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслях промышленности [1].



Требования, предъявляемые к температуре оборотной воды и расходу ее на охлаждение, диктуются особенностями конкретного технологического процесса и эксплуатационными свойствами оборудования. Температура воды, охлажденной в градирнях, существенным образом влияет на оптимальную работу технологического оборудования. В частности, недоохлаждение воды относительно ее расчетной температуры приводит к снижению долговечности работы агрегатов или объемов выработки продукции. Переохлаждение воды может стать причиной ухудшения качества продукции и перерасхода энергии [2].

Градирня представляет собой теплообменник с противоточным или перекрестным потоком, который отводит тепло от воды, передавая его воздуху. Существует большое количество конструктивных модификаций градирен. По конструктивным особенностям и принципу действия градирни подразделяют на открытые, башенные и вентиляторные. Поверхность воды, требуемая для ее охлаждения путем контакта с воздухом, создается в градирнях в результате разбрызгивания воды соплами или с помощью оросительных устройств, которые могут быть капельными, пленочными и комбинированными. Широкое применение получили вентиляторные градирни, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с градирнями других типов [3].

Принцип действия вентиляторной градирни основан на охлаждении оборотной воды воздухом, нагнетаемым с помощью вентилятора. Жидкость, которую требуется охладить, разбрызгивается на ороситель, после чего стекает в накопитель. Воздух для охлаждения подается через нижнюю часть корпуса и далее идет вверх за счет работы вентилятора. Уменьшение потерь воды достигается посредством монтажа каплеуловителя, который находится на пути воздушного потока. Использование различных вариантов оросительных блоков и вентиляторов разной мощности позволяет использовать градирни этого типа во многих отраслях промышленности. Наличие регулирующих установок и возможности

реверса привода дает возможность эксплуатировать эти испарительные градирни при отрицательной температуре воздуха.

В градирнях вентиляторного типа используются два вида вентиляторов: осевые и центробежные, у каждого из которых есть свои преимущества и недостатки. Градирни с осевым вентилятором отличаются пониженным электропотреблением, но при этом значительно меньшим напором, а значит и меньшим перепадом температур. Градирни с центробежным вентилятором создают перепад до 30-35 °С, обеспечивая глубокое охлаждение, но при этом их энергопотребление выше.

Принцип действия вентиляторных градирен предполагает затраты электроэнергии на работу электропривода. Электродвигатели вентиляторов имеют достаточно большую мощность, поэтому возникает задача снижения расхода электроэнергии, которая является частью актуальной проблемы улучшения эксплуатационных характеристик [4, 5].

На предприятиях химической и других отраслей промышленности для охлаждения оборотной воды используются градирни СК-400 с производительностью 2500 м<sup>3</sup>/ч (рис. 1). Эти градирни имеют одну круглую или многогранную секцию, отличающуюся большим диаметром и высотой, что позволяет им для создания воздушного потока применять как вентилятор, так и разницу давлений из-за перепада высот.

Схема размещения электроприводного оборудования градирни СК-400 показана на рис. 2. Для привода вентилятора, который имеет большие размеры и перекачивает колоссальный объем воздуха, в градирне СК-400 применен высоковольтный электродвигатель мощностью 250 кВт. Для его размещения предусмотрен специальный машинный зал, расположенный под днищем водосборного бассейна.

Момент от двигателя передается на колесо не напрямую, а через металлический вал длиной около 20 метров на редуктор. Сложность обслуживания указанного двигателя и другого оборудования является существенным недостатком градирни СК-400.



Рис. 1. Внешний вид градирни СК-400

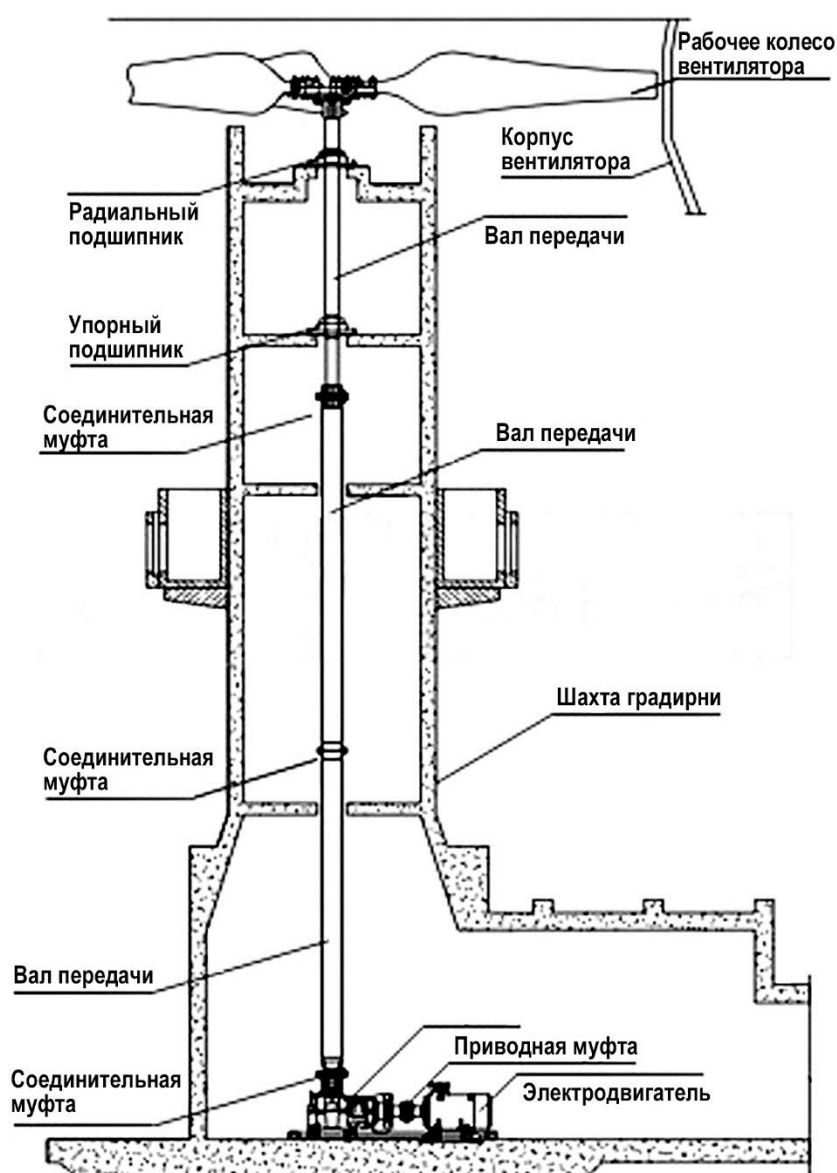


Рис. 2. Схема размещения электрооборудования градирни СК-400 [6]

Гради́рня является сложным гидротехническим сооружением с многофазными теплотехническими процессами, которые зависят от многих детерминированных и случайных метеофакторов. Поэтому эффективное решение указанной проблемы требует применения комплексного подхода. Один из вариантов улучшения эксплуатационных характеристик градирни предусматривает радикальное изменение конструкции в габаритах существующего водосборного бассейна.

На рис. 3 показана конструкция градирни, которая выполнена в виде восьми секций Marley NC8415S-1 [7], сблокированных попарно в четыре блока. Каждая секция представляет собой сооружение каркасного типа с металлическими листами с наружной отделкой стеклопластиком. Охлаждение воды в секциях осуществляется вентилятором, колесо которого приводится в движение электродвигателем мощностью 22 кВт.



**Рис. 3.** Общий вид установленных восьми секций, сблокированных попарно в четыре блока

В [8, 9] и других работах показано, что эффективным средством улучшения эксплуатационных характеристик вентиляторной градирни является оснащение вентиляторов частотно-регулируемым электроприводом. В [10] предложен вариант построения системы стабилизации температуры воды с применением преобразователей частоты (ПЧ) для управления электродвига-

телями вентиляторов. Соответствующая схема показана на рис. 4.

Система стабилизации температуры воды на выходе градирни реализует принцип отрицательной обратной связи. Выходным параметром системы является температура воды  $T_2$ , которая зависит от температуры воды  $T_1$  на входе в градирню, температуры  $\theta_B$  и влажности  $\beta$  воздуха, производи-

ности насоса  $Q$  и массового расхода воздуха  $G$ , создаваемого вентиляторами. При этом колебания температуры воды  $T_1$ , температуры  $\theta_B$  и влажности  $\beta$  воздуха представляют собой возмущающие воздействия. Управляющим воздействием является частота  $\omega$  вращения рабочего колеса вентилятора, от которой зависит расход  $G$  продуваемого воздуха.

Информация о температуре  $T_2$  выдается датчиком в виде аналогового или цифрового сигнала  $X$ , который вычитается из сигнала

$X_0$  в блоке сравнения. Сигнал  $X_0$  задает необходимое значение температуры на выходе градирни. Элемент сравнения формирует разность сигналов  $\Delta X = X_0 - X$ , которая поступает на вход регулятора. Он вырабатывает сигнал  $Y$  для управления преобразователем частоты. В соответствии с настройками ПЧ на его выходе формируется трехфазное напряжение, частота  $f$  и действующее значение  $U$  которого зависят от сигнала управления  $Y$ .

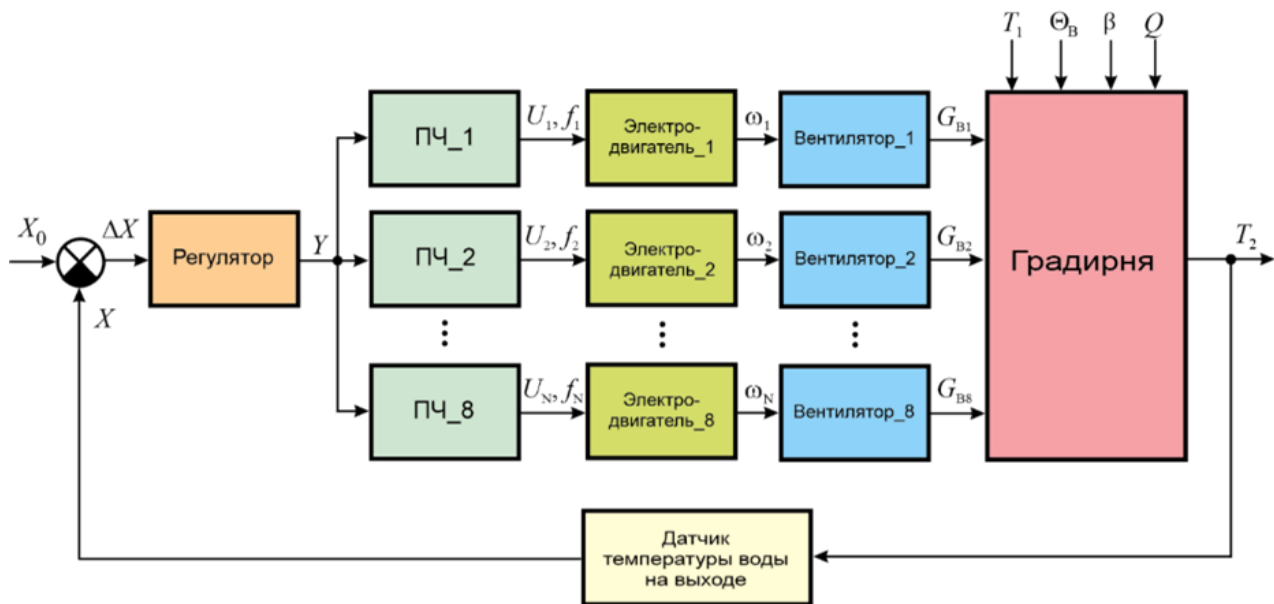


Рис. 4. Функциональная схема системы стабилизации температуры воды с частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов

Если по каким-либо причинам температура воды на выходе градирни отклоняется от заданного значения, то в зависимости от знака разности  $\Delta X = X_0 - X$  происходит соответствующее изменение сигнала  $U_{упр}$ . Следствием этого является увеличение (или уменьшение) частоты вращения рабочего колеса вентилятора. В результате изменения расхода воздуха происходит уменьшение (или увеличение) температуры  $T_2$  воды на выходе градирни.

Частотное управление вентиляторами позволяет поддерживать температуру воды на выходе градирни с высокой точностью; осуществлять плавный пуск электродвигателей с ограничением пусковых токов; исключить механические ударные нагрузки на электродвигатель и вентилятор; сокра-

тить эксплуатационные расходы на обслуживание и ремонт коммутационных аппаратов; экономить электроэнергию.

На градирне СК-400 производительностью  $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$  электродвигатель мощностью  $250 \text{ кВт}$  работал непрерывно, регулировка режима работы градирни осуществлялась за счет изменения расхода воды с помощью механической задвижки. Без учета потерь годовое потребление электрической энергии указанным двигателем может быть оценено следующим значением:

$$250 \times 8760 = 2\,190\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Кроме того, для функционирования градирни использовался электродвигатель маслонасоса мощностью  $1,7 \text{ кВт}$ . За год этот электродвигатель потребляет



$$1,7 \times 8760 = 14\,982 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Итого суммарное потребление электроэнергии градирни СК-400 за год составляет

$$2\,190\,000 + 14\,082 = 2\,204\,982 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

После реконструкции градирня состоит из восьми секций Marley NC8415S-1 производительностью по 375 м<sup>3</sup>/ч. Суммарная производительность градирни теперь равна 3000 м<sup>3</sup>/ч. При этом для привода вентиляторов используются 8 частотно-регулируемых электродвигателей, суммарная мощность которых  $22 \times 8 = 176$  кВт меньше мощности электродвигателя в градирне СК-400. Маслонасос в новой конструкции не требуется.

На основании данных учета электроэнергии на одном из предприятий суммарное потребление составило 1 167 168 кВт·ч. Таким образом, в результате реконструкции градирни имеет место годовая экономия электроэнергии в размере

$$2\,204\,982 - 1\,167\,168 = 1\,037\,814 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Графики расхода электроэнергии на функционирование градирен СК-400 и Marley NC8415S-1 показаны на рис. 5.

Полученный эффект экономии электроэнергии обусловлен следующими факторами:

- суммарная мощность электродвигателей в градирне новой конструкции меньше мощности электродвигателя в градирне СК-400, при этом производительность новой градирни выше за счет совершенствования конструкции;

- в составе электрооборудования новой градирни отсутствует электродвигатель маслонасоса;

- скорость вращения вентиляторов в новой градирне автоматически регулируется в соответствии с требуемым расходом воздуха при изменении температуры и влажности окружающей среды.

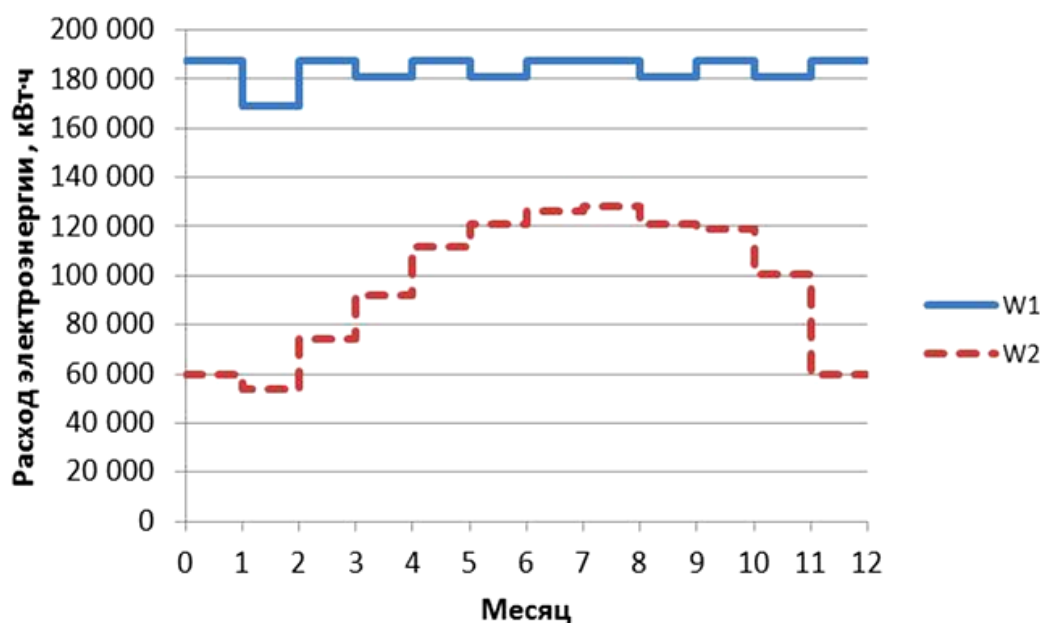


Рис. 5. Графики расхода электроэнергии на функционирование градирни

Кроме того, частотное управление вентиляторами имеет следующие положительные моменты:

- увеличивается срок службы механической системы, так как установка ПЧ уменьшает пусковые токи двигателей и динамические нагрузки на вращающуюся систему;

- уменьшение скорости вращения вентиляторов снижает уровень шума;

- ПЧ имеют разнообразные функции защиты, в том числе контроль изоляции двигателя;

- использование ПЧ позволяет на некоторое время изменять направление вращения вентилятора для защиты от обледенения.

Однако надо обратить внимание и на негативные моменты, которые возникают

при оснащении вентиляторов градирни частотно-регулируемым электроприводом. Это прежде всего искажение формы напряжения в питающей сети при питании группы ПЧ [11]. В настоящее время известны различные методы и технические решения для уменьшения негативного влияния преобразователей на систему электроснабжения [12]. Для компенсации высших гармоник могут быть применены, в частности, пассивные и гибридные фильтры [13]. Со-

временным средством решения проблемы негативного влияния ПЧ на сеть является применение активных фильтров гармоник (АФГ) [14]. АФГ анализирует ток основной частоты и токи высших гармоник, после чего с помощью IGBT-модулей генерирует компенсирующий ток в противоположной фазе. Однако с учетом высокой стоимости АФГ требуется тщательный технико-экономический анализ реализации данного решения проблемы.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И.** Градирни промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие. Москва: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
2. **Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А.** Устройство и расчет промышленных градирен. Казань: КГЭУ, 2004. 180 с.
3. НПО АгроСтройСервис. Очистные сооружения и градирни. URL: <https://acs-nnov.ru/gradirnya.html> (дата обращения 24.11.25).
4. **Крюков О.В.** Повышение энергоэффективности водооборотных систем предприятий при оптимизации управления градирнями // Вестник Пермского национального исследовательского университета. 2016. № 19. С. 5-27.
5. **Крюков О.В.** Обеспечение энергоэффективности водооборотных систем с вентиляторными градирнями // Научный вестник. 2016. № 3(9). С. 65-74.
6. Градирни СК400, СК1200. URL: <https://akvann.ru/ru/SK-400> (дата обращения 22.11.25).
7. Градирни Marley NC. URL: <http://www.sa-es.ru/products/gradirni/marley-nc/>.
8. **Muntean N., Hedeş A., Scridon S.** Practical Aspects Regarding Implementation of Variable Speed Drives in Cooling Tower Fans // Conference Proceedings – 2006 Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. Tenerife, Spain, December 16-18. P. 252-257.
9. The optimal operation of cooling tower systems with variable frequency control / Yong Cao et al. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. № 113. 012085.
10. **Артюхов И.И., Баранов А.А.** Улучшение эксплуатационных характеристик вентиляторной градирни // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: XXII Бенардосовские чтения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., к 75-летию теплоэнергетического факультета посвящается. Т. 1. Иваново, 2023. С. 41-45.
11. **Artyukhov I.I., Bochkareva I.I., Molot S.V.** Assurance of electromagnetic compatibility of group frequency controlled electro drives with power supply sources // Conference Proceedings - 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, Russia, 2014. P. 11-17.
12. Управление качеством электроэнергии: учеб. пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова; 3-е изд., перераб. и доп. Москва: МЭИ, 2019. 347 с.
13. Гибридные широкополосные фильтры для систем регулируемого электропривода / В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, Н.П. Боярская, Е.В. Блинов // Электричество. 2024. № 7. С. 67-80.
14. Активный фильтр АФГ на 200 А. URL: <https://www.energozapad.ru/catalog/aktivnyj-filtr-garmonik-afg/aktivnyj-filtr-garmo-nik-afg-na-200a/> (дата обращения 08.11.25).

---

---

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

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

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

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

*Статья поступила в редакцию 02.12.25, принята к опубликованию 15.12.25*



УДК 621.311.42, 621.398

## ВЫБОР ОСНОВНЫХ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА 10 (6) КВ

И.О. Шкода, П.А. Кузнецов, Ю.Б. Томашевский,  
А.В. Ладин, С.П. Максимов

## SELECTION OF KEY CONTROL PARAMETERS FOR DETECTION AND RECOGNITION OF DEFECTS IN THE 10 (6) KV POWER TRANSFORMER

I.O. Shkoda, P.A. Kuznetsov, Yu.B. Tomashevskiy,  
A.V. Ladin, S.P. Maksimov

*В статье представлен выбор основных контролируемых параметров для обнаружения и распознавания дефектов силового трансформатора 10 (6) кВ. Выбранные параметры представляют основу создаваемой системы подстанций 10 (6) кВ. Ключевым объектом мониторинга подстанции является силовой трансформатор. Авторами был проведен структурный анализ его повреждений, а также экспериментальная проверка его состояния по выбранным в работе параметрам. В заключении определены дальнейшие шаги для разработки системы телеметрии трансформаторных подстанций 10 (6) кВ.*

**Ключевые слова:** подстанция, трансформатор, телеметрия, электрооборудование, контролируемые параметры

*This article presents a selection of key monitored parameters for detecting and recognizing defects in the 10 (6) kV power transformer. These parameters form the basis of the 10 (6) kV substation system being developed. The power transformer is the key monitoring element of the substation. The authors conducted a structural analysis of its damage and an experimental verification of its condition using the parameters selected in the study. The conclusion identifies further steps for developing a telemetry system for the 10 (6) kV transformer substations.*

**Keywords:** substation, transformer, telemetry, electrical equipment, controlled parameters

### Введение

Силовой трансформатор является дорогим и наиболее важным элементом трансформаторной подстанции, так как от его технического состояния, в наибольшей степени, зависит надежность электроснабжения потребителей. Например, в 2023 году, в компании ПАО «Россети Северный Кавказ» (Дагэнерго – Тлярятинские ЭС) [1] был зафиксирован перерыв электроснабжения потребителей длительностью

362,5 часа, в результате отключения ВЛ 10 кВ Ф-2 от ПС 35 кВ Тлярата. Причина отключения – межвитковое замыкание обмоток 10 кВ трансформатора на ТП-2/400 кВА ВЛ 10 кВ Ф-2 от ПС 35/10 кВ Тлярата в результате старения изоляции. Высокая продолжительность перерыва электроснабжения была обусловлена сложными условиями проведения ремонтно-восстановительных работ в горном районе, вдали от крупных населенных пунктов.

Для предотвращения подобных аварий на предприятиях электрических сетей организован контроль за состоянием трансформаторных подстанций (ТП) в форме визуального осмотра и диагностики электрооборудования в рамках их планового обслуживания не реже 1 раза в 6 месяцев. Авария на ТП в Тлярятинских ЭС является примером недостаточности такого контроля и показывает последующий за этим результат в виде длительного ненормативного перерыва электроснабжения потребителей. Таким образом, разработка системы телеметрии состояния ТП 10(6) кВ является актуальной задачей.

В статье [2] авторами определены основные контролируемые параметры ТП, по которым возможно контролировать состояние ключевого элемента подстанции – силового трансформатора.

#### **Анализ повреждений силового трансформатора**

В ходе анализа технологических нарушений, связанных с силовыми трансформаторами, были выявлены элементы силовых трансформаторов наиболее подверженных повреждениям; сами повреждения и их внешние признаки, предшествовавшие их возникновению. На основе этой статистики [1] была создана сводная табл. 1.

Таблица 1 – Элементы трансформатора, доля повреждений, неисправности и признаки обнаружения

Элемент трансформатора, доля повреждений	Неисправности	Внешние признаки повреждений
Обмотка – 56 %	Витковое замыкание	Неравномерное конвективное движение масла и нагрев, газообразование, шум
	Замыкание на корпус (пробой), междуфазное КЗ	Газообразование, выброс масла, уровень масла, шум, увлажнение масла
	Обрыв	Газообразование, шум
Магнитопровод – 2,9 %	«Пожар стали»	Газообразование, шум
	Недопустимая вибрация магнитопровода	Шум, вибрация разболченных элементов
Вводы – 23,5 %	Электрический пробой	Ток утечки на землю
Бак и арматура – 8,8 %	Протекание масла	Снижение уровня масла
Масло – 8,8 %	Снижение изоляционных свойств масла	Увлажнение масла

#### **Измерение и оценка основных контролируемых параметров силового трансформатора**

Из всех контролируемых параметров, приведенных в статье [2], выделены 4 ключевых параметра, по которым предлагается определять техническое состояние трансформатора.

1) *Измерение концентрации газов в трансформаторном масле* является оптимальным способом контроля состояния силового трансформатора, так как по концентрации газов и их соотношений можно определить различные виды повреждения и степень их развития [3].

В [3] приведены следующие газы, подлежащие контролю:

- водород  $H_2$ ;
- метан  $CH_4$ ;
- этан  $C_2H_6$ ;
- углекислый газ  $CO_2$ ;
- этилен  $C_2H_4$ ;
- угарный газ  $CO$ ;
- ацетилен  $C_2H_2$ .

При ненормальных тепловых процессах – перегреве или дуговых разрядах – в трансформаторе образуются углеводороды. Старение и/или увлажнение изоляции сопровождается повышением концентрации окисей углерода. Соответствие неисправностей с образующимися газами приведено в табл. 2.

Таблица 2 – Процессы в трансформаторе, сопровождающиеся образованием газов

Состав газов	Вид дефекта
1. Водород $H_2$ – основной газ; метан $CH_4$ – характерный газ	Частичный разряд
2. Водород $H_2$ или ацетилен $C_2H_2$ – основные газы; метан $CH_4$ – характерный газ с низким содержанием	Разряды низкой энергии
3. Ацетилен $C_2H_2$ или водород $H_2$ – основные газы; метан $CH_4$ , этилен $C_2H_4$ , угарный газ $CO$ – характерные газы с высоким содержанием	Разряды высокой энергии, дуга
4. Этан $C_2H_6$ – основной газ; метан $CH_4$ , угарный газ $CO$ – характерные газы с высоким содержанием	Термический дефект, $T < 300\text{ }^{\circ}C$
5. Метан $CH_4$ – основной газ; этилен $C_2H_4$ , этан $C_2H_6$ – характерные газы	Термический дефект, $300\text{ }^{\circ}C \leq T \leq 700\text{ }^{\circ}C$
6. Этилен $C_2H_4$ – основной газ; ацетилен $C_2H_2$ , метан $CH_4$ – характерные газы с высоким содержанием	Термический дефект, $T > 700\text{ }^{\circ}C$
7. Углекислый газ $CO_2$ – основной газ; угарный газ $CO$ – характерный газ	Деструкция целлюлозной изоляции

Определение основного и характерных газов по результатам измерений производится по формуле

$$n_i = \frac{N_i}{N_{cp\_i}}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – относительная концентрация  $i$ -го газа, % объема;  $N_i$  – измеренное значение концентрации  $i$ -го газа, % объема;  $N_{cp\_i}$  – граничная концентрация  $i$ -го газа, % объема.

По расчетным относительным концентрациям максимальное значение будет соответствовать ключевому газу.

В случае:

$n_i > 1$  – характерный газ с высоким содержанием;

$0,1 < n_i < 1$  – характерный газ с малым содержанием;

$n_i < 1$  – нехарактерный газ.

Оценка концентрации окисей углерода  $CO$  и  $CO_2$  в масле проводится независимо от оценки углеводородных газов и водорода:

$n_{i\_max}$  – соответствует основному газу;

$n_i > 1$  – характерному газу.

Определение вида и характера развивающихся дефектов по отношению концентраций пар газов подробно описано в нормативно-технической документации [3, 4].

2) *Повышенный уровень шума или изменение его частотного спектра* [5] (в технической литературе применяется оценка шума как «ненормальное гудение») является

ся признаком возникновения различного рода неисправностей в трансформаторе (табл. 1). Уровень шума (уровень звукового давления  $L_{ш}$ , дБ) оценивается шумомером и сравнивается с величиной шума  $L_{cp}$ , граничной для данной модели трансформатора. В случае если  $L_{ш} > L_{cp}$ , дБ, уровень шума оценивают как повышенный.

3) *Определение уровня и степени вибрации* позволяет оценивать степень опрессовки обмоток, так как в процессе эксплуатации она снижается. Это приводит к увеличению общего уровня вибрации и изменению частотного спектра. Кроме того, повышенный уровень вибрации может регистрироваться и при ряде других дефектов в трансформаторе согласно табл. 1.

Уровень вибрации обычно определяется по параметрам виброперемещения (мкм) и виброскорости (мм/с). На данный момент ГОСТ не нормирует параметры вибрации трансформаторов, и вибродиагностика производится на основании опыта контролирующего персонала.

4) *Измерение тока утечки* позволяет выявлять дефекты изоляции на ранней стадии их развития. Ток утечки можно измерить путем установки трансформаторов тока нулевой последовательности на сторонах ВН и НН трансформатора, либо путем измерения тока в шине, заземляющей корпус трансформатора. Утечка в нормативной до-

кументации не нормируется и для каждого трансформатора подбирается в зависимости от характеристик данной модели.

Принцип и схема измерения показателя указаны в [2].

Таким образом, при измерении только 4 ключевых параметров: шум, вибрация, концентрация газов и ток утечки на землю согласно табл. 1 можно определить около 80 % развивающихся повреждений элементов силового трансформатора и предотвращать их дальнейшее развитие.

Использование для контроля нескольких независимых параметров различной физической природы обеспечивает объективность и качество оценки текущего состояния трансформатора. Кроме того, датчики, реализующие измерения, будут взаимно резервировать друг друга, что предотвратит ситуации с неверной оценкой состояния оборудования по показаниям единственного, возможно неисправного, или ложно сработавшего датчика. Стоит также отметить, что датчик обнаружения газов в трансформаторном масле является ключевым для фиксации и различия неисправностей, поэтому в случае резкого нарастания показателя концентрации газов разрабатываемая система телеметрии должна предложить диспетчеру провести внеплановое ТО датчика.

### Экспериментальный анализ состояния трансформатора по выбранным контролируемым параметрам

Для подтверждения или опровержения предлагаемого авторами перечня контролируемых параметров был произведен натурный эксперимент на реальном объекте с предполагаемым дефектом.

В качестве объекта исследований выступил силовой трансформатор ТМ-400-10(6)/0,4 кВ 1988 года выпуска. Диагности-

ка трансформатора проведена по следующим этапам.

I этап. По результатам визуального осмотра было зарегистрировано «ненормальное гудение». Измерения уровня шума проводились с использованием шумомера (см. рис. 1).



Рис. 1. Шумомер с результатами измерений

Измерения показали критический показатель уровня шума, составляющий в среднем 75 дБ при допустимом уровне шума 68 дБ согласно ГОСТ [5] для данной модели. На основе полученных данных было сделано предположение, что согласно табл. 1 повреждены обмотка или магнитопровод.

II этап. Для уточнения вида неисправности и элемента согласно существующим методикам [6, 7] были проведены испытания трансформаторного масла на пробой и измерены сопротивления обмоток постоянному току. Испытания масла производились на приборе АИМ 90. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний трансформаторного масла на пробой

Номер пробы	1	2	3	4	5	6
Измеренное пробивное напряжение, кВ	56,5	50	56	45,5	42,5	41
Нормированное пробивное напряжение, кВ	< 25					

Коэффициент вариации  $V = 5,62 \%$ , при норме не более  $20 \%$ , согласно [8] на основании чего сделан вывод, что отобранное трансформаторное масло находится в нормальном состоянии на пробой.

Испытания и измерения сопротивления обмоток постоянному току производились

с помощью прибора ИКС-1А. Результаты измерений представлены по сторонам ВН и НН (см. рис. 2, 3).

Результаты сведены в табл. 4 и 5, где проведена оценка процента отклонений согласно [6].



Рис. 2. ИКС-1А с результатами измерений сторона ВН



Рис. 3. ИКС-1А с результатами измерений сторона НН

Таблица 4 – Результаты измерений обмоток ВН

Сторона ВН		Сопротивление, Ом	%
Обмотка	AB	1,5789	–
	AC	1,5685	0,64
	BC	1,5782	0,44

Таблица 5 – Результаты измерений обмоток НН

Сторона НН		Сопротивление, мОм	%
Обмотка	ab	3,3692	48,6
	ac	5,0088	–
	bc	5,0042	0,1

По результатам проведенных испытаний выявлено отклонение от нормальных значений согласно [6] более чем на  $2 \%$ . Разница на стороне низшего напряжения об-

мотки ab составляет  $48,6 \%$ . Данное отклонение от нормы согласно стандартам [6] указывает на межвитковое замыкание на стороне низшего напряжения.

Проведенные на II этапе испытания показали, что установлено развивающееся межвитковое замыкание обмоток.

III этап:

По предлагаемому авторами перечню контролируемых параметров система телеметрии должна будет определять данный вид повреждений по анализу газов, растворенных в трансформаторном масле. Таким образом, для доказательства применимости данного анализа для определения повреждений была взята дополнительная проба масла и направлена в специализированную химическую лабораторию на хроматографический анализ газов в масле. Результаты анализа сведены в табл. 6.

Таблица 6 – Результаты хроматографического анализа газов

Газ	Значение (% об.)	Уставка при сроке службы >15 лет
H <sub>2</sub>	0,0042	0,002
CH <sub>4</sub>	0,0032	0,001
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,0034	0,009
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0	0,0025
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,002	0,0035
CO <sub>2</sub>	0,5116	0,3
CO	0,01882	0,03

По результатам анализа можно увидеть, что показатели H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> превышают критические значения уставки.

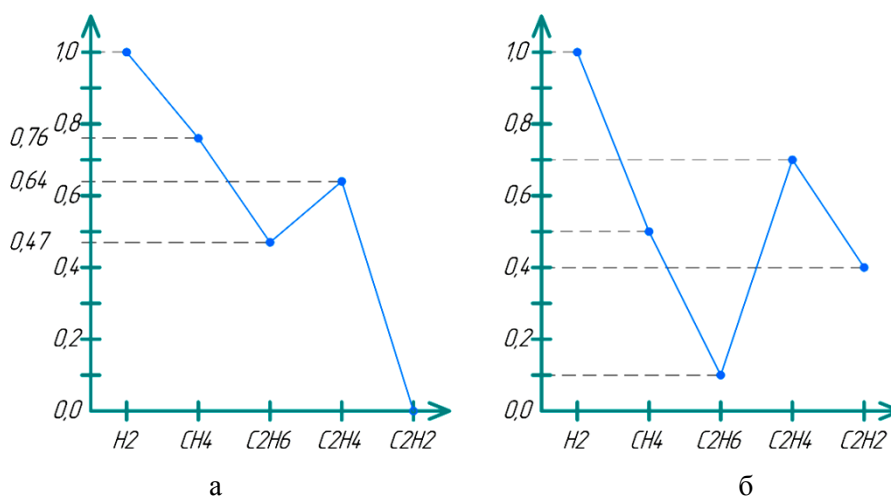


Рис. 4. а – полученная диаграмма; б – максимально близкая типовая диаграмма

Для определения вида дефекта строится диаграмма соотношений концентраций газов (рис. 4).

Порядок построения диаграммы:

1. Определение основного газа (выбирается по максимальной абсолютной концентрации из 5 ключевых газов). В данном случае – это водород H<sub>2</sub> со значением концентрации 0,0042, его соотношение концентраций принимается равным 1.

2. Определение величины отношения концентрации каждого газа к концентрации основного газа.

Соотношения остальных газов:

$$\frac{n_{\text{CH}_4}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{0,0032}{0,0042} = 0,76;$$

$$\frac{n_{\text{C}_2\text{H}_6}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{0,002}{0,0042} = 0,47;$$

$$\frac{n_{\text{C}_2\text{H}_4}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{0,0034}{0,0042} = 0,81;$$

$$\frac{n_{\text{C}_2\text{H}_2}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{0}{0,0042} = 0.$$

По результатам расчётов характерными газами являются метан CH<sub>4</sub> и этилен C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, так как они имеют наибольшие концентрации.

Согласно табл. 2 по полученным расчетным значениям видом дефекта является «разряды высокой энергии, дуга».

На диаграмме по оси абсцисс газы располагаются слева направо в следующей последовательности, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. По



оси ординат откладывается числовое значения соотношений данных газов к основному.

Для уточнения вида дефекта произведен анализ типовых диаграмм в нормативной документации [4]. Из перечня типовых диаграмм выбирается диаграмма с идентичными основным и характерными газами, в данном случае это водород, метан и этилен. Полученная в результате расчетов диаграмма сопоставляется с типовой диаграммой, при этом необходимо обратить внимание на характер кривой.

Согласно представленной выше типовой диаграмме данный вид дефекта характеризуется как «искровые разряды, ползущий разряд».

Согласно нормативно-технической документации [4], основными причинами появления данных газов являются:

- замыкания между обмотками;
- замыкания между обмотками и остовом трансформатора;
- межвитковые замыкания.

Для дополнительного уточнения характера дефекта необходимо определить соотношение газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ :

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = \frac{0,5116}{0,01882} = 27,18.$$

В нормативной документации [4] превышение значения соотношения данных газов более 10 дает основания предполагать, что повреждением затронута целлюлозная изоляция и вероятен низкотемпературный дефект с температурой менее  $160^\circ\text{C}$ . Это приводит к выводу о том, что повреждение находится в изоляции обмоток.

Основными причинами этого, являются:

- работа трансформатора в перегрузке;
- высокая влажность масла.

Таким образом, можно сделать вывод, что по предлагаемому авторами перечню контролируемых параметров (в данном случае шуму и анализу концентрации газов) возможно достоверно определять наличие и вид повреждения в силовом трансформаторе. По результатам анализа концентраций газов в ходе эксперимента определено наличие искрового разряда, ползущего разряда, затронувшего целлюлозную изоляцию. Внешнее проявление дефекта было обнаружено по увеличенному уровню шума трансформатора. Наличие дефекта подтвердилось измерением сопротивления обмоток постоянно-му току, которое выявило наличие межвиткового замыкания.

### Заключение и выводы

По сравнению с существующими методами по обслуживанию трансформаторных подстанций 10 (6) кВ предлагаемая авторами система производит обнаружение и определение вида зарождающихся дефектов силовых трансформаторов, что позволяет своевременно выявлять неисправность на раннем этапе ее развития и не допускать технологического нарушения в работе электрической сети.

Проведенный эксперимент на действующем электросетевом объекте с реальным дефектом на силовом трансформаторе показал, что выбранный перечень контролируемых параметров позволяет фиксировать и определять дефекты силового трансформатора. Это служит доказательством работоспособности предлагаемого решения.

Дальнейшими шагами по созданию системы являются разработка архитектуры системы, выбор ее элементной базы и определение точных величин уставок контролируемых параметров в зависимости от модели трансформатора, его технического состояния и режима работы.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Россети Волга: сайт. URL: <https://www.rossetivolga.ru/> (дата обращения: 17.02.2024).

2. Анализ современных решений в области телеметрии трансформаторных подстанций 10 (6) кВ / П.А. Кузнецов, И.О. Шкода,



А.В. Ладин и др. // Вопросы электротехнологии. 2024. № 1 (42). С. 54-60.

3. РД 153-34.0-46.302-00-2000. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов растворенных в масле: дата введения 2001-01-01. Москва: АО ВНИИЭ, 2000. 42 с.

4. СТО 34.01-23-003-2019. Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле: дата введения 2019-04-17. Москва: ПАО «Россети», 2019. 63 с.

5. ГОСТ 12.2.024-1987. Система стандартов безопасности труда. Шум. Трансформаторы силовые масляные: дата введения 1989-01-01. Москва: ГК СССР по стандартам, 1989. 16 с.

6. РД 34.45-51.300-1997. Объем и нормы испытаний электрооборудования: дата введения 2004-01-01. Москва: НЦ ЭНАС, 2004. 254 с.

7. СТО Газпром 2-2.3-886-2014. Оборудование электрохозяйства. Порядок проведения технического обслуживания и ремонта. Санкт-Петербург: ОАО «Газпром», 2016. 107 с.

8. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд., испр. и доп. Москва: Минэнерго России, 2002. 330 с.

**Шкода Игорь Олегович** – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Кузнецов Павел Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Томашевский Юрий Болеславович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Ладин Александр Владимирович** – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Максимов Сергей Петрович** – инженер-проектировщик ООО «НТИЦ Инструмент-микро», Энгельс Саратовской области

**Igor O. Shkoda** – Postgraduate student, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Pavel A. Kuznetsov** – PhD (Technical Sciences), Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Yuri B. Tomashevsky** – Dr. Sci. Tech., Head: Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Alexander V. Ladin** – Postgraduate, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Sergei P. Maksimov** – Design Engineer at NTC Instrument-Micro LLC, Engels, Saratov Region

*Статья поступила в редакцию 02.12.25, принята к опубликованию 15.12.25*

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефону:

8 (8452) 99-87-64 – приемная главного редактора.

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/134, главному редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Артюхову И.И. и по электронной почте [eltech@sstu.ru](mailto:eltech@sstu.ru)

### Требования к оформлению публикаций

- Рукопись статьи оформляется в программе Microsoft Word для Windows
  - Формат страницы – А4, ориентация книжная
  - Размеры полей страниц: верхнее и нижнее – по 25 мм, левое и правое – по 20 мм
  - Абзацный отступ – 0,63 см
  - Шрифт текста рукописи – Times New Roman, размер 12 pt
  - Междустрочный интервал – 1,0
  - Общий объем рукописи (включая иллюстрации и таблицы) – не более 10 страниц.
- Указанное ограничение объема рукописи не распространяется на сведения об авторах.

Иллюстрации (рисунки, графики, фотографии) располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Чертежи, схемы и другие графические материалы выполняются с хорошей проработкой деталей в программах Corel Draw (с расширением \*.cdr) или других редакторах (с расширением \*.jpeg или \*.tiff). Все графические материалы должны быть доступны для редактирования, поэтому необходимо представлять их в исходном формате. Цветные иллюстрации должны быть адаптированы для черно-белой печатной версии журнала. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

**ОБЯЗАТЕЛЬНО** наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ Р 7.0.5-2008 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» [www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii](http://www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii).

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой  
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (8452) 99-87-64  
e-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 17.12.2025      Дата выхода в свет 22.12.2025

Формат 60×84 1/8    Бум. офсет.

Усл. печ. л. 12,0    Уч. изд. л. 5,0

Тираж 500 экз.      Заказ 51      Цена свободная

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: izdat@sstu.ru

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ  
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

**Подписной индекс 70841** (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2025 г.)

Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621*  
*выдано Роскомнадзором от 01.07.2013*

---

Editor L.A. Skvortsova  
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova  
Translation and editing by A.H. Askarova

Address of the editorial office:  
77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia  
Tel.: (8452) 99-87-64  
e-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 17.12.2025      Date of publication: 22.12.2025

Paper size: 60×84 1/8.    Offset-Print

Conventional printed sheet 12,0    Publication base sheet 5,0

Circulation: 500 printed copies.    Order 51      Subscription and individual copies: open rates

Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.

Online at [www.eLIBRARY.RU](http://www.eLIBRARY.RU)

The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621*  
*Issued by Roscomnadzor 01.07.2013*

