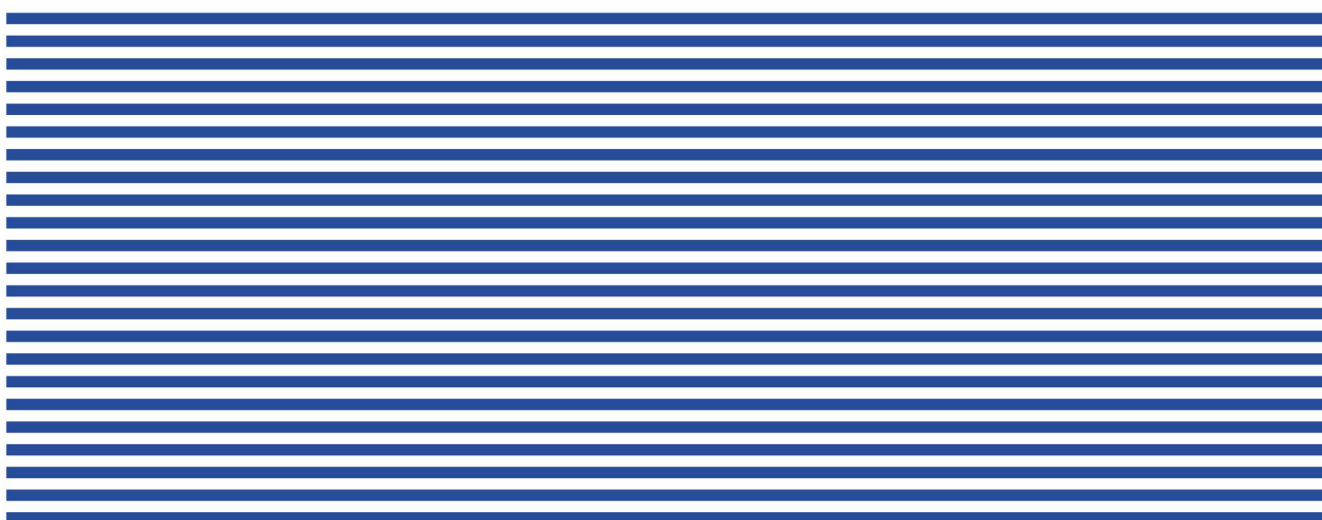




**ISSN 2309-6020**

# **ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**



**2026**

**№ 1 (50)**



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

№ 1 (50)  
Март 2026

# 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

**№ 1 (50)**  
**March 2026**

# **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

<b>Editor-in-Chief</b>	<b>ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH</b> Dr. Sci., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>Assistant to the Editor-in-Chief</b>	<b>BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH</b> Dr. Sci., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>Chief Executive Officer</b>	<b>MOLOT SVETLANA VIKTOROVNA</b> Senior Lecturer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

## **Editorial Board Members**

<b>A.A. BAZAROV</b>	Dr. Sci., Professor, Samara State Technical University, Samara
<b>V.V. VAKHNINA</b>	Dr. Sci., Professor, Togliatti State University, Togliatti
<b>V.G. GOLDSTEIN</b>	Dr. Sci., Professor, Samara State Technical University, Samara
<b>Yu.V. GULYAEV</b>	Dr. Sci., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
<b>V.B. DEMIDOVICH</b>	Dr. Sci., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg
<b>Yu.B. KAZAKOV</b>	Dr. Sci., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo
<b>A.N. MAKAROV</b>	Dr. Sci., Professor, Tver State Technical University, Tver
<b>G.A. MOROZOV</b>	Dr. Sci., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
<b>Yu.P. PERELIGIN</b>	Dr. Sci., Professor, Penza State University, Penza
<b>A.F. REZCHIKOV</b>	Dr. Sci., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov
<b>I.V. RODIONOV</b>	Dr. Sci., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>F.N. SARAPULOV</b>	Dr. Sci., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
<b>Yu.B. TOMASHEVSKY</b>	Dr. Sci., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>A.A. FOMIN</b>	Dr. Sci., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>V.N. KHMELEV</b>	Dr. Sci., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
<b>V.A. TSAREV</b>	Dr. Sci., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

**Палканов П.А., Фомин А.А.**  
Закономерность формирования  
диффузионного слоя в процессе  
индукционной химико-термической  
обработки быстрорежущей стали Р6М5 ..... 5

**Федин М.А., Булатенко М.А.,  
Калинин А.А., Коробков С.А.,  
Качалина Е.В., Петров П.В.**  
Электромагнитный устроитель частоты  
для индукционно-резистивной системы  
нагрева..... 11

**Сармин А.Ю., Пичхидзе С.Я.** Разра-  
ботка модернизированной конструкции  
троакара..... 23

**Китаев Н.И., Войко А.В.**  
Компьютерная модель кинетики  
нагрева спирального сверла в системе  
микродуга – деталь при обработке  
в хромсодержащей обмазке в процессе  
микродугового воздействия ..... 34

**Бунтаков Д.В., Перинский В.В.**  
Исследование химической активности  
и морфологии плазменно-нанесенного  
титана, наноструктурированного  
ускоренными ионами азота и аргона ..... 44

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**Бойнов Н.В., Кабанов О.В.**  
Стратегические направления развития  
электротехнической отрасли Респу-  
блики Мордовия в контексте цифровой  
трансформации и глобальных вызовов..... 52

**Сошинов А.Г., Копейкина Т.В.,  
Атрашенко О.С., Ахмедова О.О.**  
Влияние степени компенсации  
реактивной мощности на потери  
напряжения в кабелях до 1000 В ..... 57

**Максимов Д.Г., Стариков А.В.**  
Разработка упрощенной расчетной  
модели вибропресса с дебалансными  
возбудителями ..... 67

**Артюхов И.И., Недосекин Н.А.**  
Методы обнаружения и предотвращения  
кибератак на микросети с возобновляе-  
мыми источниками энергии..... 74

**Егоров А.Н., Юрин В.Е.,  
Макаров Д.А., Аношин Д.М.**  
Укрупненная оценка надежности  
водородного энергокомплекса  
как источника электрической энергии..... 81

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

**Ахметвалеев Р.Р., Гагарина Е.В.,  
Галлямов Д.К., Мешков Е.Г.,  
Патраев Д.М., Муфтахов А.З.,  
Валеев Т.А.** Двухуровневая модель  
распознавания условных графических  
обозначений электрических  
компонентов и спецификаций  
на технических чертежах  
трансформаторных подстанций..... 87

**Блинникова Л.Г.** Информационно-  
управляющая система демпфирования  
колебаний электромагнитной  
подвески с рекуперативным эффектом..... 97

К сведению авторов ..... 103

## CONTENTS

### **ELECTROTECHNOLOGY AND ELECTROPHYSICS**

---

<b>Palkanov P.A., Fomin A.A.</b> Patterns of diffusion layer formation in the process of induction chemical- thermal treatment of high-speed steel P6M5 .....	5
<b>Fedin M.A., Bulatenko M.A., Kalinin A.A., Korobkov S.A., Kachalina E.V., Petrov P.V.</b> Electromagnetic frequency multiplier for an induction resistive heating system .....	11
<b>Sarmin A.Yu., Pichkhidze S.Ya.</b> Development of an upgraded trocar design .....	23
<b>Kitaev N.I., Voyko A.V.</b> A computer model to the kinetics of heating a spiral drill in the microarc system as a component under processing in the chrome containing coating during microarc exposure .....	34
<b>Buntakov D.V., Perinsky V.V.</b> Investigation into chemical activity and morphology of plasma-applied titan nanostructured by accelerated ions of nitrogen and argon .....	44

### **ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS**

---

<b>Boynov N.V., Kabanov O.V.</b> Strategy for the development of electri- cal engineering sector of the Republic of Mordovia in the context of digital transformations and global challenges .....	52
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<b>Soshinov A.G., Kopeikina T.V., Atrashenko O.S., Akhmedova O.O.</b> Effect of degree of reactive power compensation on voltage losses in the cables up to 1000 V .....	57
<b>Maksimov D.G., Starikov A.V.</b> Development of a simplified calculation model of a vibration press with unbalanced exciters .....	67
<b>Artyukhov I.I., Nedosekin N.A.</b> Methods for detection and prevention of cyber attacks on microgrids with renewable energy sources .....	74
<b>Egorov A.N., Yurin V.E., Makarov D.A., Anoshin D.M.</b> Comprehensive assessment of reliability of a hydrogen energy complex as a source of electric energy .....	81

### **ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS**

---

<b>Akhmetvaleev R.R., Gagarina E.V., Galliamov D.K., Meshkov E.G., Patraev D.M., Muftakhov A.Z., Valeev T.A.</b> A two-level model for rec- ognizing standardized graphical symbols of electrical components in technical drawings of transformer substations .....	87
<b>Blinnikova L.G.</b> Information and control system damping of oscillations in an electromagnetic suspension with recuperative effect .....	97
Information for Authors .....	103

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.785.53

## ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ИНДУКЦИОННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ P6M5

П.А. Палканов, А.А. Фомин

## PATTERNS OF DIFFUSION LAYER FORMATION IN THE PROCESS OF INDUCTION CHEMICAL-THERMAL TREATMENT OF HIGH-SPEED STEEL P6M5

P.A. Palkanov, A.A. Fomin

Приведены физические основы нагрева токами высокой частоты, основанные на уравнениях Максвелла, и выражения для расчёта мощности объемного тепловыделения в обрабатываемом изделии из стали марки P6M5. Описано влияние температурного диапазона (900–1170 °C) и длительности (300–1200 с) процесса индукционной химико-термической обработки на коэффициент диффузии азота согласно закону Аррениуса, а также связь температурного поля с глубиной диффузионного слоя. Представленная математическая модель позволяет определить кинетику нагрева упрочняемого изделия и прогнозировать толщину диффузионного слоя при индукционной химико-термической обработке, что обеспечивает возможность сопоставления теоретических данных с экспериментальными и оптимизации технологического процесса. Установлено, что формирование диффузионного слоя в процессе азотирования существенно зависит от фазового состояния стали и концентрации азота в рабочей среде.

Ключевые слова: нагрев токами высокой частоты, ток индуктора, азотирование, быстрорежущая сталь, диффузионный слой

The physical principles of high-frequency induction heating, based on Maxwell's equations, are presented along with expressions for calculating the volumetric heat-generation power in a workpiece made of R6M5 high-speed steel. The influence of the temperature range (900–1170 °C) and duration (300–1200 s) of the induction thermochemical treatment on the nitrogen diffusion coefficient, according to the Arrhenius law, is described, as well as the relationship between the temperature field and the depth of the diffusion layer. The proposed mathematical model makes it possible to determine the heating kinetics of the strengthened workpiece and predict the diffusion-layer thickness during the induction thermochemical treatment, and thereby enable comparison of theoretical and experimental data and optimize the technological process. It has been established that formation of the diffusion layer in the course of nitriding process largely depends on the phase state of the steel and nitrogen concentration in the working atmosphere.

Keywords: high-frequency current heating, inductor current, nitriding, high-speed steel, diffusion layer

**Введение**

Отличительной чертой индукционной термической обработки (ИТО) является выделение тепла в скин-слое, что позволяет производить более эффективную обработку приповерхностного слоя металлического изделия [1, 2]. Скорость и равномерность нагрева до требуемой температуры зависят от ряда факторов, основными из которых являются энергетические и теплофизические [3].

Индукционный нагрев также позволяет произвести локальную активацию рабочей среды. Ускорение указанного процесса объясняется спецификой образования активных атомов азота из рабочей газообразной среды. Так, при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ) в процессе азотирования газовая фаза нагревается в основном от обрабатываемых изделий, поэтому диссоциация аммиака происходит не во всем объеме рабочей зоны индуктора, а локализуется у обрабатываемой поверхности [4]. Следовательно, высокотемпературный нагрев ТВЧ позволяет интенсивно нагревать только поверхностный слой изделия в активной среде, что способствует формированию упрочненных слоев карбидов, нитридов и карбонитридов с улучшенными механическими свойствами.

Так, в работе [5] применение индукционного нагрева при цементации титана в среде графитового порошка сокращало длительность процесса до 480 с при образовании упрочненного покрытия толщиной до 10 мкм и твердостью 10-14 ГПа. Температурный диапазон процесса варьировался в пределах 1050-1400 °С за счет изменения режимов нагрева ТВЧ, а именно тока индуктора от 3,3-3,5 до 4,9-5,5 кА при частоте тока  $88 \pm 2$  кГц.

Авторы работ [6, 7] провели процесс азотирования титанового сплава Ti-6Al-4V (аналог ВТ-6) в газообразной среде с применением индукционного нагрева при частоте на одновитковом индукторе 200 кГц. На протяжении всей длительности обработки металлические изделия обдувались газообразным азотом. Процесс проводился при температуре 850 °С в течение 180 с

и расходе газа ( $N_2$ ) 130 л/мин. В результате на поверхности формировался диффузионный слой толщиной до 70 мкм и твердостью 650-800 HV<sub>0,98</sub>. Также при анализе поверхности обработанных образцов было выявлено наличие фаз TiN и Ti<sub>2</sub>N, что подтверждало образование нитридного упрочненного диффузионного слоя.

В процессе химико-термической обработке (ХТО), в том числе производимой с помощью индукционного нагрева, очень важно контролировать распределение температуры на поверхности обрабатываемых материалов. Измерение температуры бесконтактным или контактным методами в данном случае затруднительно, поскольку скорость и равномерность нагрева изделий до требуемой температуры зависит от большого количества переменных факторов, основными из которых являются электрические, электро- и теплофизические, а также пространственно-временные [3]. Следовательно, задача прогнозирования распределения тепла по сечению изделия и, соответственно, динамики диффузионных процессов при индукционном нагреве представляется актуальной.

Таким образом, в данной работе рассмотрены закономерности объемного тепловыделения при нагреве ТВЧ стальных цилиндрических образцов, а также определена математическая зависимость температуры и длительности процесса индукционной ХТО на коэффициент диффузии азота, а также на кинетику роста нитридного слоя, сформированного на поверхности быстрорежущей стали.

**Физические основы процесса высокотемпературной термообработки**

В основе теории индукционного нагрева лежат процессы проникновения электромагнитной волны в проводник и выделения в нем джоулевого тепла за счет вихревых токов. В исследовании Г. И. Бабата описаны математические модели данного процесса, основанные на уравнениях Максвелла [8, 9]. Рассмотрена система, включающая воздушное пространство и полубесконечный металлический проводник. Разделяющая поверх-

ность представлена плоскостью, оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскости раздела, а ось  $z$  перпендикулярна данной плоскости. В воздухе, где  $z < 0$ , существует электромагнитное поле (ЭМП) в виде плоской волны, распространяющейся в направлении  $x$  со скоростью  $c$ . Характер распространения ЭМП не зависит от координаты  $y$ . В области  $z < 0$  относительная проницаемость  $\epsilon$ , относительная магнитная проницаемость  $\mu$  и удельное электрическое сопротивление  $\rho$  равны  $(\epsilon; \mu; \rho) = (1; 1; \infty)$  соответственно. В металле можно пренебречь током смещения, поскольку он имеет малую величину по сравнению с током проводимости. Следовательно, в области  $z > 0$  надо учитывать только величины  $\mu$  и  $\rho$ . Уравнения Максвелла для магнитной составляющей ЭМП  $H$  в виде плоской волны представлено в следующей форме:

$$\nabla \cdot H = j, \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $j$  – плотность тока проводимости, А/м<sup>2</sup>.

Плотность теплового потока (или плотность мощности) в контексте индукционного нагрева может быть определена через напряженность магнитного поля  $H_0$  и активную мощность  $P$  следующим образом:

$$T(z, t) = \frac{2}{k} \sqrt{\alpha t} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{z}{\sqrt{\alpha t}}\right) - \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \left[ 1 - \Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right] \right\} \cdot Q_s, \quad (4)$$

где  $\alpha = k/(\gamma \cdot C)$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\Phi$  – интеграл Гаусса.

Известно, что температура обрабатываемого изделия существенно влияет на коэффициент диффузии, увеличивая его с повышением температуры, что ускоряет процесс азотирования. Данная зависимость подчиняется закону Аррениуса [11]:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \quad (5)$$

$$D = D_0 \cdot \exp\left\{ \frac{E_A}{R} \left[ \frac{4\sqrt{2} \cdot 10^{-3}}{k} \sqrt{\alpha t} \cdot (N_l \cdot I)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu f} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{z}{\sqrt{\alpha t}}\right) - \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \left[ 1 - \Phi\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right] \right\} \right]^{-1} \right\} \quad (6)$$

$$Q_s = H_0^2 \frac{\rho}{z_1} \sqrt{2} \cdot P, \quad (2)$$

где  $z_1$  – глубиной проникновения тока, м;  $\rho$  – удельное сопротивление материала, Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Обобщенная формула для плотности мощности, связывающая активную  $P$  и реактивную  $Q$  составляющие, имеет вид:

$$Q_s = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2} \cdot P = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 10^{-1} \cdot (N_l \cdot I)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu f}, \quad (3)$$

где  $N_l$  – число витков на единицу длины индуктора  $l$ ;  $I$  – среднеквадратичное значение тока индуктора, А;  $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м;  $f$  – частота тока на индукторе, Гц.

Подробный теоретический анализ геометрической модели и решения задачи электротермического нагрева в системе «индуктор – изделие» были рассмотрены в работе [10].

Решение для плоской задачи нагрева  $T(t)$  при условии постоянной мощности  $Q_s$ , может быть представлено затухающей функцией по аналогии с решением задачи электродинамики:

где  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель, м<sup>2</sup>/с;  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $E_A$  – энергия активации, Дж/моль;  $T$  – температура обрабатываемого изделия, К.

Учитывая температуру изделия  $T(z, t)$  (4) в процессе индукционного нагрева, коэффициент диффузии может быть выражен следующим образом:

Согласно уравнению (6), коэффициент диффузии  $D$  экспоненциально возрастает с увеличением температуры  $T(z, t)$  обрабатываемого изделия.

Обобщенная формула, которая связывает глубину диффузионного слоя  $x$  и коэффициент диффузии  $D$  с электротехнологическими параметрами системы, включая частоту и физические свойства материалов, имеет следующий вид:

$$x(t) = \sqrt{2Dt}, \quad (7)$$

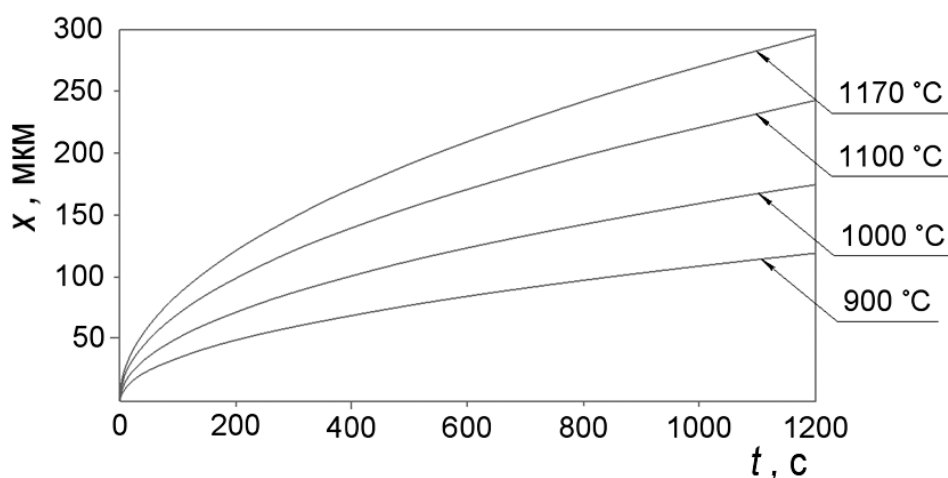


Рис. 1. Графическая зависимость глубины диффузионного слоя  $x$  от длительности процесса  $t$  и коэффициента диффузии  $D$

В работах [12, 13] установлено, что при высокой концентрации азота в приповерхностном слое, обрабатываемого изделия, поведение диффузии может отличаться от зависимости (5) и быть сильно концентрационно-зависимым. Динамика диффузии, связанная с концентрацией, описывается вторым законом Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (8)$$

где  $C = C(x, t)$  – концентрация азота на глубине  $x$  в момент времени  $t$ , моль/м<sup>3</sup>.

### Результаты и обсуждение

Для проверки применимости диффузионной модели к описанию процесса высокотемпературного азотирования инструментальной стали были использованы экспериментальные результаты работы [14]. Авторами было проведено исследование

где  $t$  – длительность процесса, с.

Графическая зависимость глубины диффузионного слоя  $x$  (7) от длительности процесса  $t$  до 1200 с и температуры обрабатываемого изделия  $T(z, t)$  (4) в диапазоне 900-1170 °C имеет следующий вид (рис. 1). На графике видно, что при повышении температуры стального изделия на 100-200 °C глубина диффузионного слоя  $x$ , следовательно, и коэффициент диффузии  $D$  возрастают. Данное явление объясняется термоактивационной природой  $D$ .

стальных образцов, упрочненных методом индукционной химико-термической обработки (ИХТО). Процесс ИХТО проводился в диапазон тока индуктора 3,3-3,7 кА в течение 300, 600 и 1200 ( $\pm 50$ ) с при давлении рабочей среды  $0,2 \pm 0,05$  МПа. Установлено, что температура поверхности стальных образцов варьировалась в диапазоне от 900 до 1170 °C.

В результате исследования состава образцов, обработанных в течение 600 с, установлено, что происходит внедрение азота в металл с его градиентным распределением от приповерхностного слоя к центру образца (рис. 2) [14].

Выражение (7) частично подтверждается экспериментальной графической зависимостью (рис. 2), что при увеличении температуры обработки стальных изделий происходит увеличение содержания азота в приповерхностном и диффузионном слоях.

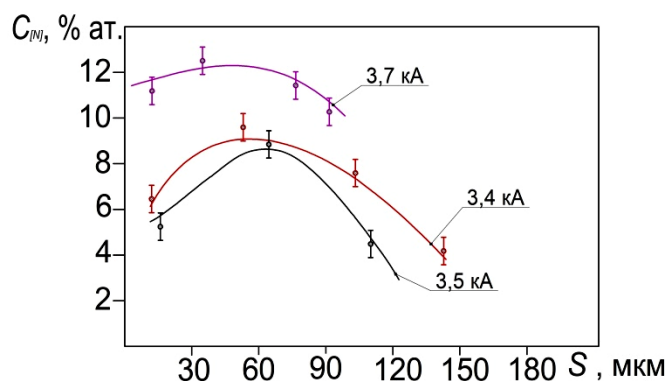


Рис. 2. График распределение азота по сечению образцов

В отличие от теоретической зависимости (рис. 1) в реальном эксперименте глубина диффузии азота уменьшалась (рис. 2). Так, быстрое насыщение поверхности стального образца атомами азота при повышенных температурах (900-1170 °С) приводит к интенсивному образованию нитридных фаз ( $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N и  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N). Ускоренное формирование этих нитридов вызывает рост плотного и химически стабильного поверхностного упрочненного слоя, обладающего существенно меньшей диффузионной проницаемостью по сравнению с  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазами. В результате дальнейшая миграция азота вглубь материала замедляется: нитридный слой формирует «барьер», увеличивая диффузионное сопротивление и уменьшая эффективный коэффициент диффузии азота на границе «поверхностный упрочненный слой – диффузионная зона». Таким образом, несмотря на высокую скорость насыщения поверхности, глубина диффузионного слоя уменьшается, поскольку сформированный поверхностный нитридный слой ограничивает поступление азота в подповерхностные слои и препятствует увеличению толщины  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фаз [11]. Вероятно, данное явление объясняет небольшую глубину диффузионного слоя и повышенное содержание азота в приповерхностном слое образца, обрабо-

танного при токе индуктора 3,7 кА при температуре 1170±30 °С.

### Выводы

Таким образом, с помощью теоретических моделей, основанных на уравнениях Максвелла и тепловой диффузии, была получена математическая модель зависимости между температурным режимом индукционной обработки, временем выдержки и коэффициентом диффузии азота. Модель показывает экспоненциальный рост коэффициента диффузии с повышением температуры, что соответствует закону Аррениуса.

Экспериментальные данные по высокотемпературному азотированию стальных образцов подтвердили рост концентрации азота в приповерхностном слое при повышении температуры обработки. Это согласуется с теоретической зависимостью, описывающей увеличение глубины диффузионного слоя при увеличении температуры. Выражения (7) и (8) дают теоретическое представление о глубине диффузионного слоя  $x$  в процессе азотирования, в реальности насыщение поверхности стали азотом и последующая его диффузия зависят от многих переменных факторов: фазовое состояние обрабатываемого изделия в момент времени  $t$ , количество и тип карбидов/твердых соединений в стали, а также ориентации зерен.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Palkanov P., Fomin A., Rodionov I. Structural transformations on the surface of 1.3343 tool steel and 12Cr18Ni10Ti stainless

steel after induction heat treatment and quenching // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1124. P. 081016.

2. **Вологдин В.П.** Поверхностная индукционная закалка: учебник. Москва: Оборонгиз, 1947. 291 с.

3. **Алиферов А.И., Луи С.** Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: учебник. Новосибирск: НГТУ, 2011. 409 с.

4. **Лахтин Ю.М., Коган Я.Д.** Азотирование стали. Москва: Машиностроение, 1976. 256 с.

5. Functionally graded Ti (C, N) coatings and their production on titanium using solid-state carburization associated with induction heat treatment / A. Fomin et. al. // Composite Structures. 2020. Vol. 245. P. 112393.

6. Rapid nitriding mechanism of titanium alloy by gas blow induction heating / S. Takesue et. al. // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 399. P. 126160.

7. Characterization of surface layer formed by gas blow induction heating nitriding at different temperatures and its effect on the fatigue properties of titanium alloy / S. Takesue et. al. // Results in Materials. 2020. Vol. 5. P. 100071.

8. **Бабат Г.И.** Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. 2-е изд., перераб. и доп. Москва – Ленинград: Энергия, 1965. 552 с.

9. A dynamic model for the simulation of induction heating devices / J. Nerg, K. Tolsa, P. Silventoinen, J. Pyrhonen. // IEEE Transac-

tions on Magnetics. 1999. Vol. 35. № 5. P. 3592-3594.

10. **Фомин А.А.** Научные основы термических процессов получения оксидных покрытий на титановых медицинских изделиях с применением токов высокой частоты: специальности 05.09.10, 06.16.01 «Электротехнология. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»: дис. д-ра техн. наук; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Саратов, 2017. 421 с.

11. Теория и технология азотирования: учеб. пособие / Ю.М. Лахтин и др. Москва: Металлургия, 1991. 320 с.

12. **Christiansen T.L., Somers M.J.** Determination of the concentration dependent diffusion coefficient of nitrogen in expanded austenite // International Journal of Materials Research. 2008. Vol. 99. № 5. P. 999-1005.

13. **Moskaliuviene T., Andriūnas P., Galdikas A.** Coupled Modeling of Anisotropic Stress-Induced Diffusion and Trapping of Nitrogen in Austenitic Stainless Steel during Nitriding and Thermal Annealing // Coatings. 2023. Vol. 13. № 2. P. 415.

14. **Палканов П.А., Кошуро В.А., Фомин А.А.** Численное моделирование и экспериментальное исследование процесса индукционной химико-термической обработки быстрорежущей стали Р6М5 // Вестник МЭИ. 2022. № 6. С. 76-85.

---

**Палканов Павел Алексеевич** – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Фомин Александр Александрович** – доктор технических наук, доцент, 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.

---

**Pavel A. Palkanov** – Postgraduate, Department of Electric Power and Electrical Engineering, 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 Laboratory of Induction, Plasma and Laser Technologies for Material Processing, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.01.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.314.263

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ УТРОИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА

М.А. Федин, М.А. Булатенко, А.А. Калинин,  
С.А. Коробков, Е.В. Качалина, П.В. Петров

## ELECTROMAGNETIC FREQUENCY MULTIPLIER FOR AN INDUCTION RESISTIVE HEATING SYSTEM

M.A. Fedin, M.A. Bulatenko, A.A. Kalinin,  
S.A. Korobkov, E.V. Kachalina, P.V. Petrov

*В статье рассматривается задача повышения энергоэффективности индукционно-резистивных систем нагрева (ИРСН) за счёт применения повышенных частот питающего напряжения. Приводятся результаты разработки и моделирования утроителя частоты на базе трёх однофазных трансформаторов, предназначенного для преобразования промышленной частоты 50 Гц в 150 Гц. Приведён конструктивный расчёт трансформатора, аналитический расчёт параметров утроителя и системы ИРСН. Моделирование, выполненное в среде MATLAB/Simulink, подтвердило работоспособность предложенной схемы. Использование утроенной частоты позволяет увеличить поверхностный эффект в ферромагнитной трубе ИРСН, что приводит к росту выделяемой мощности и, как следствие, к повышению эффективности нагрева. Получены временные диаграммы токов и напряжений, проанализированы формы выходных сигналов и мощность в нагрузке.*

Ключевые слова: *утроитель частоты, индукционно-резистивный нагрев, трансформатор, MATLAB/Simulink, поверхностный эффект*

### Введение

В наше время преобразователи частоты используются повсеместно. Они применяются в производстве на индукционных системах нагрева, в электроприводах посто-

*The article considers the issues related with improving the energy efficiency of induction-resistive heating systems (IRHS) by means of increased supply voltage frequencies. It presents the results of development and simulation of a frequency tripler based on three single-phase transformers designed to convert the industrial frequency of 50 Hz to 150 Hz. The structural calculation of the transformer, analytical calculation of the tripler parameters, and the IRHS system are provided. The simulation performed in the MATLAB/Simulink environment confirmed the operability of the proposed circuit. It is shown that the use of a tripled frequency enhances the skin effect in the ferromagnetic pipe of the IRHS, leading to an increase in the allocated power and, consequently, improvement in the heating efficiency. Timing diagrams of the currents and voltages were obtained, and forms of the output signals and load power were analyzed.*

Keywords: *frequency tripler, induction-resistive heating, transformer, MATLAB/Simulink, skin effect*

янного тока, для тяговых подстанций, в установках электрического электролиза. Различают полупроводниковые преобразователи частоты и электромагнитные преобразователи, работающие на переменном магнитном поле.

На основе полупроводниковых элементов работают устройства, преобразующие постоянный ток в переменный и наоборот, также способные менять частоту и амплитуду переменного тока – преобразователи частоты. Они довольно популярны в эксплуатации за счёт своей низкой стоимости и высокой эффективности. Такие аппараты могут работать в большом диапазоне напряжений, а небольшие размеры делают их широко распространёнными.

Однако полупроводниковые преобразователи не всегда могут обеспечить надёжность работы в экстремальных условиях. В результате перегрева их эффективность падает, а при высоких температурах элементы выходят из строя. Также они подвержены электрическим шумам и помехам, что нарушает общую надёжность использования таких устройств.

Для решения этих проблем используют электромагнитные преобразователи с насыщенным магнитопроводом.

Данная работа посвящена исследованию утроителя частоты на основе трех однофазных трансформаторов для индуктивно-

резистивной нагрузки. Целью является разработка концепции и анализ принципов работы устройства, которое способно генерировать выходной сигнал с частотой, в три раза превышающей входную, при этом обеспечивая приемлемые характеристики для питания ИРСН [1, 2].

Существует ряд преобразователей работающих на основе трансформаторов с нелинейными характеристиками.

Утроение частоты можно получить с помощью двух трансформаторов, первичные обмотки которых соединены последовательно и включены на синусоидальную ЭДС, а вторичные — встречно (рис. 1) [3]. Один из трансформаторов должен работать в режиме насыщения, другой — быть ненасыщенным; он выполняется с воздушным зазором в магнитопроводе. Потоки в сердечниках трансформаторов при надлежащем подборе степени насыщения содержат третьи гармоники, близкие по величине и сдвинутые между собой на  $180^\circ$ . При встречном включении вторичных обмоток третьи гармоники в выходной э. д. с. складываются, а основные почти отсутствуют.

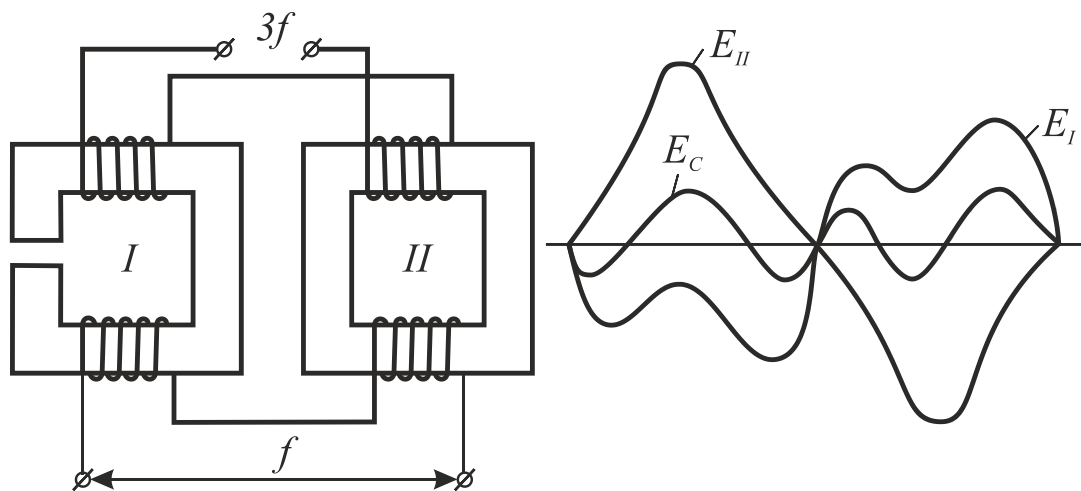


Рис. 1. Утроение частоты с помощью двух трансформаторов насыщенного и ненасыщенного

более экономичной, простой и распространённой является схема Спинелли [4], состоящая из трех однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены в звезду, а вторичные в разомкнутый треугольник (рис. 2). Фазные напряжения искажены и содержат высшие

гармоники, кратные трем. Линейные токи первичной сети близки к синусоидальным (в силу свойств трехфазных систем в токах нет третьих гармоник). В выходном напряжении нет основной гармоники, есть только третья (девятыми можно пренебречь).

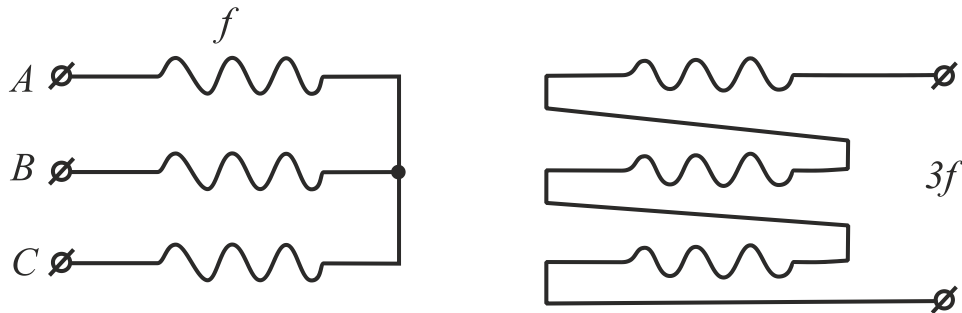


Рис. 2. Утроитель из трёх однофазных насыщенных трансформаторов

Схема Спинелли даёт по данным различных авторов первичный коэффициент мощности 0,4. Эта цифра дана для идеального утроителя без потерь. В реальных утроителях первичный коэффициент мощности обычно не превышает 0,4 при этом КПД схемы Спинелли может достигать 80-90 % [3].

Для питания индуктивно-резистивной нагрузки было решено выбрать преобразо-

ватель частоты на основе трёх однофазных трансформаторов (рис. 3). Их первичные обмотки соединены в звезду, вторичные в открытый треугольник. При подключении в звезду первичных обмоток, в сердечнике преобладает магнитный поток третьей гармоники. На вторичных обмотках наводится ЭДС с утроенной частотой, при этом гармоники всех трёх фаз синфазны и суммируются.

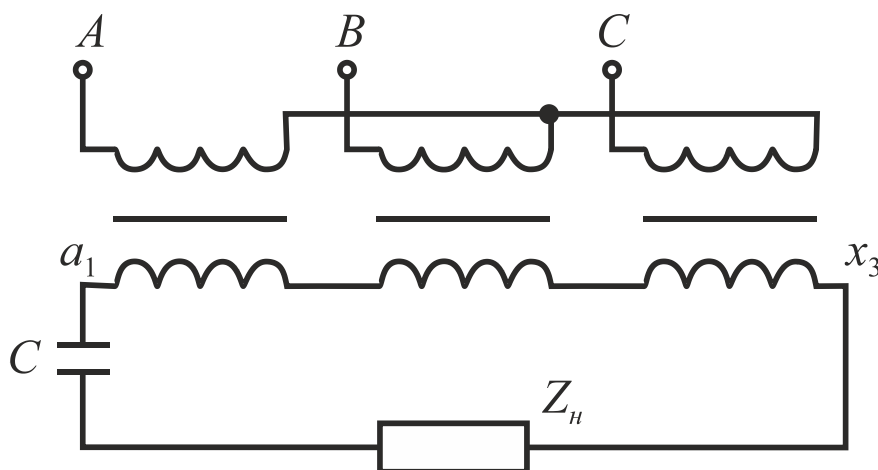


Рис. 3. Схема утроителя частоты на базе трёх однофазных трансформаторов

Моделирование утроителя частоты на основе трёх однофазных трансформаторов для ИРСН

В работе проведено проектирование и моделирование утроителя частоты, выполненного по схеме Спинелли, где три однофазных трансформатора соединены таким образом, что первичные обмотки включены в звезду, а вторичные – в разомкнутый треугольник. Это позволяет выделить на выходе напряжение тройной частоты за счёт суммирования третьих гармоник, генерируемых каждым трансформатором.

На основе этих данных выполнен конструктивный расчёт трансформатора. Параметры сердечника были подобраны исходя из габаритной мощности.

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта трансформаторов

Полная мощность трансформатора $S_n$ , ВА	63000
Низшее напряжение $U_1$ , В	230
Высшее напряжение $U_2$ , В	774
Напряжение питания $f$ , Гц	50

Определение габаритных параметров магнитопровода

$$S_c \cdot S_o = \frac{S_{n'} \cdot 10^2}{2,22 \cdot f \cdot k_c \cdot k_m \cdot \eta \cdot n \cdot j \cdot B}, \quad (1)$$

где  $S_c$  – площадь сечения сердечника;  $S_o$  – площадь сечения окна;  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $j$  – плотность тока в обмотках, А/мм<sup>2</sup>;  $\eta$  – КПД трансформатора;  $n$  – число стержней магнитопровода;  $k_c$  – коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью;  $k_m$  – коэффициент заполнения окна медью [5]. Для типоразмеров трансформаторов между площадью сечения сердечника и окна выполняется соотношение  $S_o = 4S_c$ .

Для магнитопроводов типа ПЛ площадь сечения сердечника и окна, подбираются из соображений уменьшения массы и объёма. Геометрические параметры определяются через основные размеры: ширину стержня –  $a$ , толщину пакета –  $b$ , высоту окна –  $h$  и ширину окна –  $c$ . Площадь сечения сердечника вычисляется как:

$$S_c = a \cdot b, \quad (2)$$

при этом для стандартных магнитопроводов характерно соотношение  $b = a/2$ .

#### Расчет электрических параметров обмоток

ЭДС одного витка рассчитывается по формуле электромагнитной индукции:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_c. \quad (3)$$

Сечения проводов обмоток определяются исходя из допустимой плотности тока:

$$S_{1пров} = \frac{I_1}{J}. \quad (4)$$

Потери в сердечнике магнитопровода обусловлены явлением гистерезиса и вихревыми токами. Расчет выполняется по формуле:

$$P_{cm} = P_{y\delta} \cdot M, \quad (5)$$

где  $P_{y\delta}$  – удельные потери в стали;  $M$  – масса магнитопровода, определяемая через объем стали и ее плотность.

Потери короткого замыкания обусловлены активным сопротивлением проводов:

$$P_k = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2. \quad (6)$$

Сопротивления обмоток вычисляются через удельное сопротивление меди  $\rho_{cu}$ , среднюю длину витка  $L_{cp.v}$  и количество витков  $w$ :

$$R = \rho_{cu} \cdot \frac{L_{cp.v} \cdot w}{S_{пров}}. \quad (7)$$

В качестве материала была взята трансформаторная сталь 3413. Её удельные потери магнитопровода:  $P_{y\delta} = 1,7$  Вт/кг, а плотность стали:  $\rho = 7650$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2 – Полученные параметры рассчитанного трансформатора

Ток обмотки низшего напряжения $I_{нн}$ , А	273,9	Масса $M$ , кг	66
Ток обмотки высшего напряжения $I_{вн}$ , А	81,4	Суммарные потери трансформатора $P_{\Sigma}$ , Вт	722
Индукция в стержне $B_m$ , Тл	2	Потери в стали $P_{cm}$ , Вт	116
Плотность тока $J$ , А/мм <sup>2</sup>	2,5	Потери короткого замыкания, $P_k$ , Вт	606
Число витков первичной обмотки $w_1$	72	Ток холосто хода $i_0$ , %	3,5
Число витков вторичной обмотки $w_2$	242	Напряжение короткого замыкания $u_k$ , %	6

#### Определение параметров для математического моделирования

Для построения модели в программной среде MATLAB/Simulink определяются параметры схемы замещения трансформатора.

Из схемы замещения однофазного трансформатора были найдены активное  $R_m$

$$R_m = \frac{U_{нн}^2}{P_{cm}}. \quad (8)$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом

$$X_m = \frac{U_{HH} \cdot 100}{i_0} \quad (9)$$

Индуктивность ветви намагничивания, Гн

$$L_{sat} = \frac{X_m}{2\pi f} \quad (10)$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k = \frac{P_k}{I_{HH}^2} \quad (11)$$

Полное сопротивление трансформатора при коротком замыкании

$$z_k = \frac{U_k}{I_{HH}} \quad (12)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора при опыте короткого замыкания

$$X_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (13)$$

Активное сопротивление обмотки  $HH$ , В

$$R_1 = \frac{r_k}{2} \quad (14)$$

Индуктивность обмотки  $HH$ , Гн

$$L_1 = \frac{x_k}{2 \cdot 2\pi f} \quad (15)$$

Активное сопротивление обмотки  $B_n$  приведенное к первичной обмотке, Ом

$$R'_2 = \frac{r_k}{2} \quad (16)$$

Активное сопротивление обмотки  $B_n$ , Ом

$$R_2 = \frac{R'_2}{k^2} = \frac{r_k}{2 \cdot k^2} \quad (17)$$

Индуктивность обмотки  $B_n$ , Гн

$$L_2 = \frac{x_k}{2 \cdot 2\pi f k^2} \quad (18)$$

### Задание параметров в MATLAB/Simulink

Для модели будем использовать Блок Saturable Transformer3 (трёхобмоточный трансформатор), но без третьей обмотки (рис. 4).

В нагрузке представлена система ИРСН имеющая технические характеристики: площадь поперечного сечения индукционно-резистивного проводника (ИРП)  $S = 12,6 \text{ мм}^2$ ; материал ИРП – медь; наружный диаметр трубы  $D = 20 \text{ мм}$ ; толщина стенки трубы  $h = 1,5 \text{ мм}$ ; материал трубы – сталь 10 ( $\rho_{st} = 1,72 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ); ток ИРП  $I_H = 90 \text{ А}$ ; частота тока  $f = 150 \text{ Гц}$ ; длина системы  $l = 1000 \text{ м}$ ; мощность составляет 60 кВт.

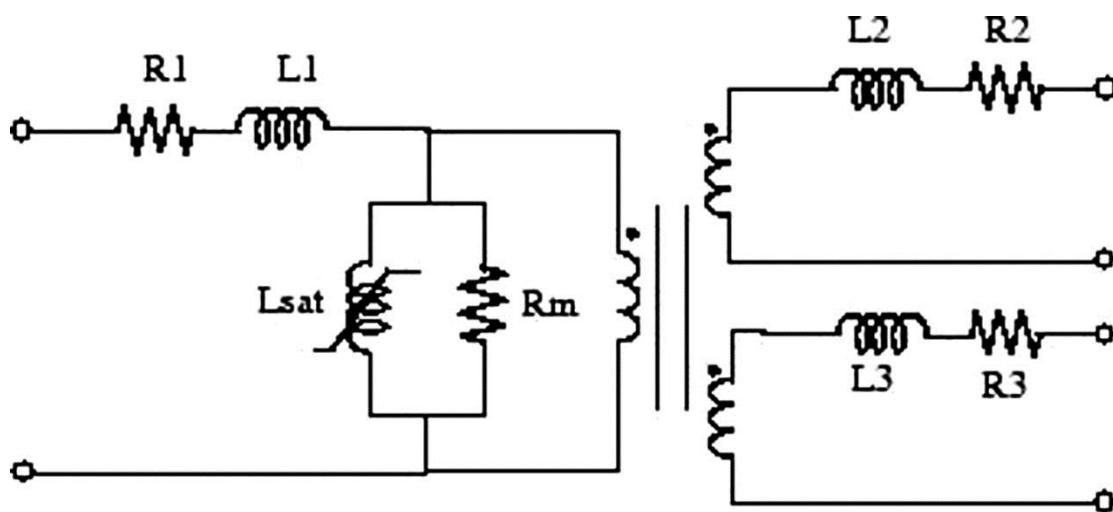


Рис. 4. Схема замещения однофазного трансформатора в MATLAB/SIMULINK

Для получения значений активного и индуктивного сопротивления ИРСН воспользуемся формулами:

$$R_n = \rho_{St} \cdot \frac{l}{S} = \rho_S \cdot \frac{l}{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (D - 2h)^2)}; \quad (19)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot C}, \quad (20)$$

где  $C$  – компенсирующая ёмкость.

В MATLAB/SIMULINK кривая намагничивания задаётся кусочно-линейной аппроксимацией по точкам, исходя из зависимости тока намагничивания  $I_\mu$  от потокоцепления  $\psi$  (рис. 6).

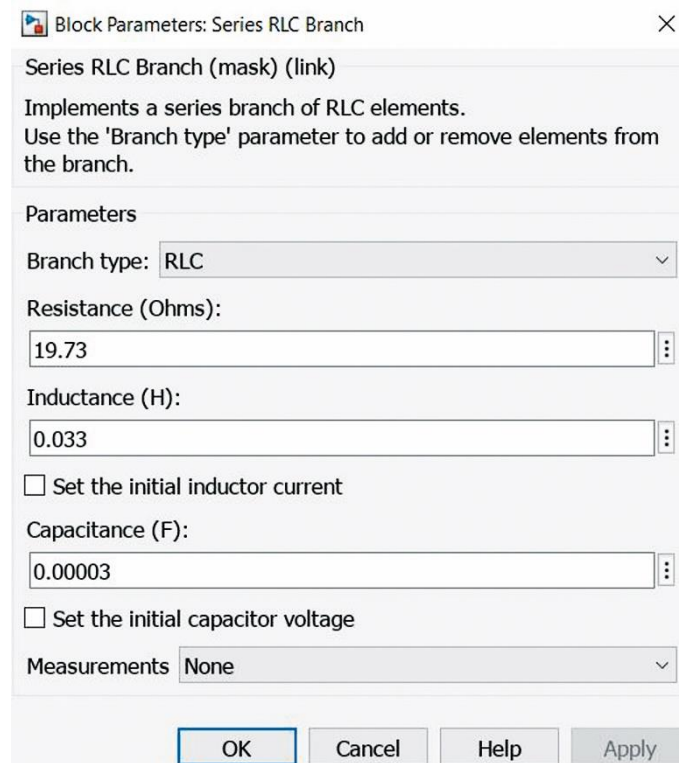


Рис. 5. Задаваемые параметры на нагрузку в MATLAB/SIMULINK

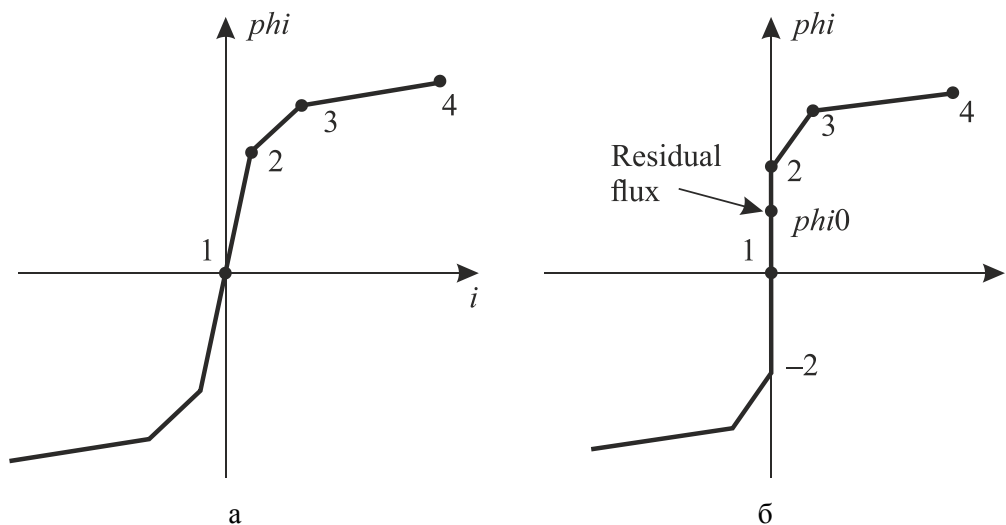


Рис. 6. Характеристика насыщения: а – no residual flux can be specified; б – a residual flux can be specified between points 2 and -2

По кривой намагничивания находится индукция и напряжённость стали (рис. 7, по расчётным формулам (21), (22) задаются точки, для моделирования [6].

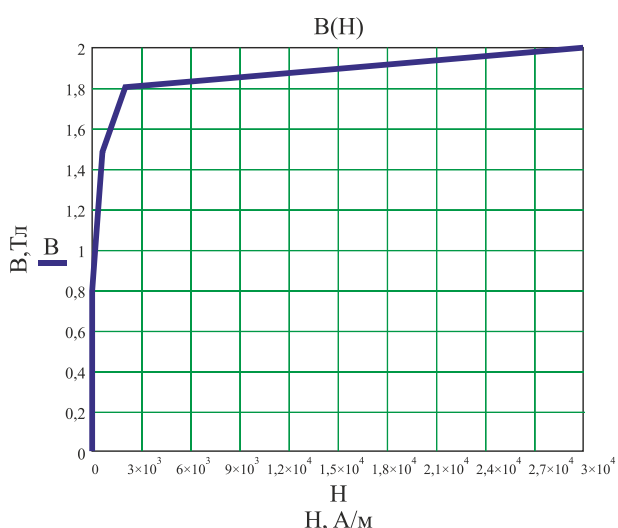


Рис. 7. Кривая намагничивания для сплава стали 3413

Потокосцепление:

$$\psi = B \cdot S \cdot w. \quad (21)$$

Ток намагничивания:

$$I_{\mu} = \frac{H \cdot l}{w}. \quad (22)$$

Таблица 3 – Данные кривой намагничивания

$B, \text{Тл}$	0	0,6	1,5	1,8	2
$H, \text{А/м}$	0	87	426	1922	30000
$\psi, \text{Вб}$	0	0,311	0,777	0,933	1,037
$I, \text{А}$	0	1,45	7,1	32	500

В результате работы в Simulink была получена имитационная модель электромагнитного утроителя частоты (рис. 8). Питательная сеть представлена источником, в котором задаются амплитудные значения фазных напряжений и фазовые сдвиги.

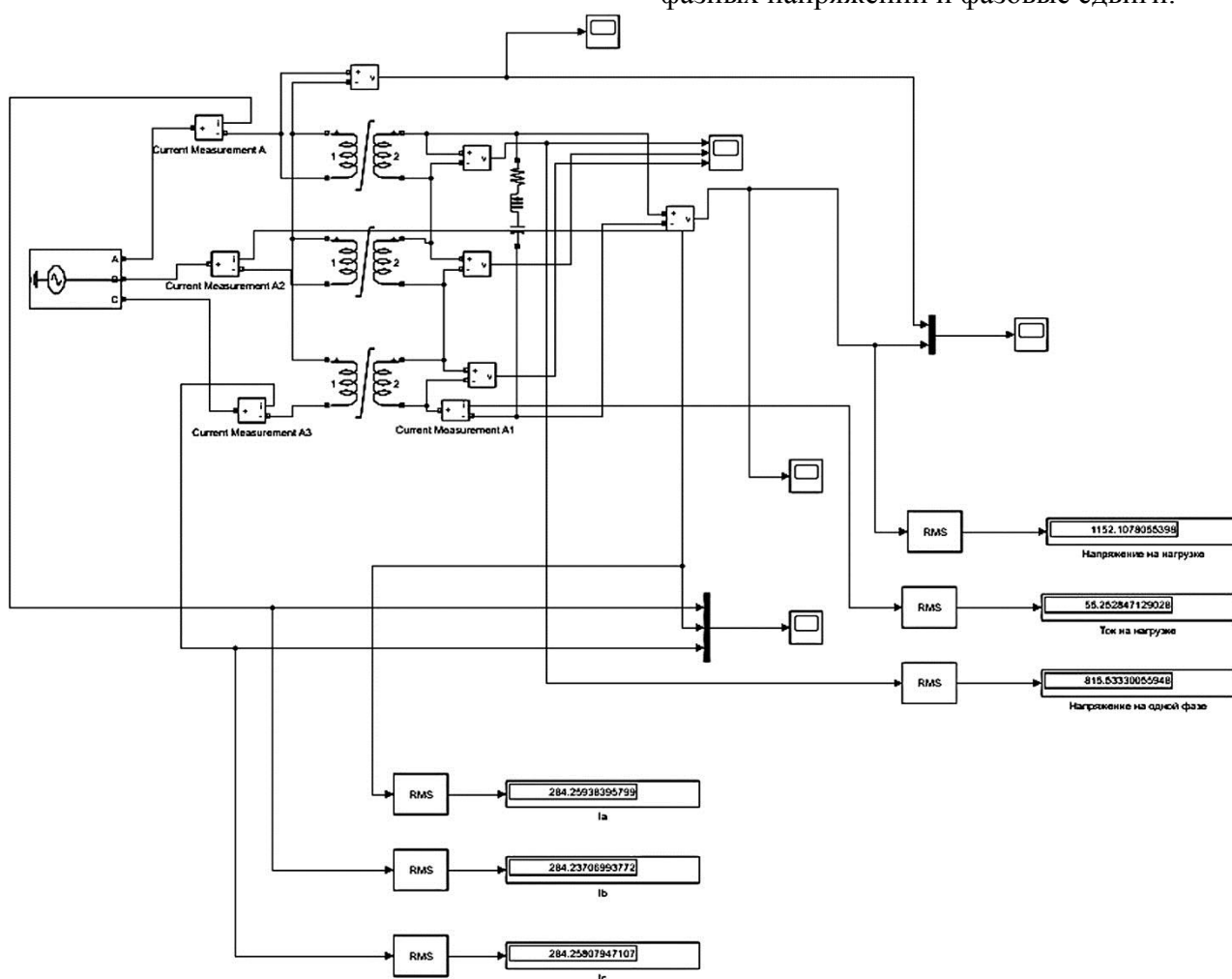


Рис. 8. Имитационная модель утроителя частоты на базе трех однофазных трансформаторов

С его выходов питающее напряжение подаётся на электромагнитный утроитель частоты, представленный тремя нелинейными двухобмоточными однофазными трансформаторами.

Вторичные обмотки трансформаторов соединены в открытый треугольник и подключены к осциллографам. В свойствах блока трансформатора задаются электрические параметры трансформаторов.

Виртуальные осциллографы позволяют получать временные диаграммы действующих значений фазных токов и напряжений.

### Результаты расчёта электрической модели утроителя частоты

Проверка работоспособности любого преобразователя, включая утроитель частоты, начинается с режима холостого хода. Этот режим позволяет оценить внутренние процессы без влияния внешней нагрузки и убедиться, что базовый принцип преобразования работает корректно.

На (рис. 9) показано фазное напряжение на вторичной обмотке одного из трех однофазных трансформаторов. По графику видно, что сигнал не является идеальной синусоидой, однако внутри самого трансформатора преобладает основная гармоника 1-я (50 Гц), так же там присутствуют 3-я (150 Гц), 5-я (250 Гц), 7-я (350 Гц) и 9-я (450 Гц) гармоники. Сигнал искажен вследствие работы трансформаторов в режиме насыщения магнитопровода, когда сердечник насыщается, магнитный поток перестает линейно зависеть от намагничивающего тока. Эта нелинейность является генератором высших гармоник.

Вторичные обмотки образуют открытый треугольник и происходит встречное сложения фазных напряжений из-за чего, 1-я гармоника, как 5-я и 7-я, вычитаются, выдавая нулевую результирующую в линейном напряжении. А 3-я гармоника и 9-я в такой системе оказываются синфазными и складываются друг с другом при этом утраивая частоту (рис. 10).

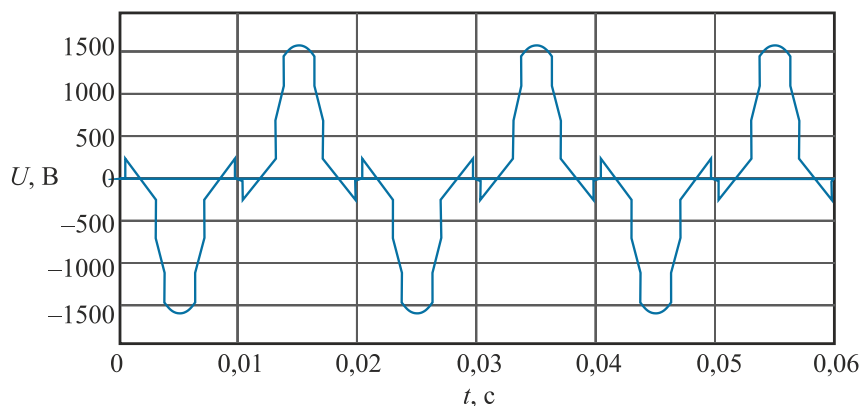


Рис. 9. График напряжения на вторичной обмотке одного трансформатора

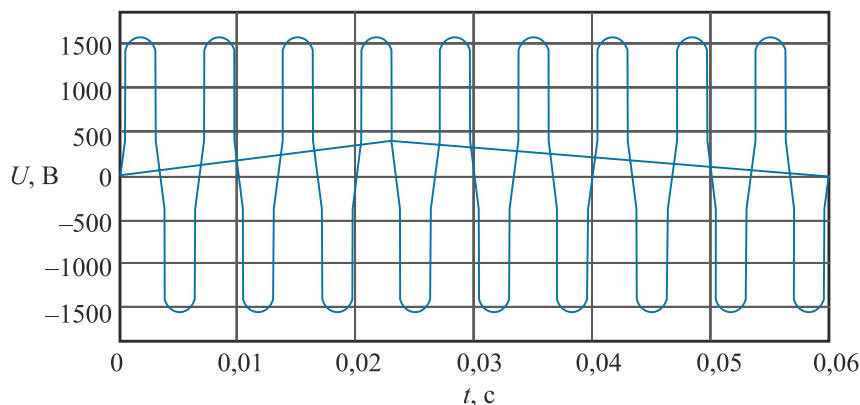


Рис. 10. Напряжение на выходных зажимах утроителя частоты на холостом ходу

После успешной проверки на холостом ходу к выходу утроителя подключается ИРСН, представленный в модели как RLC-цепь.

На рис. 11 изображён график тока одной из фаз. Он имеет ярко выраженную несинусоидальную форму с острым пиком. Это вид тока намагничивания трансформатора, работающего в режиме. Пик обусловлен тем, что для создания магнитного потока в насыщенном сердечнике требуется непропорционально большой ток. Этот факт объясняет низкий коэффициент мощности подобных схем, так как

ток сильно искажен и содержит большую реактивную составляющую.

Форма напряжения на вторичных обмотках еще более искажена по сравнению с режимом холостого хода (рис. 12). Это происходит из-за падения напряжения на активном сопротивлении и индуктивности рассеяния обмоток при протекании нагрузочного тока. Несмотря на искажения, схема продолжает выполнять свою основную функцию. На рис. 13 изображено повторное сопоставление входного (50 Гц) и выходного (150 Гц) напряжений, в рабочем режиме.

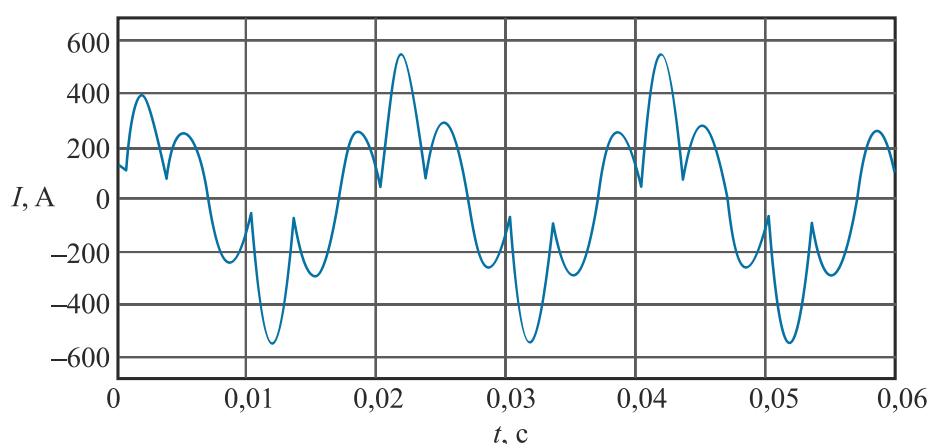


Рис. 11. График изменения тока на первичной обмотки

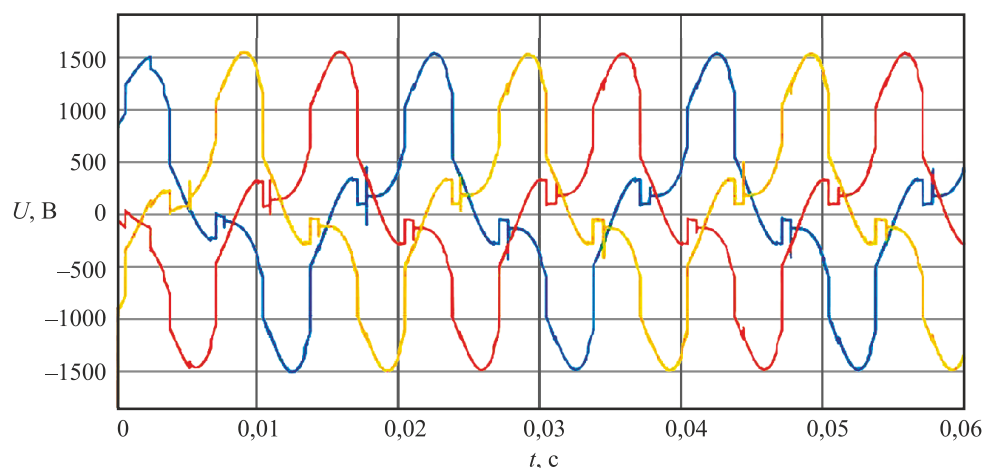


Рис. 12. Графики вторичных напряжений каждой фазы

Через нагрузку протекает ток утроенной частоты. В отличие от напряжений на вторичных обмотках, форма тока нагрузки является заметно более гладкой и близкой к идеальной синусоиде (рис. 14).

Это прямое следствие работы согласующего LC-контра. Такой контур действует как полосовой фильтр. Он обладает минимальным импедансом на частотах, близких к резонансной, что позволяет току этой частоты протекать практически беспрепятственно.

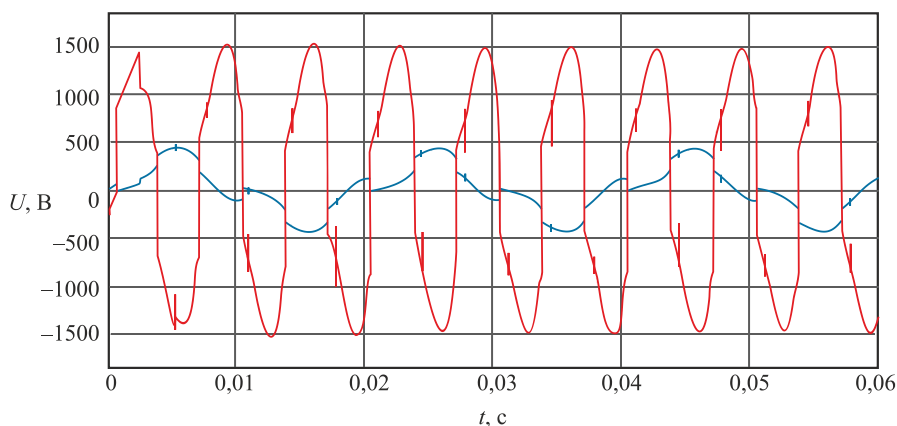


Рис. 13. Сравнение первичного и выходного напряжений

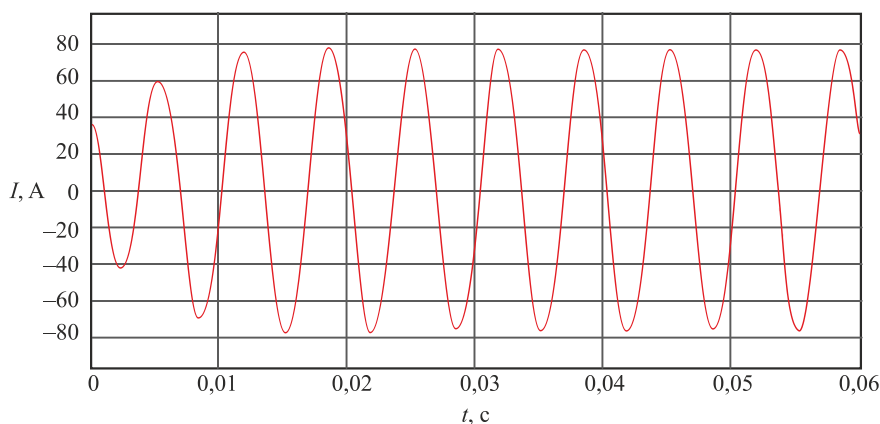


Рис. 14. Временная диаграмма тока на нагрузке

Конденсатор выполняет важную энергетическую функцию, компенсируя реактивную составляющую мощности индуктивной нагрузки. Он существенно повышает коэффициент мощности системы, что приводит к росту активной мощности, передаваемой в нагрузку, при тех же значениях тока и напряжения, тем самым повышая общую энергоэффективность и выходную мощность утрителя.

### Заключение

В ходе выполнения работы была проведена комплексная разработка и исследование утрителя частоты для индуктивно-резистивной системы нагрева (ИРСН), реализованного на основе трёх однофазных трансформаторов.

Проведенное исследование включало несколько ключевых этапов. На первом этапе выполнен обзор существующих схем преобразователей частоты. Схема на основе трех однофазных трансформаторов со вто-

ричными обмотками, соединенными в разомкнутый треугольник, показала оптимальное сочетание надежности, простоты реализации и устойчивости к перегрузкам.

На втором этапе проведен детальный расчет параметров однофазных трансформаторов, включающий конструктивный расчет магнитопровода, обмоток, потерь мощности и тепловых характеристик. Для трансформатора мощностью 63 кВА получен КПД 98,8 %.

Третий этап работы заключался в создании и верификации имитационной модели утрителя частоты в среде MATLAB/Simulink. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной схемы в которой наблюдается четкое утроение частоты с 50 Гц до 150 Гц. При этом анализ временных диаграмм показал, что форма выходного напряжения имеет характерные искажения, обусловленные нелинейностью магнитных характеристик трансформаторов и влиянием высших гармоник.

Важным результатом исследования стало подтверждение эффективности применения компенсирующего LC-контура. Установлено, что через нагрузку протекает ток утроенной частоты с значительно более гладкой формой по сравнению с напряжением, что объясняется фильтрующими свойствами колебательного контура.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения трансформаторных утроителей частоты в системах промышленного нагрева. Разработанная схема обладает высокой надежностью, гальванической развязкой и устойчивостью к неблагоприятным условиям эксплуатации, что делает ее конкурентоспособной альтернативой полупроводниковым преобразователям в ответственных применениях.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №

FSWF-2025-0010 «Разработка научно-технических основ создания программных и аппаратных решений для управления объектами энергетики с использованием цифровых двойников и технологий искусственного интеллекта». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

*This work was supported by ongoing the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ FSWF-2025-0010 "Development of scientific and technical foundations for the creation of software and hardware solutions for managing energy facilities using digital twins and artificial intelligence technologies" funding. No additional grants to carry out or direct this particular research were obtained. The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кувалдин А.Б.** Индукционный нагрев ферромагнитной стали. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 198 с.

2. **Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б.** Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. 2-е изд., переработанное и дополненное. Вологда: ООО Инфра-Инженерия, 2023. 524 с.

3. **Рожанский Л.Л.** Статические электромагнитные преобразователи частоты.

Москва: ИЦ «Государственное энергетическое издательство», 1972. 97 с.

4. **Рожанский Л.Л.** Статические электромагнитные преобразователи частоты. Москва – Ленинград: Госэнергоиздат, 1959.

5. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.

6. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем ПК. Санкт-Петербург: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

**Федин Максим Андреевич** – доктор технических наук, профессор кафедры ЭППЭ Национального исследовательского университета «МЭИ»

**Булатенко Мария Андреевна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры ЭППЭ Национального исследовательского университета «МЭИ»

**Maxim A. Fedin** – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of EPPE at the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**Maria A. Bulatenko** – PhD in Economics, Associate Professor, Department of EEPE at the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**Калинин Артем Андреевич** – магистрант кафедры ЭМЭА Национального исследовательского университета «МЭИ»

**Коробков Сергей Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры ЭМЭА Национального исследовательского университета «МЭИ»

**Качалина Елена Викторовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры ЭМЭА Национального исследовательского университета «МЭИ»

**Петров Павел Валерьевич** – студент кафедры ЭППЭ Национального исследовательского университета «МЭИ»

**Artem A. Kalinin** – Master's Degree holder, EMEEA Department at the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**Sergey A. Korobkov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, EMEEA Department at the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**Elena V. Kachalina** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, EMEEA Department at the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

**Pavel V. Petrov** – Undergraduate, EMEEA Department at the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

*Статья поступила в редакцию 20.01.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.793

**РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ТРОАКАРА****А.Ю. Сармин, С.Я. Пичхидзе****DEVELOPMENT OF AN UPGRADED TROCAR DESIGN****A.Yu. Sarmin, S.Ya. Pichkhidze**

*В работе рассмотрена разработка модернизированной конструкции троакара за счёт нанесения на стилет покрытия ta-C – тетраэдрического аморфного углерода, относящегося к классу алмазоподобных углеродных плёнок. Представлены технологические особенности метода PVD-нанесения покрытия, включающие предварительную очистку поверхности, ионное травление и формирование адгезионного слоя. Приведены результаты экспериментального исследования твердости, износостойкости и толщины полученного покрытия, определённых методом шарового истирания на приборе «Константа Ш2». Показано, что внедрение ta-C покрытия значительно повышает износостойкость стилета и обеспечивает улучшенные эксплуатационные характеристики медицинского инструмента.*

Ключевые слова: стилет, покрытие, твердость

**Введение**

Современная хирургия стремительно развивается, внедряя в практику малоинвазивные методы лечения, позволяющие значительно сократить восстановительный период пациентов, снизить уровень послеоперационных осложнений и повысить общую эффективность вмешательств. Одним из ключевых инструментов, применяемых в лапароскопической хирургии, является троакар – медицинское изделие, обеспечивающее доступ в полость тела пациента с минимальной травматичностью.

Троакар – хирургический инструмент, представляющий собой полую стальную трехгранную иглу с надетой на неё труб-

*The paper considers the development of an upgraded trocar design by applying a ta-C coating on the stylet, a tetrahedral amorphous carbon belonging to the class of diamond – like carbon films. The technological features of the PVD coating method are presented, including pre-cleaning of the surface, ion etching and formation of an adhesive layer. The results of the experimental study of the hardness, wear resistance and thickness of the resulting coating, determined by the method of ball abrasion on the Constant Sh2 device, are presented. It is shown that introduction of the ta-C coating significantly increases the wear resistance of the stylet and provides improved performance characteristics of the medical instrument.*

Keywords: stylet, coating, hardness

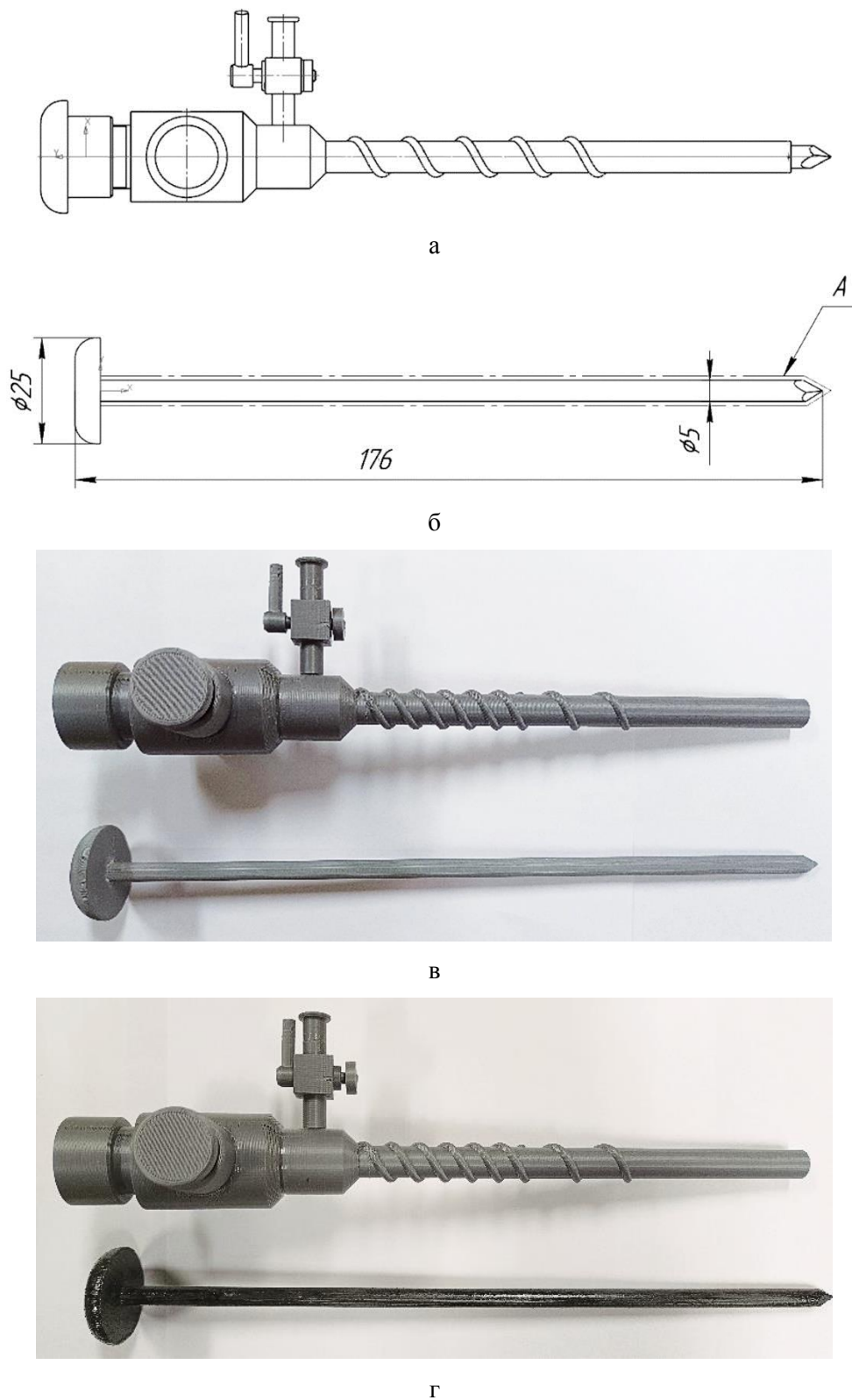
кой, предназначенный для прокола грудной или брюшной стенки.

Через установленные троакары в тело пациента вводятся эндоскопические инструменты, камера и другое оборудование, необходимое для проведения операций. Несмотря на широкое распространение троакаров и их значимость в современной хирургии, существует ряд конструктивных и эксплуатационных недостатков, требующих дальнейшего исследования и устранения [1-6].

Для повышения эксплуатационных характеристик стилета, было принято решение о нанесении покрытия ta-C (тетраэдрический аморфный углерод). Этот тип по-

крытия относится к классу алмазоподобных углеродных покрытий и является одним из наиболее твердых и износостойких среди

них [7]. На рис. 1 показан эскиз троакара со стилетом и его распечатанная 3Д – модель из Полиамида РА6.



**Рис. 1.** Троакара со стилетом, где а – троакара в сборе; б – стилет, А – та-С покрытие; в – 3Д-троакара и титановый стилет, г – 3Д-троакара и титановый стилет с покрытием та-С

Покрытие ta-C (термодинамически стабилизированный аморфный углерод, tetrahedral amorphous carbon) – это один из видов аморфного углерода, который имеет уникальную структуру, отличающуюся высокой плотностью и жесткостью. Это покрытие широко используется в различных областях благодаря своим исключительным свойствам, которые делают его востребованным в промышленности, медицине и высокотехнологичных отраслях.

**Цель работы:** повышение коррозионной стойкости и износостойкости титанового стилета троакара.

### Основная часть

Твердость ta-C покрытия значительно выше, чем у большинства других материалов, включая некоторые металлы и обычный аморфный углерод. По шкале Виккерса (Vickers hardness) ta-C может иметь твердость в пределах 60-80 ГПа, что делает его почти таким же твердым, как алмаз.

Высокая твердость придает этому материалу отличную износостойкость, что делает его идеальным для защиты поверхностей от трения, износа и повреждений.

Покрытия ta-C обладают химической устойчивостью ко многим химическим веществам, включая кислоты и щелочи. Это свойство делает их подходящими для работы в агрессивных средах, где другие покрытия могут быстро деградировать. Покрытия ta-C могут выдерживать высокие

температуры, сохраняя свои механические и физические свойства при температурах до 500-600 °С. Это делает их идеальными для использования в экстремальных условиях, например, в двигателях, механизмах, подверженных перегреву, или в промышленности, где используются высокотемпературные процессы.

Покрытия ta-C обладают низким коэффициентом трения и гладкой поверхностью, что делает их идеальными для применения в различных механизмах и устройствах, где важна минимизация износа и трения, например, в подшипниках, шестернях и других движущихся частях.

В отличие от других материалов углерода, таких как графит или графен, ta-C покрытия обладают низкой проводимостью, что делает их надежными изоляторами, и они могут использоваться в электрических устройствах и компонентах, где требуется защита от коротких замыканий или перенапряжений [8].

### Технология нанесения

Сущность технологии нанесения ta-C покрытия заключается в том, что перед покрытием поверхность детали подвергается тщательной ультразвуковой очистке от окисных пленок и загрязнений, рис. 2. После очистки происходит ионное травление хромом и нанесение адгезионного слоя Cr, затем повторяется ионное травление хромом длительностью 60 с.



Рис. 2. Маршрутная карта PVD-нанесения покрытия на высоковакуумной установке DREVA 600

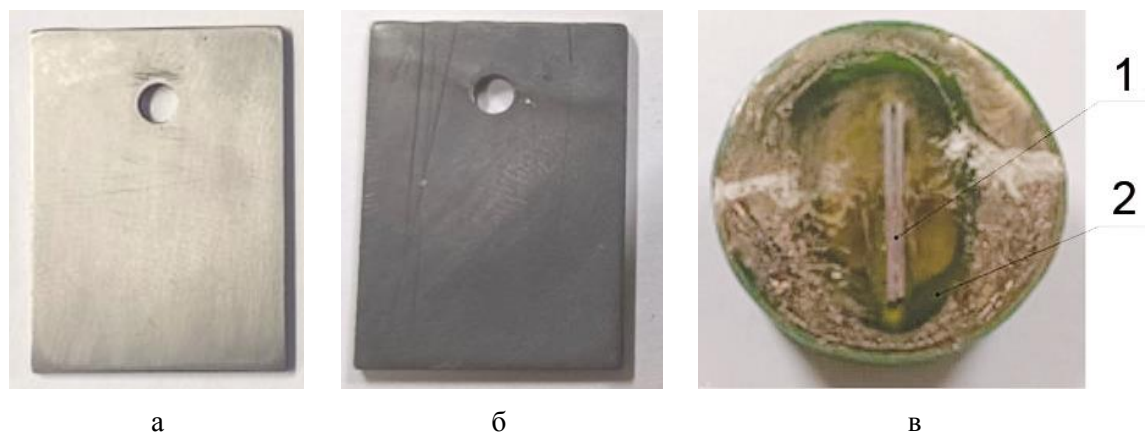
Для обеспечения необходимой адгезии на поверхность детали методом PVD предварительно наносится адгезионный углеродистый слой. Установка имеет камеру, в которой

твердый графит под действием ARC-модуля лазера для тока нагрузки 40 А превращается в газообразное состояние. Затем с помощью плотного потока плазмы, создаваемой полым

катодом, и с помощью дуговых вакуумных источников испарения, парообразный графит переводится в возбужденное ионизированное состояние. Под действием напряжения смещения графит осаждается на поверхности адгезионного слоя детали, превращаясь в алмазоподобное тетрагональное аморфное та-С покрытие [8].

### Материалы и методы исследования

**Материалы:** стандартные образцы: 1) пластины 20×20×2 мм, материал сплав ВТ1-00. Троякар-Полиамид РА6 по ГОСТ 10589-2016, стилет – материал сплав ВТ1-00 по ГОСТ 26492-85, ГОСТ 19807-91, рис. 3.



**Рис. 3.** Образцы для исследования из ВТ1-00: а – пластина до покрытия; б – после покрытия; в – шлиф образца, где 1 – подложка с покрытием та-С; 2 – эпоксидная смола

### Методы исследования

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре «ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific» методом рентгеновской дифракции в излучении Cu-K $\alpha$  (длина волны  $\lambda = 0,154178$  нм) с интервалом углов рассеяния от 5 до 90° в автоматическом режиме при скорости съёмки 2°/мин. При работе использовались напряжение 40 кВ и электрический ток 40 мА. Фазовый анализ покрытий образцов выполнен в программном комплексе PDXL с использованием базы данных ICDD. Анализ РФА образца после нанесения та-С покрытия показал наличие рефлексов, относящихся к кристаллическим фазам Ti, TiC и Ti<sub>2</sub>C, рис. 4, что согласуется с данными рис. 5 по повышению микротвёрдости поверхностного слоя.

Интенсивности рефлексов дифрактограммы образца указывают на достаточное количество образующегося карбида TiC. Видно, что отдельные пики двойные, имеет место наложение рефлексов Ti и TiC, особенно в области углов 76...78°.

Механические характеристики покрытий оценивались путем исследования микротвёрдости поверхности образцов и их износостойкости.

Измерение микротвёрдости образцов с покрытием проводилось по ГОСТ 9450-76 [10]. Выявлено, что микротвёрдость с нанесённым покрытием возросла на 1723 единицы HV, что, в свою очередь, свидетельствует о значительном повышении физико-механических свойств образцов.

Оценка износостойкости проводилась испытанием на трение с использованием прибора «Константа Ш2» (ISO 26423) на исследуемых образцах, рис. 6. Параметры шарового истирания включали в себя значения диаметров шпинделя, шарика и ширины дорожки качения. Исходные данные: диаметр шарика  $D_{III} = 20$  мм, продолжительность теста 120 с, частота вращения шпинделя электропривода 1300 об/мин, абразивная суспензия с диаметром алмазных частиц 15 мкм. Расчет износостойкости  $I$  проводился в соответствии с известными рекомендациями по ISO 26423, а также класса износостойкости КИ (Р 50-95-88 Рекомендации) [9].

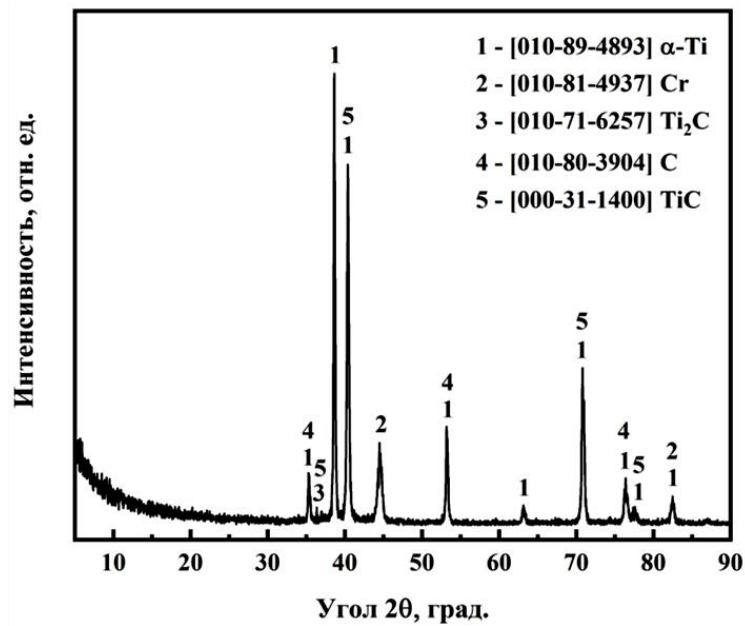


Рис. 4. РФА образца после нанесения ta-C

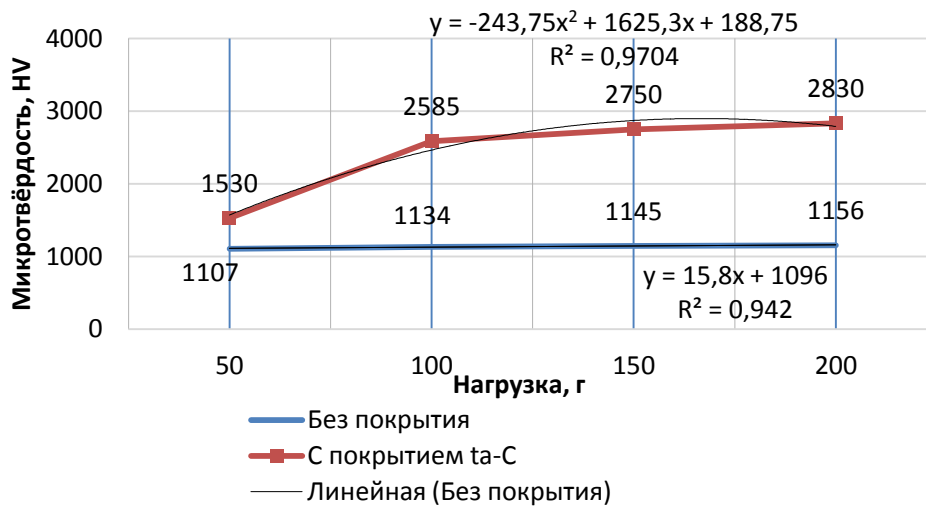


Рис. 5. Зависимость микротвёрдости от нагрузки

Износостойкость образцов определялась на устройстве абразивного шарового истирания Calotest. Геометрические параметры схемы шарового истирания включали в себя характеристики диаметров шпинделя, шарика и ширины дорожки качения, рис. 6. Параметры исследования выбирались исходя из известных данных о размерах образцов, толщине и твердости покрытия: диаметр шарика  $D_b = 20$  мм, продолжительность теста 120 с, частота вращения шпинделя электропривода 1300 об/мин.

Расчет износостойкости проводился в соответствии с известными рекомендац-

ями Р 50-95-88 по определению износостойкости  $I$

$$I = \frac{\Delta L}{\Delta H},$$

где  $\Delta L$  – длина пройденного пути;  $\Delta H$  – приращение линейного износа.

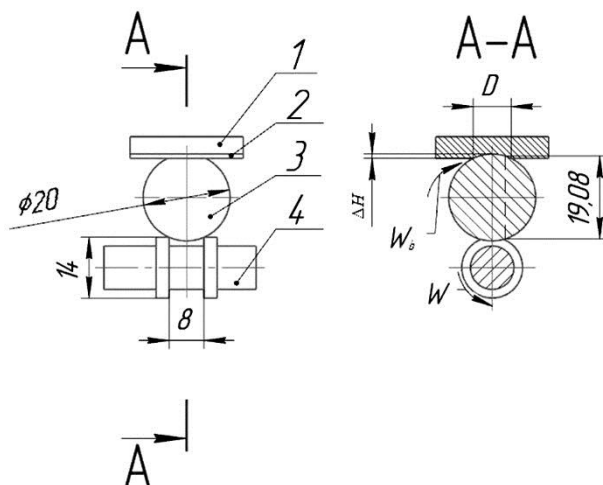
Для определения класса износостойкости КИ по рассчитанному значению износостойкости  $I$  необходимо представить ее в показательной форме:

$$I = \alpha_K \times 10^K,$$

где  $K$  – целое число, обозначающее класс износостойкости;  $\alpha_K$  – число, обозначающее разрядность.



Прибор Константа Ш2, машина трения



Геометрическая модель схемы шпindelь-шарик-образец при испытании износостойкости, где 1 – образец; 2 – покрытие; 3 – шарик; 4 – шпindelь

Рис. 6. Прибор Константа Ш2 и геометрическая модель схемы при износе

Чтобы воспользоваться известной методикой расчета износостойкости, необходимо определить длину пройденного пути  $\Delta L$  с использованием схемы сопряжения шарика и канавки качения шпинделя. Приравнивание линейных скоростей по контактной траектории, диаметр которой составил 19,12 мм, позволило определить частоту вращения шарика  $w_{Ш}$ . Ее значение снижалось по отношению к частоте вращения шпинделя  $w$ :

$$w_{Ш} = \frac{w \times R}{R^*} = \frac{1300 \times 0,007}{0,00956} = 951,88 \text{ [об/мин]},$$

где  $R$  – радиус шпинделя, м;  $R^*$  – радиус контактной траектории, м;  $w$  – частота вращения шпинделя, об/мин.

Длина пути  $\Delta L$ , пройденная твердосплавным шариком, вычислялась с использованием следующих входных данных: радиус шарика  $R_{Ш} = 20/2 = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$ , время вращения шарика  $t = 2 \text{ мин}$ :

$$\Delta L = 2\pi \times R_{Ш} \times w_{Ш} \times t = 2 \times 3,14 \times 0,01 \times 951,88 \times 2 \approx 119,5 \text{ [м]}.$$

Для определения приращения линейного износа  $\Delta H$  измерялись диаметры отпечатков, полученные после испытаний. Расчет проводили по формуле:

$$\Delta H = R_{Ш} - \frac{1}{2} \left( \sqrt{4R_{Ш}^2 - D^2} \right);$$

$$\Delta H = 0,01 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{4 \times 0,01^2 - 0,000568^2} \right) = 0,0056 \text{ м},$$

где  $D$  – диаметр отпечатка, м.

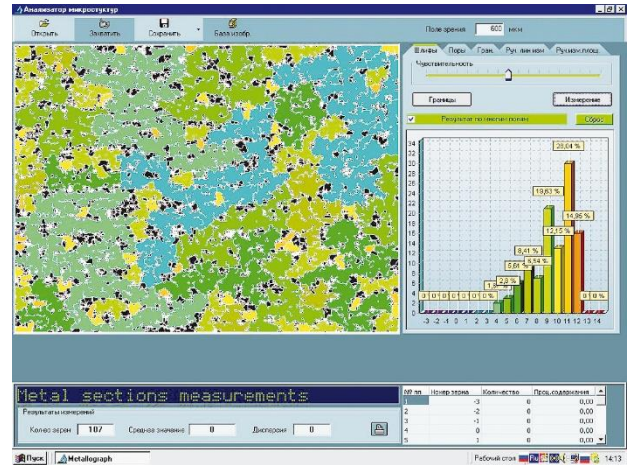
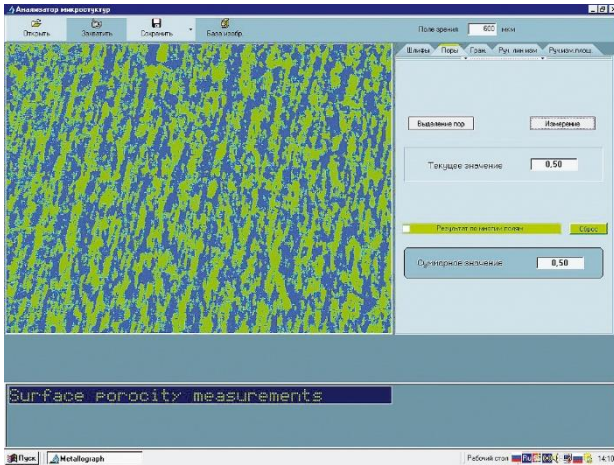
На анализаторе изображения микроструктур АГПМ-6М было проведено сравнение пористости покрытия, рис. 7. АГПМ-6М предназначен для полуавтоматического контроля визуализации и вычисления, данных о линейных размерах микрообъектов, форме макрочастиц и создания архива изображений микрообъектов. Обычно, он применяется для анализа материалов, используемых в качестве основного компонента плазменно-напыленных покрытий.

По результатам анализа рис. 7 видно, что поверхностная пористость образца после нанесения покрытия уменьшается с 0,50 до 0,46 ед. Размеры мелких зерен с № 11 и № 12 возрастают с 42,99 до 52,23 отн. %, соответственно [11]. Толщина нанесенного покрытия определена на шлифе методом растровой электронной микроскопии и составила 1,66 мкм, рис. 8.

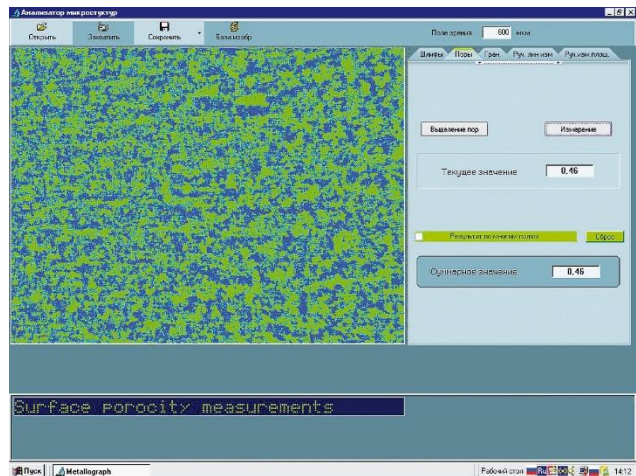
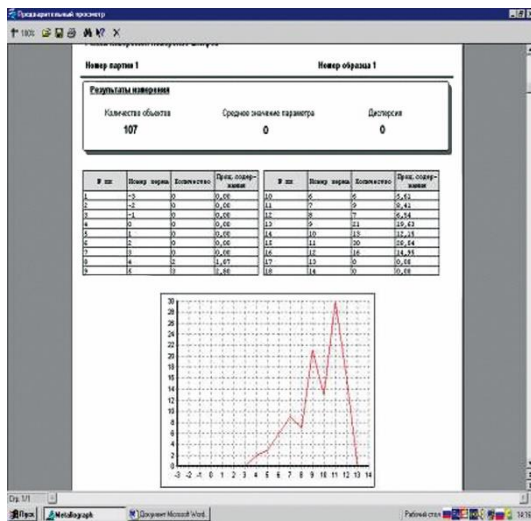
Для определения химического состава был проведен ЭДРА – энергодисперсионный рентгеновский анализ, рис. 9.

Ниже приведены данные ЭДРА анализа разных точек образца. На рис. 9 а данные получены для точки, где отсутствует покрытие ta-C. Видно, что титан преобладает.

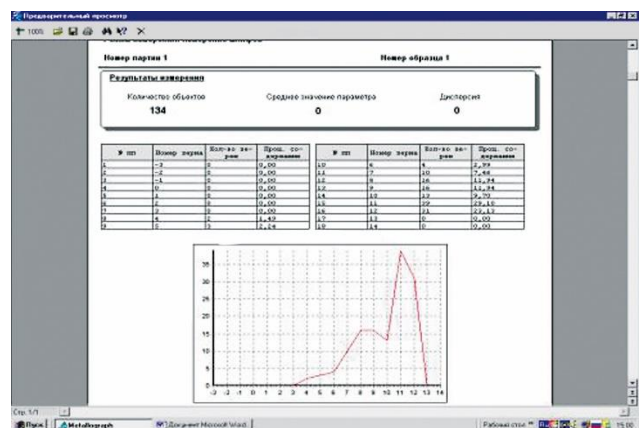
На рис. 9 б данные получены для точки, попадающей на покрытие ta-C, здесь количественное содержание углерода увеличивается.



а б



в г



д е

Рис. 7. Результаты исследования образцов (а-в – исх., г-е – после нанесения покрытия) на анализаторе изображения, где а, г – поверхностная пористость; б, д – шлиф; в, е – распределение по размерам

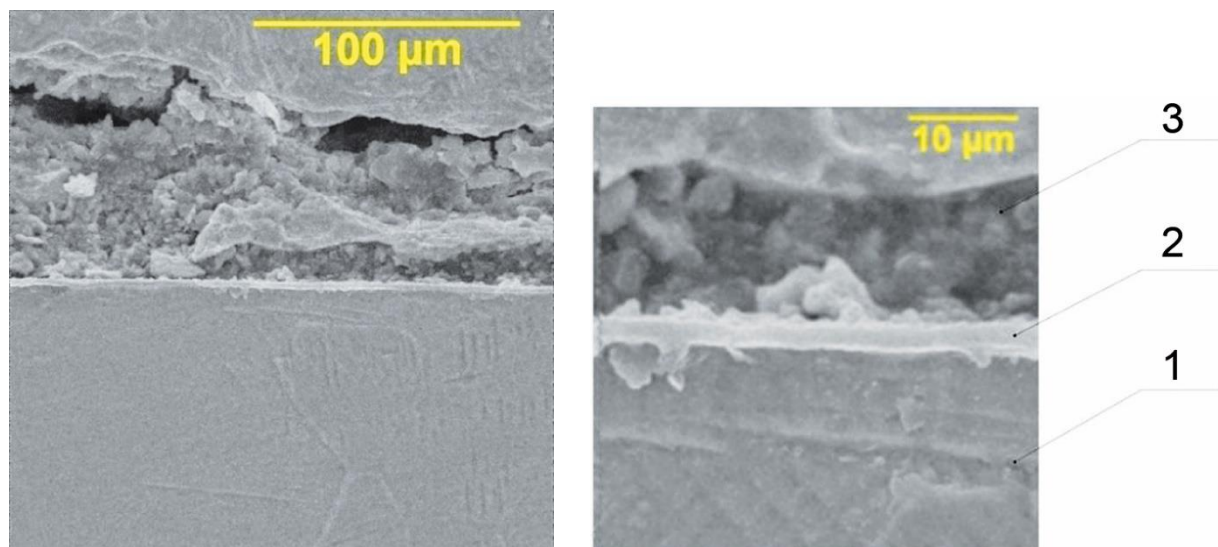
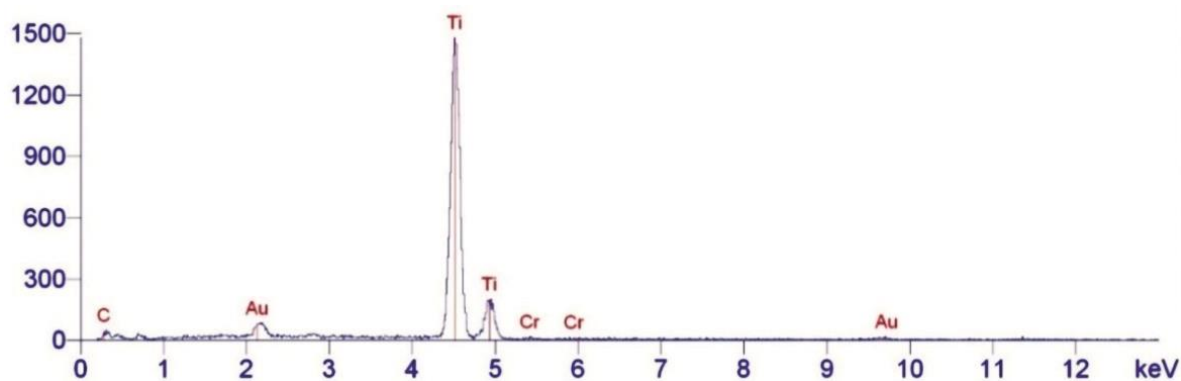
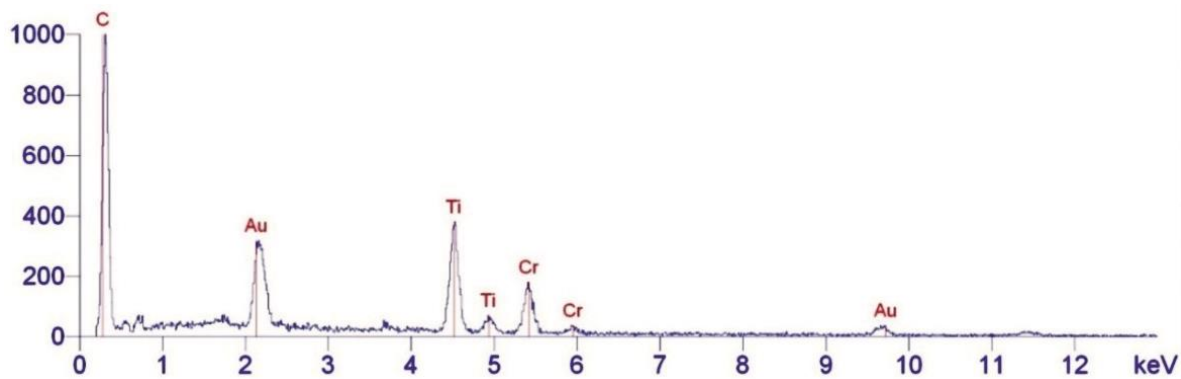


Рис. 8. Изображение микроструктуры образца:  
1 – подложка; 2 – покрытие ta-C; 3 – слой эпоксидной смолы



а



б

Рис. 9. Энергодисперсионный анализ исследуемого образца:  
а – исходного; б – после нанесения покрытия

### Коррозионные испытания

Коррозионные испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.908-85 с использованием гравиметрического метода. Образцы взвешивались на аналитических весах с точ-

ностью до 0,0001 г до и после выдержки в коррозионной среде. Исследования проводились в физиологическом водном растворе 0,9 вес. % NaCl при  $20 \pm 1$  °C. Продолжительность испытаний: 1, 7, 14 и 30 суток.

Массовый показатель коррозии ( $K_M$ ) рассчитывался по формуле

$$K_M = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot \tau},$$

где  $m_0$  – начальная масса образца, г;  $m_1$  – масса образца после испытания, г;  $S$  – площадь образца, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – продолжительность испытания, ч.

Глубинный показатель коррозии ( $\Pi$ ) рассчитывался по формуле:

$$\Pi = 8,76 \cdot K_M / \rho,$$

где  $K_M$  – массовый показатель коррозии, г/м<sup>2</sup>·ч;  $\rho$  – плотность металла, г/см<sup>3</sup>; 8,76 – коэффициент пересчета, мм·м<sup>2</sup>·ч/г·см<sup>3</sup>·год.

Результаты гравиметрических измерений после выдержки в физиологическом растворе представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Массовый показатель коррозии  $K_M$  (г/м<sup>2</sup>·ч) в физиологическом растворе

Образец	1 сутки	7 суток	14 суток	30 суток
BT1-00 без покрытия	$7,6 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-4}$
BT1-00 с покрытием ta-C	$1,1 \times 10^{-5}$	$0,7 \times 10^{-5}$	$0,6 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$

Глубинный показатель коррозии, вычисленный по результатам 30-дневных испытаний, составил:

BT1-00 без покрытия: 0,023 мм/год;

BT1-00 с покрытием ta-C: 0,0010 мм/год;

согласно десятибалльной шкале коррозионной стойкости по ГОСТ 9.908-85:

BT1-00 без покрытия относится к группе «стойкий», балл 4;

BT1-00 с покрытие ta-C относится к группе «весьма стойкий», балл 2.

### Испытания на износостойкость

Оценка износостойкости металлических образцов из сталей BT1-00 проведена по основным показателям, характеризующих износостойкость (безразмерный показатель износостойкости,  $I$ , класс износостойкости,

$K$ , и разряд износостойкости,  $\alpha_K$ ), с последующим сравнением значений, полученных до и после нанесения покрытия ta-C, табл. 2. На рис. 10 изображены пятна износа исследуемых образцов, на рис. 11 проведено определение глубины износа.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении износостойкости образцов из BT1-00 после нанесения покрытия ta-C. Полученная закономерность прослеживается на параллельных образцах,  $n = 3$ .

По результатам исследований найдено: толщина покрытия образца 1,66 мкм (0,00166 мм),

глубина истираемой плоскости 10 мкм (0,0100 мм),

диаметр изношенной плоскости 568 мкм (0,5680 мм).

Таблица 2 – Значения износостойкости образцов до покрытия и после покрытия

№ образца	Результаты испытаний на сферическое абразивное изнашивание		Показатели износостойкости по Р 50-95-88		
	$D$ , м	$\Delta H$ , м	$I$	$KI$	$\alpha_K$
1	BT1-00 без покрытия				
	0,000568	0,0056	$2,134 \times 10^4$	4	2
2	BT1-00 с покрытием ta-C				
	0,000528	0,010164	$1,176 \times 10^4$	4	1

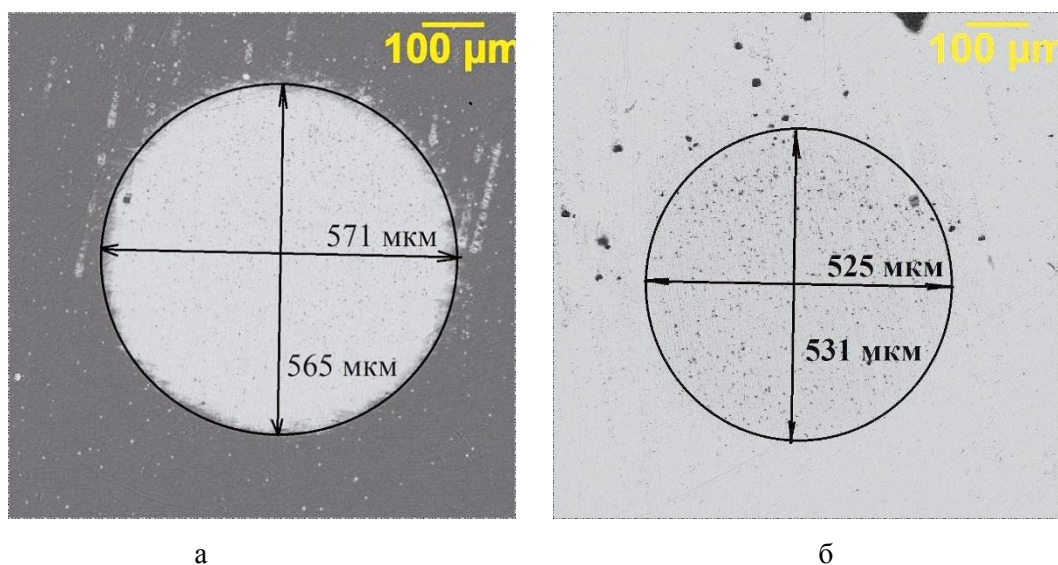


Рис. 10. Пятна износа исследуемых образцов: а – исходный; б– после нанесения та-С

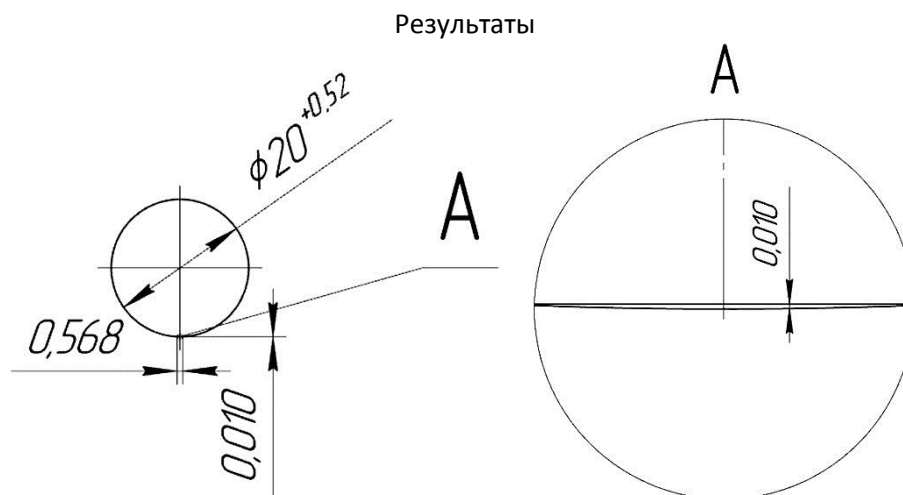


Рис. 11. Размеры пятна износа

### Заключение

Проведённые исследования подтвердили, что нанесение та-С покрытия на стилет троакара обеспечивает существенное повышение его износостойкости. Твердость покрытия достигает значений, сопоставимых с алмазом, что позволяет значительно уменьшить износ рабочей поверхности и повысить долговечность инструмента. Полученные экспериментальные данные об износе, толщине покрытия и его поведении в контактной зоне демонстрируют эффективность выбранной технологии PVD-нанесения и подтверждают перспективность использования та-С покрытий в конструкциях медицинских изделий.

### Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения PVD-нанесения покрытия та-С для повышения коррозионной стойкости и износостойкости стилета троакара, при этом:

- 1) разработана модернизированная конструкция стилета троакара за счёт нанесения покрытия та-С;
- 2) экспериментально подтверждено повышение микротвёрдости поверхности стилета, что свидетельствует об улучшении его физико-механических свойств;
- 3) установлено значительное увеличение износостойкости стилета, что подтверждается результатами испытаний методом шарового истирания;

4) доказана перспективность применения ta-C покрытий для повышения эксплуатационных характеристик и долговечности медицинских инструментов, используемых в малоинвазивной хирургии;

5) покрытие ta-C демонстрирует высокую коррозионную стойкость в исследованном физиологическом растворе, массовый показатель коррозии уменьшается примерно в 2 раза.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Троакары. Типы. Назначение. Принцип действия. <https://endo.ru/landings/troakar/>.

2. **Иванов И.И., Петров П.П.** Современные аспекты конструкции троакаров в лапароскопической хирургии // Хирургия. 2020. № 3. С. 45-49.

3. **Сидоров А.А.** Анализ эксплуатационных характеристик плунжерных троакаров // Медицинское оборудование. 2019. № 6. С. 22-25.

4. **Степанов В.И.** Клапанные системы троакаров: сравнительный анализ // Инновации в хирургии. 2022. № 1. С. 17-20.

5. **Фёдоров Р.С.** Проблемы и перспективы использования троакаров со створчатым клапаном // Лапароскопия и технологии будущего. 2021. № 4. С. 10-14.

6. **Белов А.А., Назарова Т.Е.** Безопасность при использовании конических стилетов: анализ осложнений // Клиническая хирургия. 2018. № 5. С. 52-55.

7. **Лайнер В.И.** Защитные покрытия металлов. Москва: Машиностроение, 1974. 599 с.

8. **Якимович Ю.В.** Сравнение покрытий нитрид титана алюминия и алмазоподобного тетрагонального углерода на металлическом брежете // Научный альманах. 2023. № 7-2 (105). С. 68-71.

9. Р 50-95-88. Рекомендации. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. Введ. 1988-10-28. Москва: Издво стандартов, 1989. 25 с.

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

11. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы методы выявления и определения величины зерна. Москва: Издательство стандартов, 1983. 21 с.

**Сармин Андрей Юрьевич** – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Пичхидзе Сергей Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Andrey Yu. Sarmin**– Postgraduate, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Sergey Ya. Pichkhidze**– Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 28.01.25, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.793.6

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ НАГРЕВА  
СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА В СИСТЕМЕ МИКРОДУГА – ДЕТАЛЬ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ В ХРОМСОДЕРЖАЩЕЙ ОБМАЗКЕ  
В ПРОЦЕССЕ МИКРОДУГОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Н.И. Китаев, А.В. Войко**

**A COMPUTER MODEL TO THE KINETICS OF HEATING  
A SPIRAL DRILL IN THE MICROARC SYSTEM AS A COMPONENT  
UNDER PROCESSING IN THE CHROME CONTAINING COATING  
DURING MICROARC EXPOSURE**

**N.I. Kitaev, A.V. Voyko**

*Представлены компьютерная модель определения рациональных параметров работы устройства микродугового воздействия и технологического режима обработки острия спирального сверла Ø8,5 9XC ц/хв ГОСТ 10902-77 в хромсодержащей обмазке для повышения износостойкости и обеспечения качества поверхностного слоя; результаты лабораторных исследований и технологические рекомендации, обеспечивающие получение стальных изделий с классом износостойкости КИ 10/1-10/2 и микротвёрдостью до 983 HV<sub>0,5Н</sub>, за счет создания в поверхностном слое дисперсной системы из прочных тугоплавких карбидных соединений. Применение полученных результатов исследования позволит снизить себестоимость выпуска спиральных сверл за счет сокращения затрат на потребляемую электрическую мощность в 2,8-4,9 раза в сравнении с традиционными способами поверхностной обработки. В результате аппроксимации экспериментальных данных температуры от силы номинального выходного тока выпрямителя и длительности микродугового воздействия –  $t(U_B, \tau)$ , и микротвёрдости от толщины диффузионного слоя и длительности микродугового воздействия –  $HV_{0,5H}(\delta, \tau)$ , установлена высокая степень тесноты, оцениваемая по шкале Чеддока (множественный ко-*

*The presented computer model is used to determine the rational parameters in operation of a microarc device and technological mode in processing the tip of a spiral drill Ø8.5 9XC/xv GOST 10902-77 in the chromium-containing coating aimed to increase the wear resistance and ensure the quality of the surface layer. The given work provides the laboratory research results and technological recommendations that ensure fabrication of steel products with a wear resistance class at WR 10/1-10/2, and microhardness up to 983 HV<sub>0.5H</sub>, by creating a dispersed system of durable refractory carbide compounds in the surface layer. Application of the obtained research results will reduce the cost of production of the spiral drills by reducing the cost of electric power consumption by 2.8-4.9, in comparison with traditional methods of surface treatment. As a result of approximation of the experimental temperature data from the strength of the rated output current of the rectifier and duration of the microarc action –  $t(U_B, \tau)$ , and microhardness from the thickness of the diffusion layer and duration of the microarc action –  $HV_{0.5H}(\delta, \tau)$ , a high degree of crowding has been estimated using the Cheddock scale (where the multiple coefficient of determination,  $R^2$ , made*

эффицент детерминации,  $R^2$ , составил 0,91 и 0,72, соответственно).

Ключевые слова: металл, модель, обработка, микродуга, воздействие, обмазка, соединения

### Введение

Среди большого разнообразия видов обработки на завершающей стадии процесса изготовления, диффузионное насыщение прочно вошло в арсенал предприятий промышленности, как эффективный метод повышения износостойкости стальных изделий, снижения себестоимости обработки и повышения производительности труда [1, 2]. Основным недостатком обработки является длительность, зачастую достигающая до нескольких десятков часов, и высокая энергоемкость процесса [3].

Поэтому разработка новых прогрессивных технологических процессов и способов обработки является актуальным направлением исследования, представляющим большой научный и практический интерес.

Из информационно-аналитического обзора литературных данных [4-7] установлена возможность применения микродугового (МД) воздействия как электрофизического процесса, обеспечивающего быстрый нагрев металлической поверхности, перспективность которого, в сравнении с традиционными способами, заключается в высокой скорости нагрева, порядка  $8,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , и низкой энергоемкости.

**Цель работы:** повышение износостойкости и обеспечение качества поверхностного слоя стали 9ХС и изготовленных из нее изделий (спиральных сверл  $\varnothing 8,5$  9ХС ц/хв ГОСТ 10902-77), при обработке в хромсодержащей обмазке в процессе микродугового воздействия.

### Методы и методика проведения исследования

Определение рациональных параметров работы устройства МД воздействия и технологического режима обработки проведено в программном обеспечении ELCUT 5.1, с учетом характеристик лабораторного выпрямителя дуги с тиристорными регулятора-

ми тока и напряжения ( $U_{B_{\max}} = 2,05\text{ В}$ ;

$I_{B_{\max}} = 5,0\text{ А}$ ) для остроконечных образцов из стали 9ХС ( $D \times \text{Ш} \times \text{В} : 10 \times 10 \times 3\text{ мм}$ ) с углом заточки  $135^{\circ}$  и острия спирального сверла  $\varnothing 8,5$  ц/хв ГОСТ 10902-77 (далее – острие спирального сверла  $\varnothing 8,5$ ), по созданной в САПР «Компас-3D» геометрической модели диффузионной ячейки, которая представлена в виде системы микродуга – деталь (рис. 1).

ми тока и напряжения ( $U_{B_{\max}} = 2,05\text{ В}$ ;

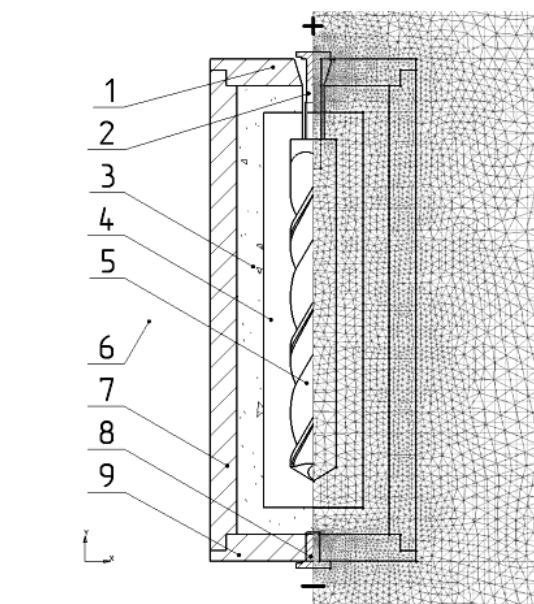


Рис. 1. Система микродуга – деталь

Система микродуга – деталь состоит из: 1 – верхняя крышка контейнера; 2 – крепеж для фиксации детали внутри контейнера (подключение положительного полюса источника питания выпрямителя дуги); 3 – тепло- и электропроводная среда (смесь частиц сажи Т 900 и порошка  $\text{SiO}_2$ ); 4 – насыщающая среда (обмазка); 5 – деталь (образец / острие спирального сверла  $\varnothing 8,5$ ); 6 – воздух; 7 – металлический контейнер  $d \times h$ ,  $40 \times 90\text{ мм}$  из титана ВТ1-0; 8 – крепеж для подключения отрицательного полюса источника питания выпрямителя дуги; 9 – нижняя крышка контейнера.

Расчет и определение рациональных параметров работы устройства МД воздействия проведено путем представления искомого решения в виде уравнения Пуассона для скалярного электрического потенциала,  $U$ , (1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho_x} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho_y} \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $U$  – скалярный электрический потенциал, В.

При расчете на внутренней границе ребер системы задано условие Неймана (условие нормальной плотности тока или граничное условие второго рода), а, для того чтобы задача растекания токов была сформулирована корректно, на внешних границах ребер системы задано условие Дирихле (условие равного потенциала или граничное условие первого рода), математическое описание которых представлено уравнениями (2) и (3), соответственно [8]:

$$j_n = j (\Delta j_n = j), \quad (2)$$

$$U = U_0, \quad (3)$$

где  $j_n$  – нормальная компонента вектора плотности тока, А/м<sup>2</sup>;  $j$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

Расчет и определение рациональных технологических режимов обработки проведено путем представления искомого решения в виде уравнения теплопроводности (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \\ = -q(t) - C(t) \rho \frac{\partial t}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $t$  – температура, °С;  $\tau$  – длительность МД 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, материала детали (сталь 9ХС) и контейнера (титан ВТ1-0) в диапазоне 20-1300 °С;  $\rho$  – плотность каждого блока системы, кг/м<sup>3</sup> [9].

При расчете на внутренней границе ребер системы задано условие Ньютона –

Рихмана (условие конвективного теплообмена или граничное условие третьего рода), а на внешней начальное условие, математическое описание которых представлено уравнениями (5) и (6), соответственно:

$$F_n = \alpha \cdot (t - t_0), \quad (5)$$

$$t = t_0, \quad (6)$$

где  $F_n$  – нормальная компонента вектора плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(°С·м<sup>2</sup>);  $t - t_0$  – температурный напор, обуславливающий процесс теплообмена, °С [10].

Обработке подвергались стальные образцы с шероховатостью Ra 0,130 мкм, полностью повторяющих геометрические величины, принятые в моделировании и острие спирального сверла Ø 8,5 мм. Методика проведения эксперимента заключалась в нанесении на предварительно очищенное от технологических загрязнений стальное изделие (5) хромсодержащей обмазки (4), с последующей установкой в контейнере (7) и засыпкой свободного пространства смесью частиц сажи марки Т 900 и порошка диоксида кремния (3) дисперсностью 0,3...0,5 мкм, являющейся тепло- и электропроводной средой [11]. После чего диффузионную ячейку размещали в центре реактора и обеспечивали ее нагрев до необходимой температуры [12].

Нагрев стальных изделий в диффузионной ячейке осуществляли при помощи лабораторного выпрямителя дуги с тиристорными регуляторами тока и напряжения.

Для измерения питающего выходного напряжения,  $U_B$ , силы номинального выходного тока выпрямителя,  $I_B$ , и потребляемой электрической мощности применялись токовые клещи UNI-T UT205 13-0003. Контроль температуры диффузионной ячейки обеспечивался тепловизором Fluke Ti400 бесконтактным методом.

После чего проведена комплексная оценка качества поверхности, заключающаяся в исследовании шероховатости и микротвёрдости. Исследован фазовый состав поверхностного слоя. Проведена оценка износостойкости.

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 [13] по методике «Приборы для измерений параметров шероховатости серии 178. Руководство по эксплуатации».

Измерение значений микротвёрдости проведено методом Виккерса по методике ГОСТ 9450-76 [14] 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 микротвёрдости использовался пирамидальный микротвердомер 3 (ПМТ-3).

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  $5^\circ$  до  $90^\circ$  со скоростью съемки  $2^\circ/\text{мин}$  с последующей идентификацией карбидных фаз (дисперсной систе-

мы) 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 шарик из стали ШХ15 ( $d = 15$  мм), твердость которого составляла 58-62 HRC, 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 приращения линейного износа ( $\Delta H$ ) по диаметру отпечатка ( $D$ ), в соответствии с методикой Р 50-95-88, разработанной Академией наук СССР [15]. Для оценки относительной износостойкости использовался толщиномер шарового истирания Константа-Ш2.

### Результаты и их анализ

Решением уравнения (1), с учетом значений тепло- и электрофизических свойств каждого блока системы и краевых условий (2), (3), получены картина поля потенциала,  $U$ , и плотности электрического тока,  $j$  (рис. 2).

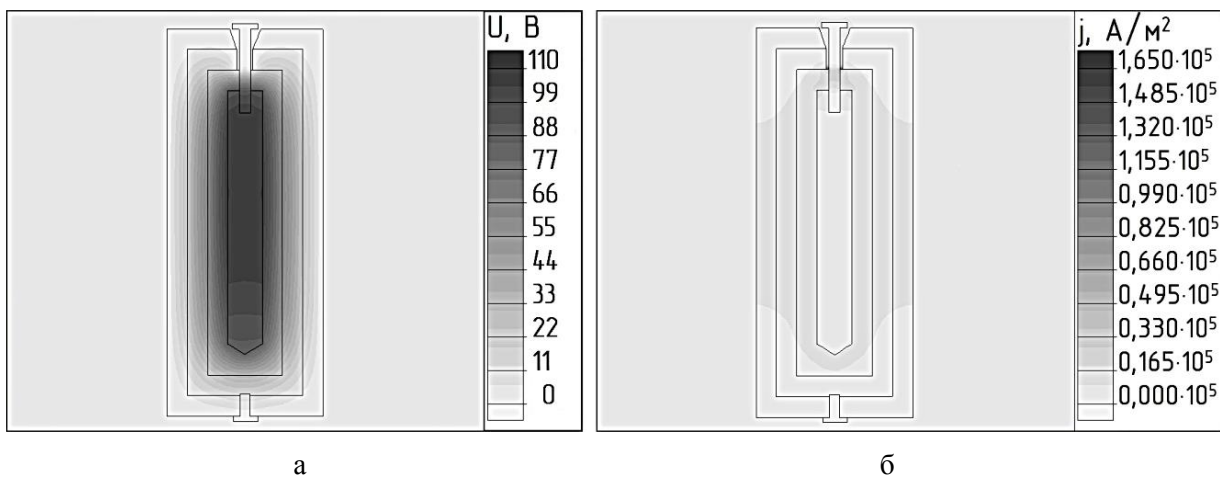


Рис. 2. Картина поля потенциала,  $U$ , (а) и плотности электрического тока,  $j$ , (б) при обработке в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия

Представленные результаты показывают адекватность картин распределения поля потенциала, рис. 2 а, и плотности электрического тока, рис. 2 б, при установленных параметрах работы устройства МД воздействия:  $U_B = 1,2$  В и  $j_n = 5803$  А/м<sup>2</sup>, обеспечивая, при этом, нагрев острия спирального сверла  $\varnothing 8,5$  до  $t = 1090 \pm 2$  °С.

Решением уравнения (4) с учетом значений температурной зависимости теплофизических свойств каждого блока системы и краевых условий (5)-(6), получены картина распределения тепловых потоков и кинетика нагрева стального изделия в процессе МД воздействия, рис. 3.

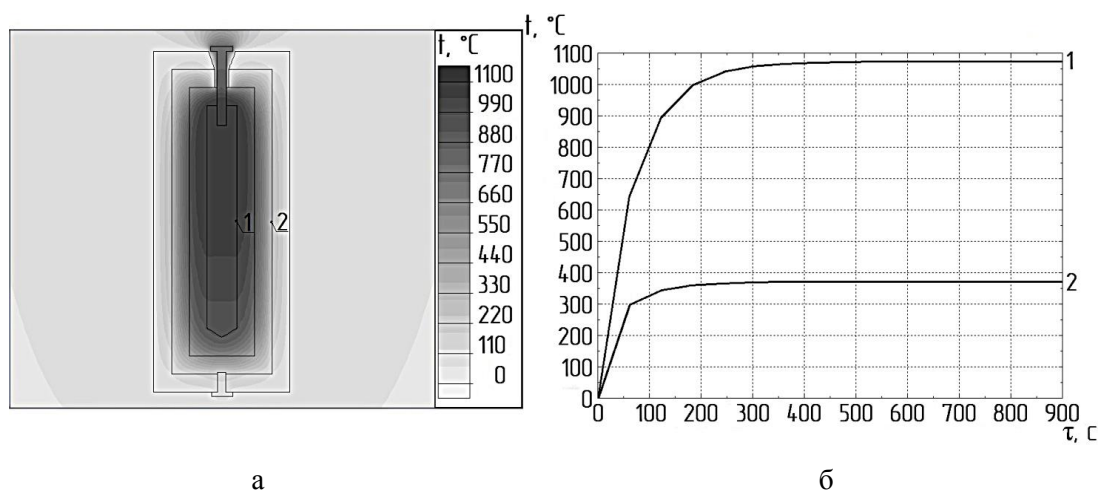


Рис. 3. Картина распределения тепловых потоков (а) и кинетика нагрева системы микродуга – деталь в процессе МД воздействия (б), где 1 – сверло, 2 – контейнер

При анализе рис. 3 а и б установлено, что нагрев острия спирального сверла  $\varnothing 8,5$  до  $t = 1090 \pm 2$  °С обеспечивается при МД воздействии  $\tau = 510 \pm 5$  с, после чего  $t$  стабилизируется (зависимость 1). Нагрев контейнера при этом осуществляется до  $300 \pm 2$  °С.

Дальнейшее увеличение параметров устройства МД воздействия способствует росту  $t$ , с появлением красно-оранжевых

зон которые создают риск перегрева и изменения форм, как стального изделия, так и контейнера.

Экспериментальный анализ параметров устройства МД воздействия проведен по  $U_B$  и  $I_B$ , а технологических режимов обработки по  $t$  и  $\tau$ , с построением зависимостей  $t$  от  $I_H$  и  $\tau$ ; и  $t$  от  $I_B$  и  $\tau$ . Соотношение параметров устройства МД воздействия и технологических режимов обработки показаны в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношение параметров устройства МД воздействия и технологических режимов обработки

Но- мер ре- жима	Параметры устройства МД воздействия				Технологические режимы обработки			
	$U_B$ , В	$I_B$ , А	$j_n$ , А/м <sup>2</sup>	$P_{Э}$ , Вт	$t$ , °С		$\tau$ , с	
					изделия	контейне- ра	для выхода на нужную $t$	для вы- держки
1	0,2	0,5	967	0,1	$913 \pm 2$	$261 \pm 2$	$180 \pm 5$	$310 \pm 5$
2	0,4	1,0	1934	0,4	$937 \pm 2$	$267 \pm 2$	$190 \pm 5$	$340 \pm 5$
3	0,6	1,5	2901	0,9	$958 \pm 2$	$274 \pm 2$	$210 \pm 5$	$380 \pm 5$
4	0,8	2,0	3868	1,6	$973 \pm 2$	$279 \pm 2$	$230 \pm 5$	$370 \pm 5$
5	1,0	2,5	4835	2,5	$1010 \pm 2$	$285 \pm 2$	$245 \pm 5$	$310 \pm 5$
6	1,2	3,0	5803	3,6	$1090 \pm 2$	$288 \pm 2$	$260 \pm 5$	$310 \pm 5$
7	1,4	3,5	6770	4,9	$1130 \pm 2$	$291 \pm 2$	$270 \pm 5$	$210 \pm 5$

Окончание табл. 1

Но- мер ре- жима	Параметры устройства МД воздействия				Технологические режимы обработки			
	$U_B$ , В	$I_B$ , А	$j_n$ , А/м <sup>2</sup>	$P_{Э}$ , Вт	$t$ , °С		$\tau$ , с	
					изделия	контейне- ра	для выхода на нужную $t$	для вы- держки
8	1,6	4,0	7737	6,4	1190 ± 2	297 ± 2	290 ± 5	210 ± 5
9	1,8	4,5	8704	8,1	1230 ± 2	300 ± 2	–	–
10	2,0	5,0	9671	10	1270 ± 2	315 ± 2	–	–

Из анализа табл. 1 установлено, что  $U_B = 0,2-1,2$  В и  $I_B = 0,5-3,0$  А являются рациональными параметрами устройства МД воздействия, обеспечивающими концентрацию микродуговых разрядов на поверхности изделия с образованием микродугового ореола, приводящих к его нагреву до температуры 900-1090 °С в среднем за 220 с, при этом температура ячейки составляет 260-315 °С. При дальнейшем увеличении  $U_B$  и  $I_B$  наблюдается образование макродуг, приводящих к местному оплавлению поверхности изделия в зоне их концентрации.

При аппроксимации экспериментальных данных  $t$  от  $U_B$  и  $\tau - t(U_B, \tau)$ , установлено, что множественный коэффициент детерминации,  $R^2$ , составляет 0,9138. Полученные результаты полностью характеризуют нагрев рассматриваемой системы микродуга – деталь в процессе МД воздействия, обосновывают выбор параметров работы устройства МД воздействия, технологических режимов обработки и обладают весьма высокой степенью тесноты, оцениваемой по шкале Чеддока.

По полученному режиму:  $U_B = 0,2-1,2$  В,  $I_B = 0,5-3,0$  А,  $t = 900-1090$  °С, при этом  $P_{Э}$  составила 0,1-3,6 Вт; проведена обработка остроконечных стальных образцов и острия спирального сверла  $\varnothing 8,5$  в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия.

При исследовании шероховатости установлено, что обработка в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия приводит к незначительному увеличению параметров  $R_a$  и  $R_z$ , таблица 2.

Из анализа данных табл. 2 установлено, что параметр  $R_a$  увеличивается с 0,130 до 0,182, а параметр  $R_z$  с 0,748 до 1,047. Происходит незначительное снижение класса шероховатости поверхности с 10 до 9.

Анализ данных микротвёрдости после обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия, обнаружено наличие двух зон – более твердой и менее твердой, находящейся под ним, протяженность и характеристики которых различаются [16].

Из анализа рис. 4, установлено, что среднее значение микротвёрдости после обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия составило 983  $HV_{0,5H}$ , при этом сердцевина металла осталась в диапазоне 180...240  $HV_{0,5H}$ . При аппроксимации экспериментальных данных  $HV_{0,5H}$  от  $\delta$  и  $\tau - HV_{0,5H}(\delta, \tau)$  ( $\delta, \tau$ ), установлено, что множественный коэффициент детерминации,  $R^2$ , составляет 0,7256. Полученные результаты наиболее полно характеризуют изменение микротвёрдости в зависимости от толщины диффузионного слоя и длительности МД воздействия и обладают высокой степенью тесноты, оцениваемой по шкале Чеддока.

Таблица 2 – Результаты исследования параметров шероховатости поверхности

Параметр, мкм	Значение / Класс шероховатости поверхности стали 9ХС	
	до обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия (состояние поставки)	после обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия
$R_a$	0,130 / 10	0,182 / 9
$R_z$	0,748 / 10	1,047 / 9

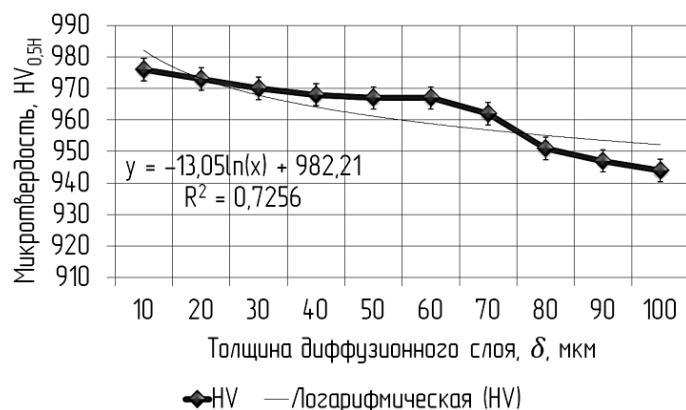


Рис. 4. Распределение микротвёрдости по сечению стали

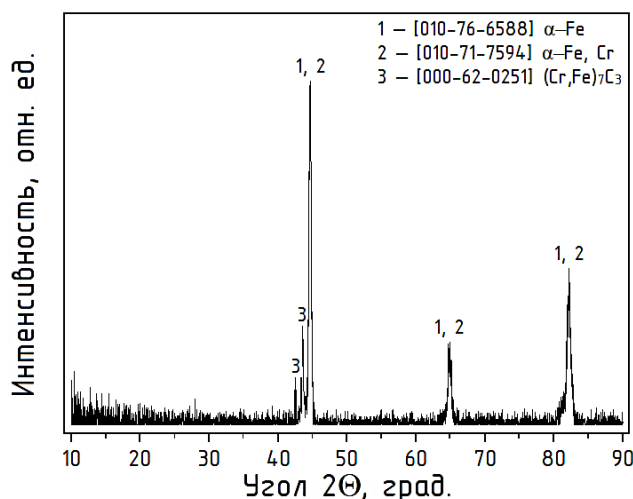


Рис. 5. Дифрактограмма поверхностного слоя стали после обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия

Рентгенофазовый анализ поверхностного слоя стали после обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия установил наличие тугоплавких фаз:  $\alpha\text{-Fe,Cr}$ ;  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ , рис. 5.

Оценка износостойкости стали Р6М5 и стали 9ХС (до и после обработки) проведена по основным показателям характери-

зующих износостойкость (безразмерный показатель износостойкости,  $I$ , класс износостойкости,  $K$ , и разряд износостойкости,  $\alpha_K$ ), с последующим сравнением значений, полученных до и после обработки из хромсодержащей обмазки в процессе МД воздействия, таблица 3.

Таблица 3 – Значения износостойкости стали Р6М5 и образцов из стали 9ХС

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	стали Р6М5 (применяется при серийном изготовлении сверл)				
	$16,625 \times 10^{-4}$	$2,29 \times 10^{-5}$	$5,29 \times 10^6$	6	4
2	стали 9ХС до обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия (состояние поставки)				
	0,0019509	$3,16 \times 10^{-5}$	$3,83 \times 10^6$	6	3
3	стали 9ХС после обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия				
	$3,03 \times 10^{-5}$	$7,4 \times 10^{-9}$	$1,58 \times 10^{10}$	10	2

Из анализа таблицы 3 установлено, что показатель износостойкости,  $I$ , образца № 3 выше, чем образца № 1 в 40,74 раза, и выше, чем у образца № 2 в 43,10 раз. При отнесении полученных значений показателя износостойкости,  $I$ , к классу,  $KI$ , и разряду,  $\alpha_K$ , установлено, что образцу № 3 соответствует  $KI$  10/1, а образцы № 1, 2 –  $KI$  6/4.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении износостойкости стали 9ХС после обработки в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия.

На основании результатов экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации для получения на стальных изделиях поверхностного слоя с дисперсной системой из прочных тугоплавких карбидных соединений методом диффузионного насыщения из хромсодержащей обмазки в процессе МД воздействия, состоящий из следующих операций: 1. Численное моделирование и анализ кинетики нагрева диффузионной ячейки с учетом значений температурной зависимости тепло- и электрофизических свойств стального изделия, компонентов порошковой среды и хромсодержащей обмазки; 2. Определение рациональных параметров работы устройства МД воздействия и технологического режима обработки; 3. Ультразвуковая очистка изделий от технологических загрязнений; 4. Подготовка хромсодержащей обмазки; 5. Закрепление изделия с верхней / нижней крышкой контейнера при помощи крепежа; 6. Нанесение на изделие хромсодержащей обмазки; 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 реактора МДО; 10. Включение питания и установка параметров работы устройства МД воздействия:  $U_B = 0,2-$

$1,2$  В,  $I_B = 0,5-3,0$  А; 11. Нагрев диффузионной ячейки до  $t = 900-1090$  °С.

### Заключение

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получена компьютерная модель диффузионной ячейки, по которой, с учетом значений температурной зависимости тепло- и электрофизических свойств каждого блока модели, граничного условия Неймана (условие нормальной плотности тока или граничное условие второго рода), и, для корректного решения задачи растекания токов – условия Дирихле (условие равного потенциала или граничное условие первого рода), для внешних границ ребер системы, определены рациональные параметры работы устройства МД воздействия:  $U_B = 0,2-1,2$  В;  $I_B = 0,5-3,0$  А;  $j_n = 967-5803$  А/м<sup>2</sup>; а, с учетом граничного условия Ньютона – Рихмана (условие конвективного теплообмена или граничное условие третьего рода), технологические режимы обработки острия спирального сверла  $\varnothing 8,5$  9ХС ц/хв ГОСТ 10902-77:  $t_{изделия} = 1090 \pm 2$  °С,  $t_{контейнера} = 315 \pm 2$  °С и  $\tau = 310 \pm 5$  с; разработаны технологические рекомендации для получения спиральных сверл  $\varnothing 8,5$  с микротвёрдостью, до 983 НВ<sub>0,5Н</sub>, и классом износостойкости,  $KI$  10/1-10/2.

Производственные испытания спиральных сверл, обработанных в хромсодержащей обмазке в процессе МД воздействия, показали увеличенную в 7-10 раз стойкость к износу. Применение результатов исследования позволит сократить затраты на потребляемую электрическую мощность в 2,8-4,9 раз, в сравнении с традиционными методами поверхностной обработки.

При аппроксимации экспериментальных данных  $t$  от  $U_B$  и  $\tau - t(U_B, \tau)$  и НВ<sub>0,5Н</sub> от  $\delta$  и  $\tau - НВ_{0,5Н}(\delta, \tau)$ , множественный коэффициент детерминации,  $R^2$ , составил 0,91 и 0,72, соответственно. Полученные результаты обладают высокой степенью точности, оцениваемой по шкале Чеддока.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Никифоров В.И.** Электрохимические и электрофизические технологии в машиностроении. Электроэрозионные, химические и электрохимические методы обработки: учеб. пособие для вузов по направлениям подготовки бакалавров укрупненной группы. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 302 с.
2. Технология подготовки машиностроительного производства – основа создания инновационных технологий / Г.Т. Мерзадинова, С. Нураков, Д.Р. Орынбеков, К.К. Айтлесов // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения: IX Междунар. науч.-практ. конф. Нур-Султан, 19 марта 2021 года / Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева. Нур-Султан, 2021. С. 21-25.
3. **Константинов В.М., Кукареко В.А.** Пути энергосбережения при термической и химико-термической обработке сталей за счет ускорения диффузионных процессов // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 72-80.
4. 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.
5. **Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В.** Теплофизический анализ и кинетика микродугового нагрева стали // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 11 (155). С. 511-516.
6. **Степанов М.С., Домбровский Ю.М.** Механизм ускорения диффузионных процессов при микродуговом нагреве стали // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 1. С. 5-11.
7. **Китаев Н.И., Пичхидзе С.Я.** Разработка технологии диффузионного борирования способом микродуговой химико-термической обработки для повышения параметров качества инструментальной легированной стали марки 9ХС // Технология машиностроения. 2023. № 12. С. 5-10.
8. **Воронин А.В.** Применение программного пакета ELCUT для моделирования потенциальных электрических полей: учеб.-метод. пособие. Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2010. 70 с.
9. Elcut – инженерный инструмент МКЭ-моделирования: доклад / С.Д. Дубицкий, О.Я. Ильина. Санкт-Петербург: ПК «ТОР», 2014. 13 с. ПК «ТОР». URL: <http://elcut.ru/publications/dubitsky8.pdf> (дата обращения 04.01.2026).
10. **Овчинников С.В.** Конвективный теплообмен. Методики инженерного расчёта коэффициента конвективной теплоотдачи: учеб.-метод. пособие. Саратов: СГУ имени Н.Г. Чернышевского, 2015. 48 с.
11. Пат. 2819547 Российская Федерация, МПК С23С 10/40. Способ хромирования поверхности подложки из 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.
12. **Китаев Н.И., Пичхидзе С.Я.** Разработка ресурсосберегающей технологии диффузионного хромирования поверхностного слоя стали 12ХН3А при высокотемпературном микродуговом воздействии // Технология машиностроения. 2024. № 8. С. 22-28.
13. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 1975-01-01. Москва: Стандартинформ, 2013. 8 с.
14. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 1977-01-01. Москва: Изд-во стандартов, 1993. 36 с.
15. Р 50-95-88. Рекомендации. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. Введ. 1988-10-28. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 25 с.
16. **Китаев Н.И., Войко А.В.** Компьютерная модель кинетики нагрева поршневого пальца в системе индуктор-деталь при упрочнении методом диффузионного насыщения поверхности в процессе высокочастотного воздействия // Вопросы электротехнологии. 2025. № 4 (49). С. 5-14.

**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 05.02.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ  
И МОРФОЛОГИИ ПЛАЗМЕННО-НАНЕСЕННОГО ТИТАНА,  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ  
АЗОТА И АРГОНА**

**Д.В. Бунтаков, В.В. Перинский**

**INVESTIGATION INTO CHEMICAL ACTIVITY AND MORPHOLOGY  
OF PLASMA-APPLIED TITAN NANOSTRUCTURED  
BY ACCELERATED IONS OF NITROGEN AND ARGON**

**D.V. Buntakov, V.V. Perinsky**

*Установлены химические особенности эффекта (1-3 порядка) ионно-лучевой пассивации титана в зависимости от дозы имплантируемых ионов.*

*Задачей данной работы является электронно-микроскопическое и СЗМ исследование поверхности титана типа VT1-00, наноструктурированными ускоренными ионами азота и аргона для изделий энергетического машиностроения.*

*Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о наличии на поверхности имплантированного ускоренными ионами азота углеродного нанопокртия, аналогичного, полученному при имплантации титана ионами аргона. Сформулирована гипотеза о существовании механизма изменения химической активности титана в результате ионно-лучевого наноструктурирования – ионно-стимулированный синтез поверхностных наноразмерных углеродсодержащих пленок.*

*Ключевые слова: ионно-лучевая пассивация, титан, сверхтонкое углеродное нанопокртие, ионно-лучевое наноструктурирование, ионная имплантация*

**Введение**

Ионная имплантация, т. е. внедрение ускоренных ионов в твердые тела, приобрела за последние годы очень важное значение не только как способ создания мик-

*The chemical features of the effect (1-3 orders of magnitude) of ion beam radiation of titanium, depending on the dose of implanted ions, have been identified.*

*The focus of the given research is made on electron microscopic and SPM study of the surface of titanium of the VT1-00 type, which have been nano-structured with accelerated nitrogen and argon ions required for energy engineering products.*

*The experimental data obtained indicate the presence of a carbon nanocoating implanted with accelerated nitrogen ions which is similar to that obtained by implanting titanium with argon ions. The formulated hypothesis relates the existence of a mechanism for changing the chemical activity of titanium as a result of ion-beam nanostructuring i.e. ion-stimulated synthesis of the surface nanoscale carbon-containing films.*

*Keywords: ion beam passivation, titanium, ultrathin carbon nano-coating, ion beam nanostructuring, ion implantation*

роэлектронных устройств современной твердотельной электроники, но и как мощный универсальный метод экспериментальной физики твердого тела, материаловедения (в т. ч. при создании и исследова-

нии наноматериалов). Исследования эффектов ионной имплантации в металлы ведутся по многим направлениям, начиная с моделирования нейтронных, протонных, гелиевых дефектов в стенках ядерных реакторов и кончая проблемами повышения коррозионной стойкости медных слоев ИС СВЧ [1].

Развитие ионно-лучевой технологии опирается на экспериментальные исследования взаимодействия быстрых заряженных частиц с металлами, включая как вопросы прохождения, торможения и рассеяния ионов, то есть, первичные «быстрые» процессы, так и изменений морфологии, структуры поверхности, физико-химических свойств. В настоящей работе исследуется титан типа ВТ1-00, наноструктурированный ускоренными ионами азота, аргона для изделий энергетического машиностроения [2].

### 1. Методика эксперимента

В качестве экспериментальных образцов использовались полированные и химически обезжиренные титановые структуры на основе подложек марки ВТ1-00 размером  $10 \times 10 \times 2$  мм с нанесенным слоем титана ионно-плазменным методом дисперсностью 3-5 мкм, дистанцией напыления 70-80 мм и толщиной 5-10 мкм, применяемые в качестве заготовок для изделий энергетического машиностроения.

Ионно-лучевая обработка первой части образцов проводилась ионами азота ( $N^+$ ), второй части – ионами аргона ( $Ar^+$ ) в интервале доз ионов с ускоряющим напряжением 75 кэВ на отечественной промышленной установке ионного легирования «Везувий-5» в динамическом технологическом вакууме  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$  МПа, поддерживаемом контролируемым напуском углеродсодержащего газа ( $CO_2$ ) в приемной камере (рис. 1) [3].

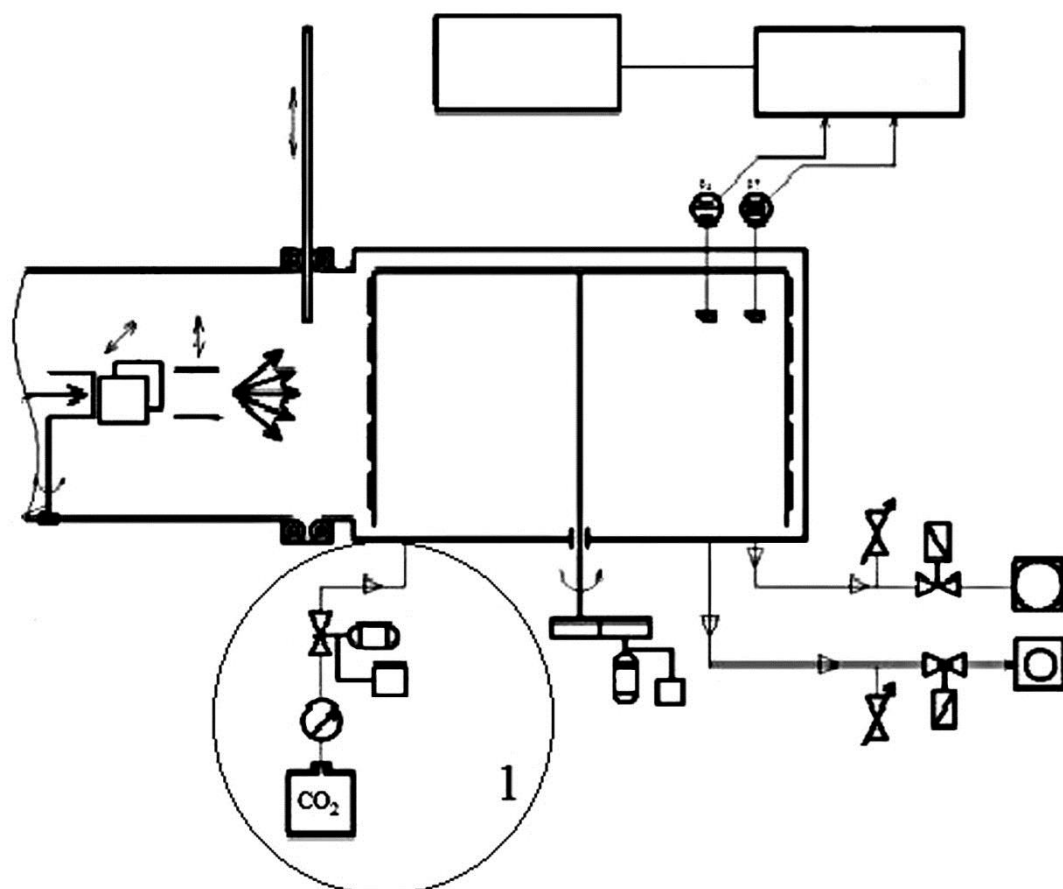


Рис. 1. Схема усовершенствованной приемной камеры установки ионного легирования «Везувий-5»: 1 – узел для контролируемого напуска углеродсодержащего газа ( $CO_2$ )

Ионный пучок с плотностью тока  $\sim 10$  мА/см<sup>2</sup> сканировал образцы по вертикали и горизонтали с частотой 427 Гц, нагрев образцов в процессе ионно-лучевой обработки не превышал 80 °С.

Исследовалась зависимость нормированной скорости химического травления ( $V$ ) титана от дозы ионов аргона и ионов азота.

Нормированная скорость химического травления (отношение скорости химического травления не ионно-облученных  $V_0$  и ионно-облученных  $V_{обл}$  частей образцов) определялась соотношением:

$$V = V_{обл} / V_0 = t_0 / t_{обл},$$

где  $t_0$ ,  $t_{обл}$ ,  $V_0$ ,  $V_{обл}$  – время и скорость химического травления соответствующих частей образцов.

Эффекту ионно-лучевой химической пассивации соответствуют значения нормированной скорости химического травления  $V < 1$ , эффекту активации –  $V > 1$ .

Химическое травление образцов проводилось при комнатной температуре в стандартном для титана жидкостном травителе.

Исследование морфологии образцов после ионно-лучевой обработки проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA II LMU фирмы TESCAN при ускоряющем напряжении 30 кэВ; растровом электронном микроскопе с холоднополовой эмиссией (ПЭ-РЭМ) JSM-6701F с торможением электронов перед образцом с приложением к образцу отрицательного тормозящего потенциала до 2 кэВ для наблюдения наноструктур; сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Современные версии программного пакета TRIM/SRIM (Transport of Ions in Matter – The stopping and range of ions in matter) позволяют получать информацию о 2D и 3D профилях распределения имплантированных ионов, введенных радиационных дефектах, определяющих физические, механические, электрические характеристики имплантированных слоев.

Для прогнозирования структуры и свойств поверхностного слоя образцов после имплантации при известных параметрах ионного луча (управляемых за счет изменения тока на катоде, ускоряющего напряжения, давления газа и его состава в приемной камере), необходимо знание следующих параметров: дозы ионов, пробега ионов при известном ускоряющем напряжении, распределения примеси и радиационных дефектов в материале после имплантации [4].

Результаты компьютерного моделирования ионной имплантации ионов представлены на рис. 2.

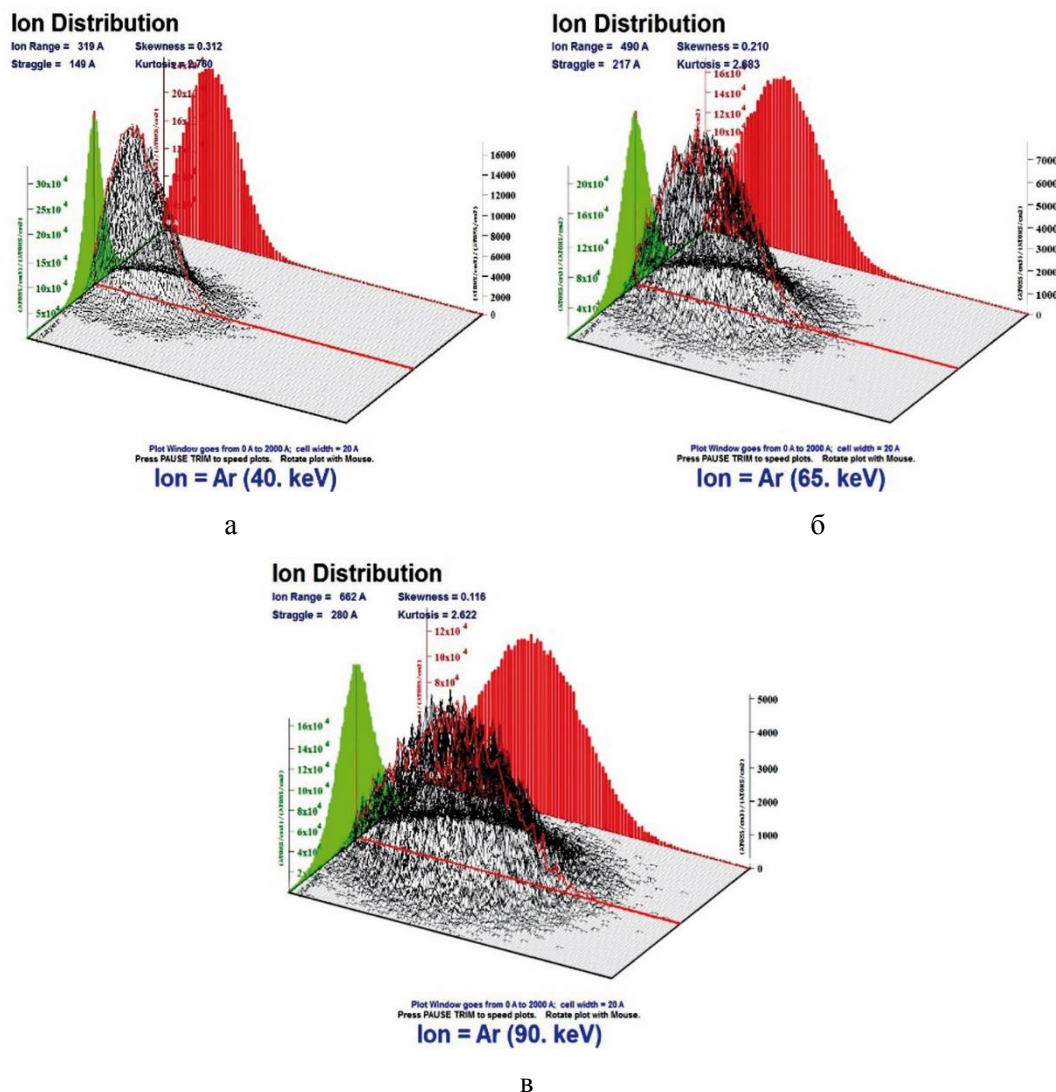
Представленные результаты компьютерного моделирования позволяют визуализировать динамику процесса ионно-лучевой обработки, поставить в соответствие параметры ионного пучка с технологическими характеристиками модифицируемой мишени.

При исследовании зависимости нормированной скорости химического травления титана от дозы ионов аргона и азота контролировалось время полного травления не ионно-облученных ( $t_0$ ) и ионно-облученных ( $t_{обл}$ ) участков нанесенного слоя титана (рис. 3).

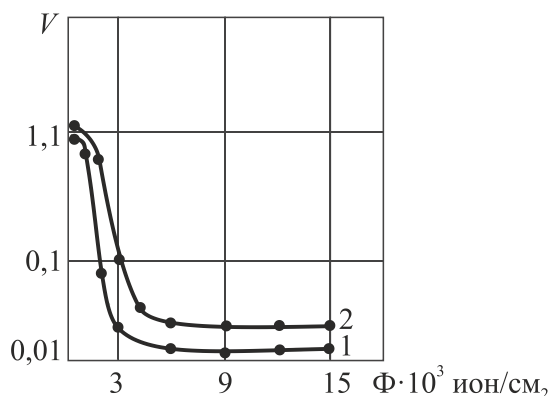
Исследована морфология поверхности титановых образцов в процессе набора дозы ионов азота и аргона (рис. 4, 5) [5].

Проведенные экспериментальные исследования указывают на существование объемного механизма изменения структуры и физико-химических свойств имплантированных материалов [6]. Можно выделить следующие основные механизмы проявления объемных наноструктурных превращений материалов:

- изменение характера взаимодействия поверхности металла с внешней средой;
- изменение физико-химических свойств существующих и образование новых внутренних поверхностей раздела в объеме имплантированного металла;
- изменение фазового и химического состава металла;
- радиационно-стимулированные наноструктурные превращения в объеме металла.



**Рис. 2.** 3D профили распределения пучка ионов аргона с дозой  $10^5$  ион/см<sup>2</sup> в слое титана с проекциями 2D-графиков при изменении ускоряющего напряжения: а –  $U_{уск} = 40$  кэВ; б –  $U_{уск} = 65$  кэВ; в –  $U_{уск} = 90$  кэВ



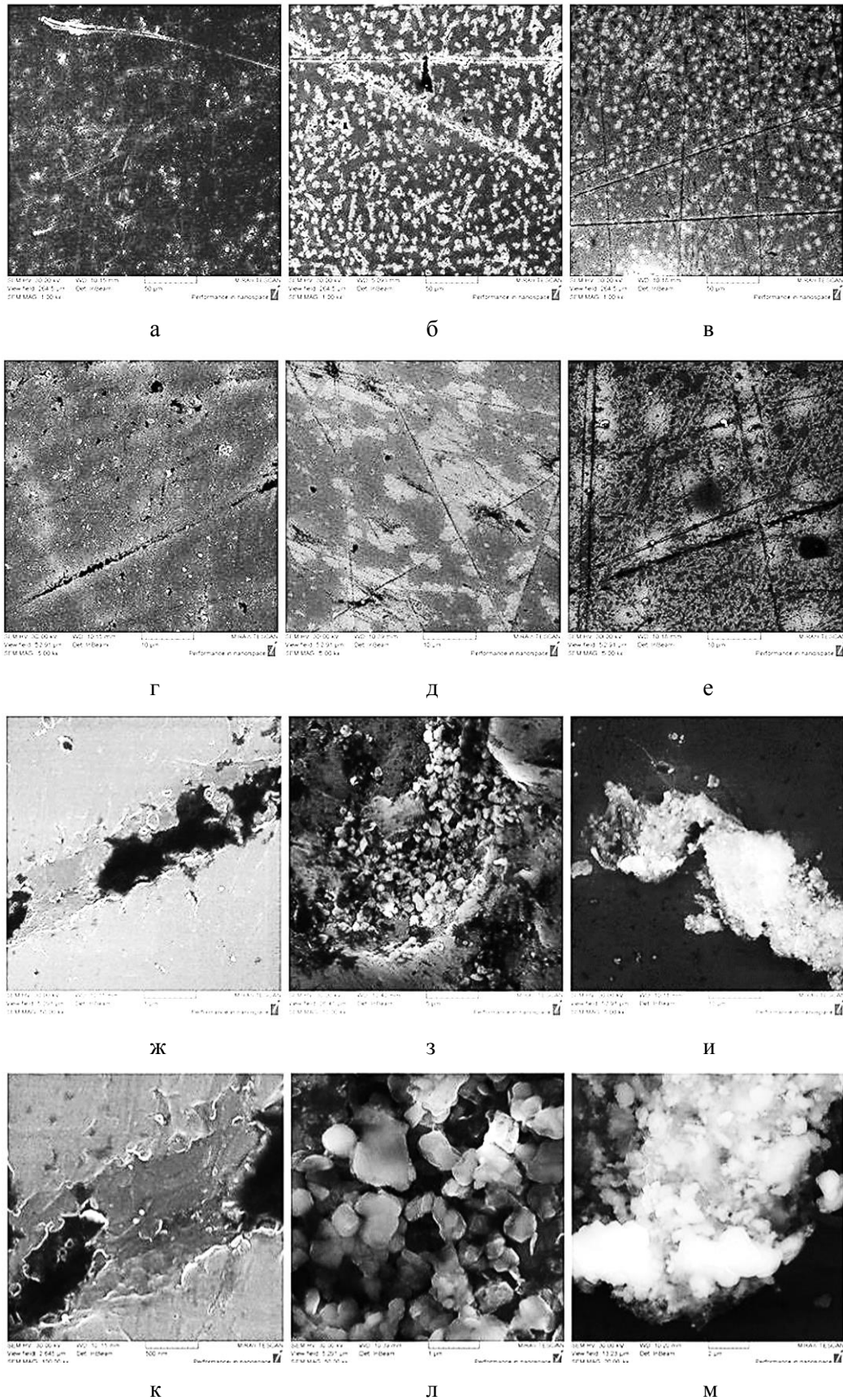
**Рис. 3.** Зависимость нормированной скорости химического травления титана от дозы ионов: 1 – аргона; 2 – азота ( $U_{уск} = 75$  кэВ)

Наблюдающиеся изменения морфологии поверхности титана, происходящие в процессе ионно-лучевой обработки в сре-

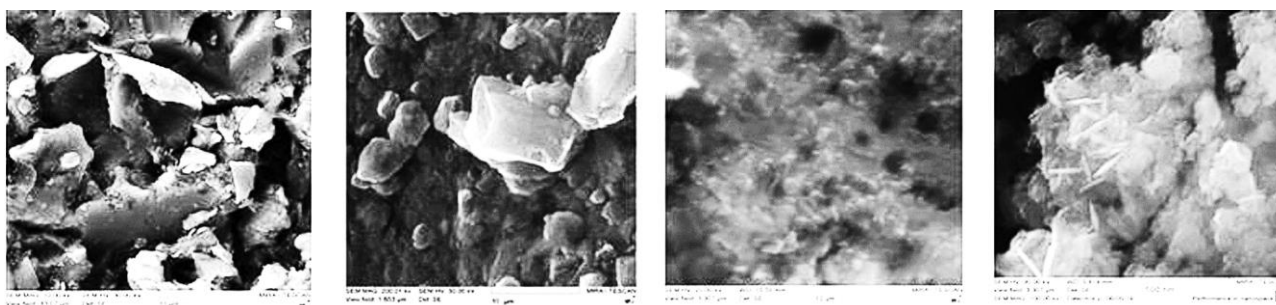
де углеродсодержащего газа ( $CO_2$ ), зависят от дозы ионов азота и аргона [7]. При дозах ионов меньше некоторой «критической»  $\sim 3000$  мк·Кл/см<sup>2</sup> образуется микрокристаллическая пленка, с наиболее заметными треугольными гранями (рис. 5 а, б).

Данная пленка является поликристаллической с появлением двойникования и многочисленных кристаллических дефектов. В ПЭ-РЭМ JSM-6701F наблюдается нанорельеф пленки, синтезированной на поверхности титана ионной имплантацией аргона с разрешением 15 нм (рис. 5, в).

Исследованы морфологические характеристики поверхности образцов титана методом сканирующей зондовой микроскопии.

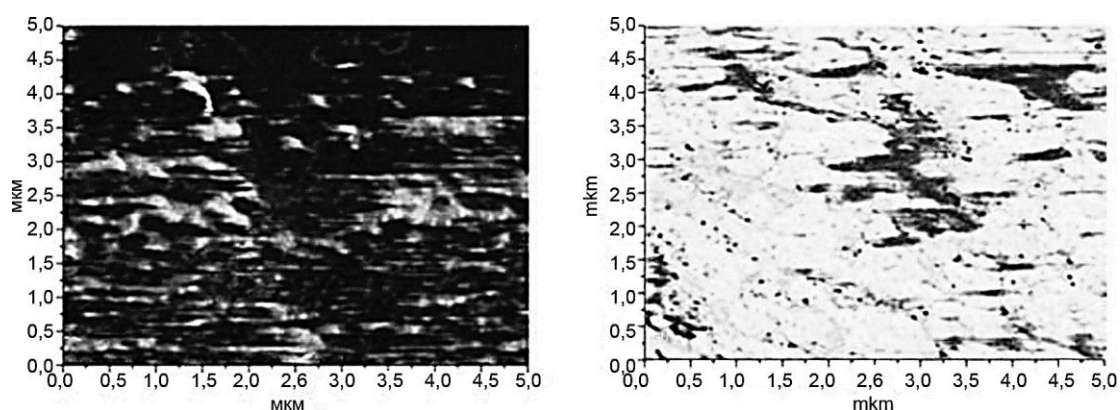


**Рис. 4.** Изображение поверхности титана в сканирующем электронном микроскопе:  
а, г, ж, к – до ионно-лучевой обработки; б, д, з, л – после ионно-лучевой обработки ионами азота  
с  $\Phi = 1000 \text{ мкКл/см}^2$ ; в, е, и, м – после ионно-лучевой обработки ионами азота с  $\Phi = 10000 \text{ мкКл/см}^2$



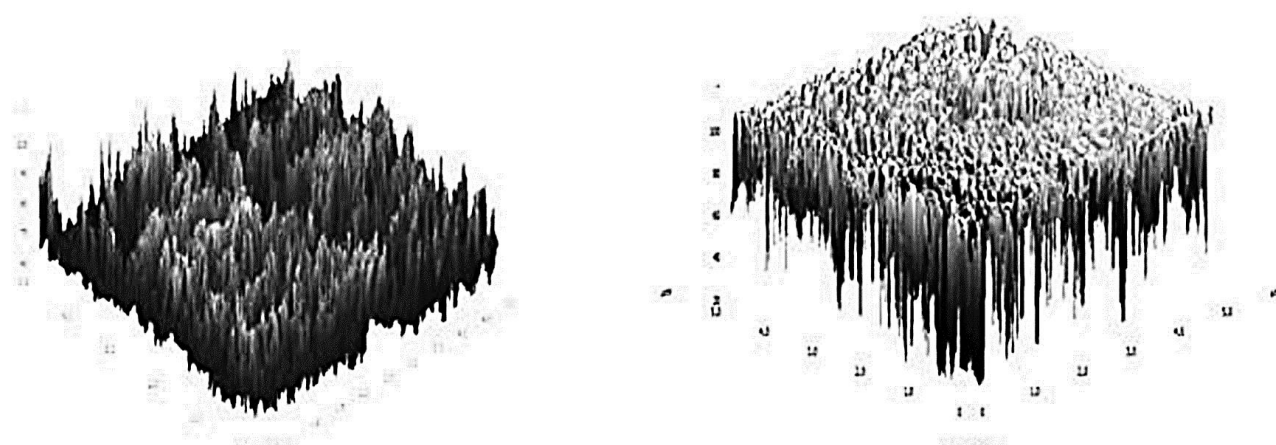
а б в г

**Рис. 5.** Изображение в растровом электронном микроскопе с холоднополевой эмиссией ( $U_{уск} = 75$  кэВ): а – микрокристаллическая пленка на поверхности титана после ионно-лучевой обработки  $Ag^+$  с  $\Phi = 2000$  мк·Кл/см<sup>2</sup>; б – микрокристаллическая пленка на поверхности титана после ионно-лучевой обработки  $Ag^+$  с  $\Phi = 2500$  мк·Кл/см<sup>2</sup>; в – пленка, на которой наблюдается морфология «цветной капусты» на поверхности титана после ионно-лучевой обработки  $Ag^+$  с  $\Phi = 3000$  мк·Кл/см<sup>2</sup>; г – морфология наноразмерной пленки, синтезированной на поверхности титана после ионно-лучевой обработки  $Ag^+$  с  $\Phi = 5000$  мк·Кл/см<sup>2</sup> (коэффициент перевода дозы:  $1$  мк·Кл/см<sup>2</sup> =  $6,23 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>)



а б

**Рис. 6.** СЗМ – фотографии поверхности образцов титана: а – исходного; б – после ионно-лучевой обработки ионами азота  $N^+$  ( $\Phi=5000$  мк·Кл/см<sup>2</sup>)



а б

**Рис. 7.** Трехмерное изображение поверхности титана: а – исходный образец; б – образец обработанный ионами азота ( $\Phi = 10000$  мк·Кл/см<sup>2</sup>)

На рис. 7 показана поверхность титана в трехмерном изображении до и после ионно-лучевого наноструктурирования ионами азота.

Исследование морфологии титана методом сканирующей зондовой микроскопии показали, что поверхность после облучения ионами азота в динамическом технологическом вакууме  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$  Па, с контролируемым напуском  $\text{CO}_2$ , видоизменяется (рис. 6). На рис. 7 показано СЗМ-изображение поверхности титана, полученное с помощью модуля обработки изображений Nova. Покрытие, образованное в результате ионного облучения, состоит из вертикальных структурных образований [8].

Методом вторично-ионной масс-спектрометрии установлено, что в исходных металлических слоях основными загрязняющими примесями являются углерод, кислород, азот. На поверхности образцов регистрируются также пики хлора, серы, кальция, которые исчезают после обработки поверхности пучком ускоренных ионов.

После облучения ионами с энергией и дозой в указанном диапазоне доз ионов  $\sim 1500-10000$  мк·Кл/см<sup>2</sup> на всех образцах наблюдается повышение концентрации углерода на поверхности титана на 20-30 % по сравнению с объемной концентрацией, перераспределение примесей кислорода и азота. По форме пиков в Оже-спектре установлено, что углерод в имплантированных слоях находится в связанном состоянии, предположительно в форме карбидов металлов. Повышение концентрации углерода на поверхности имплантированных слоев может быть связано с его сегрегацией из объема металла, а также с конденсацией углеродсодержащих фрагментов из атмо-

сферы вакуумной камеры, содержащей углеродсодержащий газ ( $\text{CO}_2$ ).

Таким образом, в результате обработки плазмонапыленного титана независимо ионами азота или аргона формируется на поверхности наноразмерное углеродсодержащее покрытие.

### Выводы

В результате проведенных экспериментов были исследованы облученные ионами аргона и азота образцы технической чистоты титана марки ВТ1-00 с титановым плазменным покрытием и установлены физико-химические особенности эффекта (1-3 порядка) его ионно-лучевой пассивации в зависимости от дозы ионов независимо азота или аргона. Эффект пассивации  $V < 1$  качественно одинаков при имплантации ионами аргона и азота, характеризуется экспоненциально быстрым уменьшением скорости химического травления вблизи пороговой дозы, увеличением в исследуемом материале концентрации углерода. Изученные электронно-микроскопические (СЭМ, ПЭРЭМ), СЗМ изображения наноструктурированной поверхности титана ускоренными ионами свидетельствуют о наличии на поверхности имплантированного ионами азота титана сверхтонкого углеродсодержащего нанопокрывтия, также, как и при имплантации титана ионами аргона. На основании представленных результатов исследований экспериментально подтверждена гипотеза о существовании второго механизма изменения химической активности титана в результате ионно-лучевого наноструктурирования – ионно-стимулированный синтез поверхностных наноразмерных углеродсодержащих пленок.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перинская И.В., Перинский В.В. Полиморфные превращения в металлах, стимулированные ионно-лучевой обработкой // Технология металлов. 2012. № 9. С. 45-47.

2. Перинская И.В., Перинский В.В., Лясников В.Н. Физическая модель ион-

но-лучевого наноструктурирования твердых износостойких защитных покрытий с улучшенными высокотемпературными характеристиками ответственных деталей и узлов авиационно-космической техники // Технология металлов. 2013. № 9. С. 17-23.

3. Обзор по электронной технике: Технология изготовления субмикронных слоев арсенида галлия / И.А. Фролов, Б.В. Козейкин, С.А. Чурим и др. // Сер. Технология, организация производства и оборудование. Москва, 1976. Вып. 9 (397). 48 с.

4. **Перинский В.В., Перинская И.В., Калганова С.Г.** Наноразмерные ионно-легированные структуры арсенида галлия для твердотельных СВЧ устройств. Саратов: СГТУ, 2019. 112 с.

5. Обзор по электронной технике: Физико-технологические особенности ионного легирования монокристаллического и эпитаксиального арсенида галлия для монокристаллических СВЧ устройств / Б.И. Козейкин,

В.В. Перинский и др. Москва, 1983. Вып. 5 (933). Сер. 7. 48 с.

6. Аддитивное ионное легирование арсенида галлия методом формирования нанокластеров / В.В. Перинский, И.В. Перинская, И.В. Родионов, Л.Е. Куц // Физика и химия обработки материалов (ФХОМ), 2022. № 2. С. 5-12.

7. Ziegler I.E. SRIM – the stopping and range of ions in matter // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B., 2010. Vol. 268. P. 1818-1823.

8. **Перинский В.В., Перинская И.В.** Электротехнология и электрофизика. Ионное легирование арсенида галлия: монография. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2025. 233 с.

**Бунтаков Данил Владиславович** – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

**Danil V. Buntakov** – Postgraduate student, Department of Electric Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Vladimir V. Perinsky** – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Electric Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 29.12.25, принята к опубликованию 12.03.26*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 332.143

## СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ В КОНТЕКСТЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ И ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ

**Н.В. Бойнов, О.В. Кабанов**

## STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING SECTOR OF THE REPUBLIC OF MORDOVIA IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATIONS AND GLOBAL CHALLENGES

**N.V. Boynov, O.V. Kabanov**

*Статья посвящена комплексному исследованию современного положения, ключевых проблем и перспектив электротехнической отрасли Республики Мордовия. В работе систематизированы общероссийские тенденции и адаптирован успешный опыт других регионов, что позволило сформулировать основные стратегические векторы развития. Среди них выделяются цифровая трансформация производственных процессов, диверсификация рынков сбыта, целенаправленное развитие человеческого капитала и оптимизация механизмов государственной поддержки.*

*Ключевые слова: электротехническая отрасль, стратегия развития, цифровая трансформация, региональная экономика, Республика Мордовия*

Электротехническая промышленность занимает стратегически важное место в экономике, во многом определяя уровень технологического суверенитета и энергетической безопасности государства. Для промышленно развитых регионов России, к числу которых относится Республика Мордовия с её исторически

*The article is devoted to a comprehensive study of the current state, key problems and prospects of the electrical engineering industry in the Republic of Mordovia. The work systematizes all-Russian trends and adapts the successful experience of other regions, which made it possible to formulate its main strategic development trends. Among these are digital transformation of production processes, diversification of the sales markets, targeted development of human capital and optimization of state support mechanisms.*

*Keywords: electrical engineering industry, development strategy, digital transformation, regional economy, Republic of Mordovia*

сформировавшимися производственными активами, такими как ПАО «Ковылинский электромеханический завод», данная отрасль служит не только источником налоговых поступлений и обеспечения занятости населения, но и ключевым компонентом в создании инновационного климата территории.

Современная динамика развития электротехники в Мордовии детерминирована сложным сочетанием глобальных вызовов, общенациональных экономических трендов и локальных региональных особенностей. Цифровая трансформация экономики создает, с одной стороны, новые возможности для технологической модернизации производства и вывода на рынок инновационных продуктов, а с другой – обостряет конкурентную борьбу и диктует необходимость быстрой адаптации к изменяющимся условиям. В данной ситуации разработка сбалансированной стратегии развития электротехнической отрасли региона становится особенно актуальной, требуя учёта как макроэкономических факторов, так и специфики региональной промышленной политики.

#### **Анализ текущего состояния и ключевые вызовы для мордовских производителей**

*Макроэкономический контекст и отраслевые тенденции.* Общероссийский контекст функционирования электротехнической промышленности в последние годы отличается повышенной нестабильностью. Согласно статистическим данным, индекс производства в отрасли часто не достигает отметки 100 %, что указывает на наличие системного кризиса и сокращение объемов выпуска продукции. Отрицательная динамика хорошо прослеживается на примере выпуска отдельных видов изделий: за промежуток с 2010 по 2015 годы производство электродвигателей разной мощности и генераторов переменного тока уменьшилось на 30-70%.

На предприятиях Мордовии это выражается в неполной загрузке производственных мощностей, значительном уровне физического и морального износа основных фондов, а также в снижении показателей рентабельности. Экономическая нестабильность отрицательно влияет на развитие производственных систем: в условиях падения спроса на электротехническую продукцию усиливается конкуренция, что вынуждает производителей уделять повышенное внимание потребительским предпочтениям и вопросам ценообразования.

*Структурные проблемы отрасли в регионе.* Системные проблемы, характерные для отрасли в регионе, носят комплексный характер и нуждаются в системном же решении.

*Кадровый дефицит.* Рынок труда переживает острый недостаток в специалистах, которые обладали бы не только достаточным практическим опытом, но и актуальными компетенциями в сфере цифровых и энергоэффективных технологий. Указанная проблема усугубляется недостаточно развитыми связями между образовательными учреждениями, например, Мордовским государственным университетом, и реальным производственным сектором, что создает препятствия для целевой подготовки инженеров и технологов. Нескоординированность взаимодействия между вузами и промышленностью приводит к дефициту инженерных и высококвалифицированных кадров, владеющих передовыми технологиями.

*Сырьевая и технологическая зависимость.* Значительная часть производственных мощностей в отрасли либо морально устарела, либо находится на стадии создания. Недостаток собственных ноу-хау наряду с низкой инновационной активностью предприятий сдерживает появление на рынке новых видов электротехнических изделий. Для соответствия мировым стандартам качества и повышения конкурентоспособности необходимы масштабные инвестиции в современное оборудование, технологии и материалы, а также активизация собственных опытно-конструкторских разработок.

*Зависимость от конъюнктуры строительного рынка.* Электротехнический рынок является производным от строительного. Спад в жилищном и промышленном строительстве незамедлительно приводит к сокращению спроса на [1] низковольтное и распределительное оборудование, кабельно-проводниковую продукцию, установочные изделия и светотехнику. Это ставит в уязвимое положение производителей, которые не смогли диверсифицировать ка-

налы сбыта. Развитие электротехнического рынка в значительной степени определяется динамикой строительного, поскольку последний выступает первичным для многих сегментов электротехники [4].

*Обострение конкурентной борьбы.* На рынке сохраняется устойчивая тенденция к усилению конкуренции, что особенно заметно в сегменте дорогостоящего низковольтного оборудования. Местные производители вынуждены конкурировать не только друг с другом, но и с крупными международными корпорациями, которые предлагают качественную продукцию, адаптированную к местным условиям, а также реализуют стратегии поглощения отечественных компаний. В таких условиях часть игроков прибегает к ценовому демпингу, что провоцирует падение рынка в денежном выражении и в конечном счете наносит ущерб всем участникам, одновременно снижая качество продукции до критических значений. [3]

### **Перспективные направления и стратегии развития для Республики Мордовия**

*Цифровая трансформация как ключевой драйвер роста.* Принятая в России программа развития цифровой экономики до 2035 года создает уникальные возможности для модернизации отрасли. Конкурентоспособными и эффективными окажутся те предприятия, которые внедряют и активно используют передовые электронные технологии и сервисы, а также формируют стратегические прогнозы на основе глубокого анализа больших данных.

Для Мордовии это подразумевает активное вовлечение в формирующийся рынок интеллектуальных энергетических систем EnergeNet. От предприятий требуется создание пилотных площадок для демонстрации эффективности новых интеллектуальных разработок и высокотехнологичных решений в области производства и эксплуатации электронного и электротехнического оборудования. Данное направление будет способствовать диверсификации деятельности, привлечению представителей

малого и среднего бизнеса на рынок комплексных систем и сервисов интеллектуальной энергетики, а также формированию устойчивого экспортного потока высокотехнологичных решений [1].

Многие производители уже осуществляют инвестиции в автоматизированное производство. Это позволяет осуществлять более строгий контроль над качеством оборудования, соблюдением сроков реализации и снижением его себестоимости [3]. В обозримой перспективе ожидается рост уровня автоматизации и цифровизации как промышленных предприятий, так и компаний гражданского сектора экономики благодаря развитию соответствующей индустрии. В России постепенно создаются цифровые подстанции, получают распространение технологии умного дома и умного города [3].

*Диверсификация рынков сбыта и ориентация на новые технологические ниши.* Помимо традиционной ориентации на строительный комплекс, отрасль должна активно осваивать новые, растущие рынки. В ближайшей перспективе появятся новые категории потребителей низковольтного оборудования: объекты возобновляемой энергетики, такие как солнечные и ветровые электростанции, а также критически важная инфраструктура для электротранспорта, в частности, зарядные станции.

Одновременно фиксируется растущий интерес со стороны проектировщиков и застройщиков, особенно в сегменте бизнес- и комфорт-класса, к энергоэффективному оборудованию, что открывает дополнительные возможности для производства соответствующих продуктов. Приоритетное развитие машиностроительного комплекса также будет способствовать существенному росту спроса на электротехническую продукцию как в количественном, так и в качественном выражении [4].

*Развитие человеческого капитала и креативного потенциала.* В условиях современной экономики, которая характеризуется как постиндустриальное общество, знания, инновации и технологии превращаются в главный ресурс развития.

Для Мордовии ключевой задачей становится формирование так называемого «креативного класса» – высококвалифицированных специалистов, способных генерировать и внедрять инновационные решения.

Это требует не только модернизации образовательных программ в высших учебных заведениях, но и налаживания тесных партнерских отношений между научной сферой и промышленностью, организации стажировок и программ дополнительного профессионального образования. Как демонстрирует практический опыт, именно человеческий капитал позволяет преодолевать барьеры во взаимодействии при передаче технологий, сокращая когнитивное расстояние между участниками инновационного процесса за счет образования. Взаимосвязь между научной средой и электротехнической промышленностью имеет решающее значение для креативного развития отрасли [2].

*Активная государственная поддержка и реализация политики импортозамещения.* Успешное развитие отрасли невозможно без целенаправленной и последовательной государственной политики. Требуется поддержка, нацеленная на структурирование внутренних процессов отечественного электротехнического рынка, стимулирование локализации производства и развитие кооперационных связей.

Конкретными мерами могут выступать:

- предоставление налоговых льгот и разработка новых инструментов финансирования для стимулирования инвестиционной активности компаний;
- содействие в привлечении прямых иностранных инвестиций для организации современных совместных производств и обеспечения трансфера передовых технологий;
- формирование национальной системы защиты интеллектуальной собственности, что имеет особое значение для активизации опытно-конструкторских работ;

- оказание поддержки экспортной деятельности предприятий, помогающей преодолевать барьеры при выходе на международные рынки.

*Интеграция в глобальные цепочки создания стоимости и развитие кооперации.* Для успешного выхода на внешние рынки российским компаниям зачастую не хватает необходимых компетенций и ресурсов для формирования долгосрочных партнерских отношений. Наличие качественных бизнес-планов, патентов, концепций и уникальных продуктов само по себе недостаточно для привлечения глобальных инвесторов в электротехническую отрасль [2].

Предприятиям Мордовии необходимо активно развивать кооперационные связи как внутри региона, так и за его пределами. Низкий уровень внутреннего сотрудничества между участниками отрасли препятствует выработке общих целей и снижает потенциальные синергетические эффекты. Создание отраслевого кластера или ассоциации, по аналогии с акционерной компанией «Узэлтехсаноат» в Узбекистане, могло бы способствовать координации производственной и маркетинговой деятельности, проведению единой технической политики и организации совместных проектов.

### **Заключение**

Электротехническая отрасль Республики Мордовия, имеющая прочные промышленные традиции и опирающаяся на такие предприятия, как ПАО «Ковылинский электромеханический завод», обладает значительным, хотя и не в полной мере реализованным потенциалом. Современные вызовы, включая цифровизацию, импортозамещение и глобальную конкуренцию, требуют от региональных властей и бизнеса выработки согласованной и дальновидной стратегии. Ее фундамент должен составить комплексный подход, включающий несколько ключевых элементов:

- последовательную цифровую трансформацию производственных и управленческих процессов;
- диверсификацию рынков сбыта и освоение новых перспективных технологических ниш;

– системное инвестирование в человеческий капитал и формирование целостной инновационной экосистемы;

– эффективное использование инструментов государственной поддержки и развитие кооперационных связей.

Реализация данного подхода позволит не просто адаптироваться к новым условиям, но и занять лидирующие позиции в ряде перспективных рыночных сегментов, обеспечив тем самым устойчивое социально-экономическое развитие Республики Мордо-

вия на долгосрочную перспективу. Для конкурентоспособного развития российских предприятий электротехнической отрасли необходимо учитывать влияние внешних факторов на формирование нового цифрового рынка, тенденции, способствующие импортозамещению, быстро меняющийся внутренний спрос, а также создание внутренней среды для активной разработки, производства, эксплуатации и обслуживания средств, обеспечивающих требования информационной и экономической безопасности [1].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Влияние цифровой экономики на развитие отрасли электротехнической продукции. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40884160>.

2. Объективные предпосылки необходимости и возможности креативного развития электротехнической отрасли России. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745146>.

3. Тенденции и развитие рынка низковольт-

ного оборудования // MarketElectro. 2020. 21 окт. URL: <https://marketelectro.ru>.

4. Исхакова Д.Н. Разработка мероприятий по формированию конкурентных преимуществ предприятия (на примере ООО «Современная электрика»): бакалаврская работа / Сиб. федер. ун-т, Ин-т упр. бизнес-процессами и экономики. Красноярск, 2017. URL: [http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/69155/ishakova\\_diplom.pdf](http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/69155/ishakova_diplom.pdf).

**Бойнов Никита Витальевич** – магистрант направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва

**Кабанов Олег Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника и электротехника» Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва

**Nikita V. Boynov** – Master's student, Direction of Electric Power and Electrical Engineering, Ogarev Mordovia State University

**Oleg V. Kabanov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electronics and Electrical Engineering, Ogarev Mordovia State University

*Статья поступила в редакцию 22.01.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.315.2.016.2

## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ В КАБЕЛЯХ ДО 1000 В

А.Г. Сошинов, Т.В. Копейкина, О.С. Атрашенко, О.О. Ахмедова

## EFFECT OF DEGREE OF REACTIVE POWER COMPENSATION ON VOLTAGE LOSSES IN THE CABLES UP TO 1000 V

A.G. Soshinov, T.V. Kopeikina, O.S. Atrashenko, O.O. Akhmedova

*В настоящей статье рассмотрен расчёт потерь напряжения в кабелях до 1000 В с алюминиевыми и медными жилами при различной степени компенсации реактивной мощности с применением методики расчёта, основанной на использовании системы относительных единиц. В рамках исследования выполнен расчёт потерь напряжения в двухжильном кабеле при прокладке в земле. Приведена оценка влияния степени компенсации реактивной мощности на результирующие потери напряжения.*

Ключевые слова: кабель, расчёт, потери, степень, компенсация, жила, относительные единицы, фаза, коэффициент

### Введение

Не зависимо от внешних условий и экономического состояния в стране в последние годы заметен значительный рост энергопотребления промышленными предприятиями и другими потребителями электрической энергии городов и сельских населенных пунктов. К тому же наблюдается изменение характера нагрузки электропотребителей из-за расширения энергетических секторов и технологий, внедрения искусственного интеллекта, распространения современных электроприборов, освещения и техники с низкой мощностью, потребляющих как активную, так и реактивную мощность (РМ) [1]. В связи с этим возрастают потери энергии в электрических сетях, снижается их пропускная способность и напряжение в узлах электрических сетей.

*This article considers the calculation of voltage losses in the cables up to 1000 V with aluminum and copper cores under varying degrees of reactive power compensation using the calculation technique based on the use of the system of relative units. The research focuses on the calculation of voltage losses in a two-core cable installed underground. The impact of the degree of reactive power compensation on the resulting voltage losses has been estimated.*

Keywords: cable, calculation, losses, degree, compensation, core, relative units, phase, coefficient

В 2022 году наибольший уровень потерь электроэнергии был зафиксирован в сетях низкого напряжения до 1000 В и составил 34,7 % от общего уровня потерь электроэнергии в распределительных и магистральных сетях России [1]. В таблице 1 представлено распределение потерь электроэнергии по различным классам напряжения [1].

Известно, что большинство промышленных приемников потребляют как активную, так и реактивную электроэнергию, хотя такие приемники как трансформаторы, сталеплавильные дуговые печи, вентильные инверторы, а также асинхронные электродвигатели в промышленных сетях потребляют около 60-80% реактивной энергии. Все эти устройства являются электромагнитными аппаратами и имеют обмотки индуктивности. В обмотках при протекании переменного тока индуцируются реактивные элек-

тродвижущие силы (ЭДС), обуславливающие сдвиг по фазе между напряжением и током. Отношение потребляемой активной мощности к полной при этом характеризуется коэффициентом мощности  $\cos \phi$ . Как правило, сдвиг по фазе обычно увеличивается, а  $\cos \phi$  уменьшается при малой нагрузке. Например, если  $\cos \phi$  двигателей переменного тока при полной нагрузке составляет 0,75-0,80, то при малой нагрузке

он уменьшится до 0,20-0,40. Малонагруженные трансформаторы также имеют низкий  $\cos \phi$ . Поэтому если не принять специальных мер, то результирующий  $\cos \phi$  электроэнергетической системы будет низок и может уменьшиться до 0,50-0,70. С уменьшением  $\cos \phi$  ток нагрузки электрической станции и подстанции будет увеличиваться при одной и той же потребляемой из сети активной мощности.

Таблица 1 – Распределение потерь электроэнергии по классам напряжения в 2022 году, млн кВт·ч

Потери электроэнергии в распределительных и магистральных электрических сетях				
Всего	по уровню напряжения			
	высокое напряжение – 110 кВ и выше	среднее первое напряжение – 27,5-60 кВ	среднее второе напряжение – 1-20 кВ	низкое напряжение – 0,4 кВ и ниже
90972,8	26979,3	5300,9	27121,7	31570,9
100 %	29,7 %	5,8 %	29,8	34,7

Для того чтобы не передавать реактивную мощность из сети, ее можно создавать непосредственно рядом с местом потребления, например, с помощью конденсаторных установок. На основании этого, при компенсации реактивной мощности (применении регулируемых конденсаторных установок КРМ) ток, потребляемый из сети, снижается в зависимости от  $\cos \phi$  на 30-50 %, уменьшается нагрев кабельных и воздушных линий, повышается ресурс изоляции кабелей и проводов. Поэтому необходимо поддерживать  $\cos \phi$  в диапазоне 0,9...0,96, для того чтобы избежать лишних платежей за потребление реактивной мощности, снизить нагрузку на кабели и трансформаторы. В то же время необходимо застраховаться от перекомпенсации (когда емкостная составляющая реактивной энергии, генерируемая конденсаторными установками, превышает индуктивную составляющую потребителей), возможной при  $\cos \phi = 0,97$  и выше, что может привести к повышению напряжения в сети и, как следствие, выходу из строя оборудования. Таким образом, компенсацию реактивной мощности в полной мере можно отнести к энергосберега-

ющим технологиям. Повышение  $\cos \phi$  позволяет уменьшить потребление из сети реактивной энергии [2].

Задача расчёта потерь напряжения и активной мощности при передаче электрической энергии является актуальной как для всей энергосистемы, так и для отдельных её частей. Потери активной мощности рассчитываются на участке электрической сети от места установки прибора учета до границы раздела балансовой принадлежности электрических сетей потребителя.

Как отмечалось в [3], общепринятым и предпочтительным из расчётов потерь мощности в кабелях напряжением до 1000 В является расчет в относительных единицах. Применение системы относительных единиц часто существенно упрощает расчетные выражения (получают простую структуру), которые описывают процессы в различных элементах электрических сетей. По мнению авторов, использование системы относительных единиц также облегчит контроль расчетных данных и сопоставление результатов расчетов для установок различной мощности. Это вызвано тем, что для таких установок отно-

сительные значения расчетных величин часто имеют одинаковый порядок и можно быстро определить вычисляемые величины.

### **Цель исследования**

Применение конденсаторных установок для повышения коэффициента мощности дают промышленным объектам много выгодных преимуществ, основными из которых являются:

- снижение счетов за электроэнергию;
- увеличение полезной (активной) мощности системы;
- улучшение и стабилизация напряжения;
- снижение потерь, повышение сроков обслуживания и работы оборудования, кабельных коммуникаций.

Как уже отмечалось, больше всего от компенсации выигрывают объекты с низким коэффициентом мощности в силовой сети (или сегментах сети), где оборудование, например, электродвигатели работают с неполной нагрузкой – при использовании циркулярных пил, шаровых мельниц, конвейеров, компрессоров, шлифовальных станков, вырубных прессов и т. п. Поэтому компенсация реактивной мощности (КРМ) является одним из эффективных средств снижения потерь мощности и электроэнергии при ее передаче по сетям электроэнергетической системы, и, в частности, по распределительным сетям. При этом снижение потерь обеспечивает как повышение надежности и экономичности электроэнергетической системы, так и снижение расхода органического топлива для выработки электроэнергии [4]

Методам расчета и анализа потерь электрической энергии посвящены многие работы отечественных и зарубежных авторов [5-16]. В указанных источниках обозначены основные причины потерь электроэнергии в электрических сетях, описывается их структура, а также дается ответ на вопрос о рациональном уровне потерь электроэнергии в электрических сетях. Авторы указанных источников описывают и показывают на конкретных примерах основные методы расчета различных составляющих технологических потерь электроэнергии в электрических сетях различных классов

напряжения, мероприятия по их снижению и дают оценку экономической эффективности этих мероприятий, иллюстрируют принципы нормирования потерь электроэнергии. В то же время расчеты в приведенных источниках в основном выполняются в именованных единицах [3].

В данной статье ставится задача произвести анализ потерь напряжения в относительных единицах (о.е.) в двухжильных кабелях с алюминиевыми и медными жилами в зависимости от степени компенсации реактивной мощности при прокладке кабелей в земле. По результатам расчетов, произведенных упрощенным способом в относительных единицах, предполагается дать оценку влияния степени компенсации реактивной мощности на потери напряжения в кабелях.

### **Результаты исследования**

Установлено, что основную массу промышленных потребителей электрической энергии составляют приемники, работающие на напряжении до 1000 В. В зависимости от схемы электроснабжения и окружающих условий цеховые электроприемники, например, могут получать питание по шинопроводам, низковольтным кабелями и проводам.

Номенклатура низковольтных кабелей весьма обширна. Они могут отличаться количеством и материалом жил, материалом защитной изоляции и материалом изоляции жил. Способ прокладки кабелей зависит от материала, из которого сделана изоляция и защитная оболочка. Кабели могут прокладываться в земле, по воздуху и в воде.

В качестве объектов исследований авторами были выбраны двухжильные и трехжильные кабели с алюминиевыми и медными жилами напряжением до 1000 В, которые могут быть проложены по воздуху и в земле.

Двухжильный кабель является одним из элементов цеховых электрических сетей промышленных предприятий и других электрических сетей, где требуется передача электрической энергии. Он отличается высокой надежностью и простотой монтажа. Кабель хорошо защищен от внешних

воздействий, таких как вибрации, влага и высокие температуры, что обеспечивает стабильную работу системы электроснабжения, обладает высокой механической прочностью, гибкостью и долгим сроком службы. Токопроводящие жилы двухжильных кабелей должны быть круглыми или сегментными. Конструкции сегментных жил должны быть приведены в технических условиях на кабели конкретных марок [17]. Основными характеристиками двухжильного кабеля являются его сечение, длина, материал токопроводящих жил и тип изоляции. Сечение кабеля определяет его способность передавать электрический ток. Длина кабеля влияет на его сопротивление и потери энергии при её передаче.

Как уже отмечалось в [3], трехжильный кабель – это многожильный электрический кабель, состоящий из трех медных или алюминиевых проводов (жил), которые помещены в общую защитную оболочку. Одним из основных преимуществ трехжильных кабелей является возможность передачи большой мощности по сравнению с двухжильными кабелями. Также трехжильные кабели могут обеспечивать более равномерную нагрузку на систему электропитания, что позволяет эффективно использовать электрические сети. Трехжильные кабели могут быть выполнены с разными характеристиками и широко применяются в промышленных комплексах, строительстве и электрических сетях с большими мощностями. При выборе трехжильного кабеля необходимо учитывать требования и характеристики конкретной системы электроснабжения, такие как номинальное напряжение, мощность, условия эксплуатации и множество других факторов.

Таким образом, выбор между двухжильным и трехжильным кабелем зависит от типа проводимых электрических цепей и требований к безопасности использования. Если речь идет о простых цепях, где заземление не является обязательным, то можно выбрать двухжильный кабель. В случае сложных цепей или при необходимости обеспечения дополнительной безопасности рекомендуется выбирать трехжильный кабель. При выборе между

двухжильным и трехжильным кабелем необходимо учесть не только технические, но и экономические аспекты. Правильный выбор кабеля позволит не только обеспечить надежность и безопасность электрической сети, но и сэкономить деньги.

Как известно, кабели напряжением до 1000 В могут прокладываться различными способами, в том числе по воздуху и в земляных траншеях. Прокладка кабельных линий, в том числе кабелей до 1000 В, непосредственно в земле подробно представлена в Правилах устройства электроустановок [18].

Прокладка кабеля по воздуху имеет определённые преимущества в сравнении с прокладкой в земле, такие как: скорость монтажа; простота в обслуживании; относительная дешевизна. Недостатками «воздушной» прокладки является: подверженность кабелей влиянию факторов внешней среды; отсутствие эстетичности.

Как отмечается в [19], потери напряжения в элементе сети в о.е. к номинальному напряжению с учетом степени компенсации реактивной мощности нагрузки потребителя электрической энергии за этим элементом можно определить по формуле:

$$\Delta U^* = K_3 V \cdot \cos \varphi_{\Pi} (1 + \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\Pi} (1 - C_Q)), \quad (1)$$

где  $K_3$  – коэффициент загрузки элемента по активной мощности;  $V$  – потери напряжения в о.е. элемента сети при протекании номинального тока  $I_{ном}$  через активное сопротивление элемента или номинальной мощности  $S_{ном}$ ;  $\cos \varphi_{\Pi}$  и  $\operatorname{tg} \varphi_{\Pi}$  – коэффициенты мощности и реактивной мощности нагрузки электропотребителя (ЭП) элемента сети при номинальном напряжении;  $C_Q$  – степень компенсации реактивной мощности, равная отношению реактивной мощности компенсирующего устройства  $Q_{KV}$  при номинальном напряжении к реактивной нагрузке потребителя  $Q_{KV}$  при номинальном напряжении:

$$C_Q = Q_{KV} / Q_{KV}; \quad (2)$$

$\varepsilon$  – отношение реактивных и активных сопротивлений элемента сети:

$$\varepsilon = X / R. \quad (3)$$

Оценка целесообразности применения предлагаемого метода расчета рассматривается на конкретных примерах.

**Пример 1.** Произведён расчёт потерь напряжения в относительных единицах (о.е.) в двухжильном кабеле с алюминиевыми жилами проложенного в земле в зависимости от

степени компенсации реактивной мощности, при отношении реактивных и активных сопротивлений элемента сети  $\varepsilon = 1$ , коэффициенте загрузки элемента по активной мощности  $K_3 = 0,3$ , коэффициенте мощности потребителя  $\cos \varphi_{II} = 0,85$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_{II} = 0,75$ .

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Потери напряжения двухжильного кабеля с алюминиевыми жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 1$

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Допустимый длительный ток, А	Потери напряжения в о.е. через активное сопротивление, $V_k$	Потери напряжения в элементе сети в о.е. к номинальному напряжению с учетом степени компенсации реактивной мощности нагрузки потребителя за этим элементом, $\Delta U^*$
2,5	34	0,09608	0,024501
4	42	0,118688	0,030265
6	55	0,155424	0,039633
10	80	0,226072	0,057648
16	105	0,296719	0,075663
25	135	0,381496	0,097281
35	160	0,452143	0,115297
50	205	0,579308	0,147724
70	245	0,692344	0,176548
95	295	0,833639	0,212578
120	340	0,960804	0,245005
150	390	1,102099	0,281035
185	440	1,243394	0,317065

Степень компенсации реактивной мощности принимается равной  $C_Q = 0,1$ , т.е. компенсирующее устройство скомпенсировало десятую часть реактивной мощности

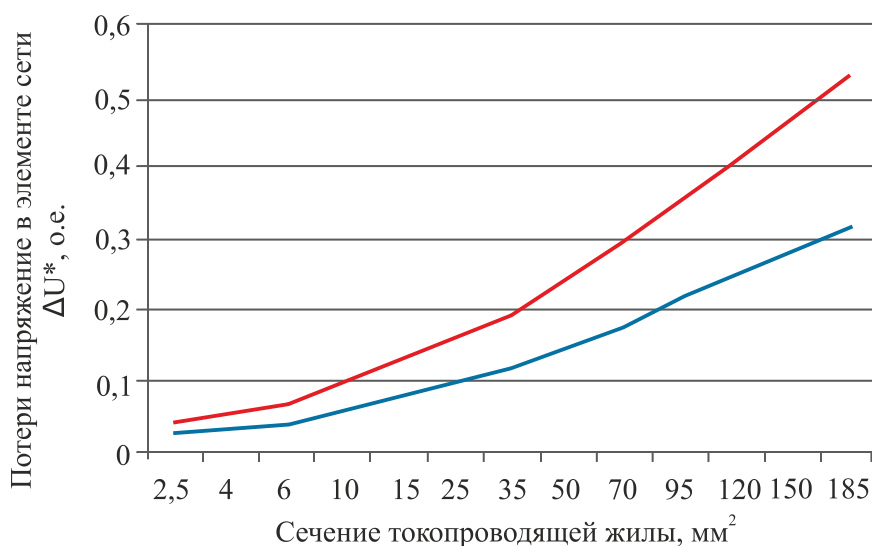
приёмника. Оценивается влияние данного показателя на результирующие потери напряжения и результаты расчетов заносятся в табл. 3.

Таблица 3 – Потери напряжения двухжильного кабеля с алюминиевыми жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 0,1$

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Потери напряжения в элементе сети в о.е. к номинальному напряжению с учетом степени компенсации реактивной мощности нагрузки потребителя за этим элементом, $\Delta U^*$
2,5	0,041038
4	0,050694
6	0,066386

Окончание табл. 3

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Потери напряжения в элементе сети в о.е. к номинальному напряжению с учетом степени компенсации реактивной мощности нагрузки потребителя за этим элементом, $\Delta U^*$
10	0,096561
16	0,126736
25	0,162946
35	0,193122
50	0,247437
70	0,295718
95	0,356068
120	0,410383
150	0,470734
185	0,531085



**Рис. 1.** Потери напряжения двухжильного кабеля с алюминиевыми жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 0,1$  (красный цвет) и степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 1$  (синий цвет)

По результатам расчетов строятся графики потерь напряжения в двухжильном кабеле с алюминиевыми жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. проложенного в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 0,1$  и степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 1$  (рис. 1).

**Пример 2.** Произведён расчёт потерь напряжения в относительных единицах (о.е.) в двухжильном кабеле с медными жилами проложенного в земле зависимости от степени компенсации реактивной мощности при отношении реактивных и активных сопротивлений элемента сети  $\varepsilon = 1$ , коэффициент загрузки элемента по активной мощности  $K_3 = 0,3$ , коэффици-

ент мощности потребителя  $\cos \varphi_{II} = 0,85$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_{II} = 0,75$ . Результаты расчета представлены в табл. 4.

Степень компенсации реактивной мощности принимается равной  $C_Q = 0,1$ , т. е. компенсирующее устройство скомпенсировало десятую часть реактивной мощности приёмника. Оценивается влияние данного показателя на результирующие потери напряжения и результаты расчетов заносятся в табл. 5.

По результатам расчетов строятся графики потерь напряжения в двухжильном кабеле с медными жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. проложенного в земле при степени компенсации реактивной

мощности  $C_Q = 0,1$  и степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 1$  (рис. 2).

Осуществленные исследования подтвердили, что применение системы относительных единиц существенно упрощает расчетные выражения, описывающие процессы в различных элементах электроэнергетической системы, облегчает контроль расчет-

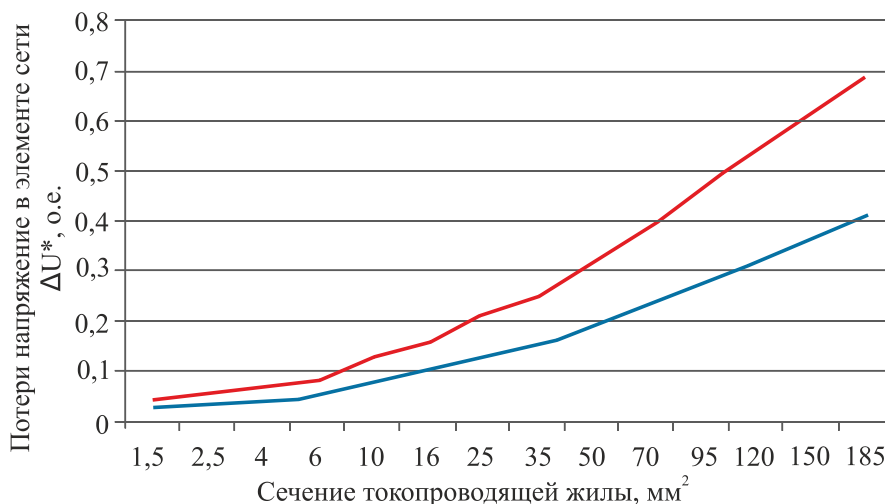
ных данных и сопоставление результатов расчетов для установок различной мощности, поскольку для таких установок относительные значения расчетных величин часто имеют одинаковый порядок. Применение данного метода значительно упростило расчет потерь напряжения в кабельных линиях до 1000 В.

Таблица 4 – Потери напряжения двухжильного кабеля с медными жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 1$

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Допустимый длительный ток, А	Потери напряжения в о.е. через активное сопротивление, $V_k$	Потери напряжения в элементе сети в о.е. к номинальному напряжению с учетом степени компенсации реактивной мощности нагрузки потребителя за этим элементом, $\Delta U^*$
2,5	44	0,124339	0,031707
4	55	0,155424	0,039633
6	70	0,197813	0,050442
10	105	0,296719	0,075663
16	135	0,381496	0,097281
25	175	0,494532	0,126106
35	210	0,593438	0,151327
50	265	0,748862	0,19096
70	320	0,904286	0,230593
95	385	1,087969	0,277432
120	445	1,257523	0,320668
150	505	1,427077	0,363905
185	570	1,61076	0,410744

Таблица 5 – Потери напряжения двухжильного кабеля с медными жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 0,1$

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Потери напряжения в элементе сети в о.е. к номинальному напряжению с учетом степени компенсации реактивной мощности нагрузки потребителя за этим элементом, $\Delta U^*$
2,5	0,053108
4	0,066386
6	0,084491
10	0,126736
16	0,162946
25	0,211227
35	0,253472
50	0,319858
70	0,386243
95	0,464699
120	0,53712
150	0,60954
185	0,687996



**Рис. 2.** Потери напряжения двухжильного кабеля с медными жилами в зависимости от сечения жилы в о.е. при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 0,1$  (красный цвет) и степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 1$  (синий цвет)

Практические расчёты наглядно показали, что потери напряжения в о.е. двухжильного кабеля с алюминиевыми жилами при сечении жилы 185 мм<sup>2</sup> при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 0,1$  и  $C_Q = 1$  возрастают на 42 %, а потери напряжения в о.е. двухжильного кабеля с медными жилами при сечении жилы 185 мм<sup>2</sup> при прокладке кабеля в земле при степени компенсации реактивной мощности  $C_Q = 0,1$  и  $C_Q = 1$  возрастают на 41 %. Таким образом, компенсация реактивной мощности является эффективным способом снижения потерь напряжения в кабелях до 1000 В. Это достигается за счёт уменьшения тока в линии и снижения реактивного сопротивления, что в конечном итоге приводит к повышению эффективности системы электроснабжения.

### Вывод

Параметры различных элементов электроэнергетических систем могут быть выражены как в системе именованных, так и в системе относительных единиц, т. е. в долях от определенных значений этих же величин, принятых за единицу измерения. При этом точность получаемых результатов расчетов не зависит от используемой системы единиц измерения.

Проведенные исследования показали, что методика определения потерь активной мощности в кабелях напряжением до 1000 В по потерям напряжения с учетом влияния степени компенсации реактивной мощности на потери напряжения в относительных единицах позволяет повысить достоверность балансовых расчетов электроэнергии, а также даёт возможность более обоснованно рекомендовать мероприятия по снижению потерь и экономии электроэнергии.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях 0,4-10 кВ городов северных регионов / А.А. Завалов, С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков // Глобальная энергия. 2023. Т. 29. № 3. С. 57-73.
2. Лепеш А.Г., Потемкина Т.В. Повышение эффективности использования электроэнергии // Техника-технологические проблемы сервиса. 2017. № 2 (40). С. 60-72.

3. Сошинов А.Г., Копейкина Т.В., Атрашенко О.С. Оценка влияния материала жилы, количества жил и способа прокладки на потери активной мощности в кабелях напряжением до 1 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2024. № 4 (85). С. 52-58.
4. Кузнецов А.В., Ребровская Д.А. Модель оценки эффективности установки

компенсирующих устройств в сети потребителя электроэнергии // Интеллектуальная электротехника. 2020. № 1. С. 15-24.

5. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 366 с.

6. **Воротницкий В.Э., Калинин М.А.** Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: учеб.-метод. пособие. Москва: ИПК-госслужбы, 2000. 63 с.

7. **Воротницкий В.Э.** Потери электроэнергии в электрических сетях: анализ и опыт снижения. Москва: Энергопрогресс, Энергетик, 2006. 103 с.

8. **Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В.** Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. Москва: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004. 280 с.

9. **Глазунов А.А., Шведов Г.В.** Проектирование районной электрической сети: метод. указ. к курсовому проектированию. Москва: ИД МЭИ, 2010. 72 с.

10. **Шведов Г.В., Сипачева О.В., Савченко О.В.** Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. Москва: ИД МЭИ, 2013. 424 с.

11. **Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хустнутдинов Р.Р.** Сравнительный анализ методов и погрешностей расчета потерь активной мощности в низковольтных цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 13-24.

12. Потери электрической энергии в электрических сетях / Г.Ю. Киселёв,

В.М. Троценко, Е.В. Петрова и др. // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185).

13. **Фурсанов М.И.** Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. Минск: Технология, 2000.

14. Анализ снижения потерь в электрических сетях при использовании современных электрических кабелей / И.Х. Холидинов и др. // Universum: технические науки: электрон. науч. журнал. 2022. № 6 (99). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13995> (дата обращения: 23.03.2024).

15. **Marinopoulos A.G., Alexiadis M.C., Dokopoulos P.S.** Energy losses in a distribution line with distributed generation based on stochastic power flow // Electric Power Systems Research. 2011. № 5. P. 86-94.

16. Reliability Evaluation of Distribution System Based on Modified Failure Mode and Effect Analysis Method / Wang Feng, Qi Yanpeng, Fu Zhengcai, et al. // Low Voltage Apparatus. 2013. № 1. P. 37-42.

17. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия. Введ. с 01.01.2014. Москва: Стандартинформ, 2013. 48 с. URL: <https://www.ruscable.ru/doc/docgost/files/77247429117.pdf>.

18. Правила устройства электроустановок / Министерство энергетики РФ. 7-е изд. Москва: НИЦ ЭНАС, 2002.

19. **Сошинов А.Г., Копейкина Т.В.** Упрощенный метод расчета потерь напряжения в кабелях до 1 кВ системы электропитания промышленного предприятия // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 3 (66). С. 70-74.

**Сошинов Анатолий Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

**Anatoly G. Soshinov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Head: Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"

**Копейкина Татьяна Васильевна** – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

**Атрашенко Ольга Сергеевна** – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

**Ахмедова Ольга Олеговна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

**Tatyana V. Kopeikina** – Senior Lecturer, Department of Electricity Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"

**Olga O. Atrashenko** – Senior Lecturer, Department of Electricity Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"

**Olga O. Akhmedova** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electricity Supply of Industrial Enterprises, Kamyshin Technological Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"

*Статья поступила в редакцию 20.01.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.3.078

## РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ВИБРОПРЕССА С ДЕБАЛАНСНЫМИ ВОЗБУДИТЕЛЯМИ

Д.Г. Максимов, А.В. Стариков

### DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED CALCULATION MODEL OF A VIBRATION PRESS WITH UNBALANCED EXCITERS

D.G. Maksimov, A.V. Starikov

*Статья посвящена разработке расчетной модели вибропресса с дебалансными возбудителями. Рассмотрены уравнения движения виброплощадки пресса с учетом однодвигательного привода с двумя дебалансными валами. Предложено при разработке расчетной модели заменить изображения Лапласа производных некоторых величин их приближениями. Приведена расчетная модель конкретного типа вибропресса для формирования строительных изделий. Проведено моделирование движения виброплощадки рассматриваемого пресса для двух вариантов нагрузки. Сравнение результатов моделирования с данными натурных экспериментов показало их хорошее совпадение, что позволило сделать вывод об адекватности разработанной расчетной модели.*

*Ключевые слова: вибропресс, расчетная модель, дебалансный возбудитель, уравнение движения*

#### **Введение**

Для повышения прочности бетонных изделий на предприятиях, производящих строительные материалы, широко используют вибропрессы, которые приводятся в движение дебалансными возбудителями. Одним из вариантов технической реализации вибровозбудителя является конструкция, в которой два дебалансных вала, вращающиеся в разных направлениях, приводятся в движение одним электродвигателем.

*The article is devoted to the development of a computational model for a vibratory press with unbalanced exciters. The equations of motion for the vibrating platform of the press are considered, taking into account a single-motor drive with two unbalanced shafts. It is proposed to replace the Laplace representations of the derivatives of some quantities with their approximations when developing a computational model. A computational model for a specific type of vibratory press used to form the building products is presented. The vibration platform motion of this press is simulated for two load conditions. Comparison of the simulation results with the data from full-scale experiments showed good agreement, which allowed us to conclude that the developed computational model is adequate.*

*Keywords: vibratory press, computational model, unbalance exciter, equations of motion*

Цель проводимого исследования заключается в создании упрощенной расчетной модели вибропресса с однодвигательным вибровозбудителем и оценка ее адекватности.

#### **Решение задачи**

Расчетная схема механической части вибропресса, а именно виброплощадки, выглядит следующим образом (рис. 1) [1]. На ней приняты следующие обозначения:  $m_i$  и  $m_u$  – массы собственно виброплощадки

и формируемого изделия,  $m_{1d}$  и  $m_{2d}$  – массы первого и второго дебалансов,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – скорости вращения дебалансов (с учетом направления вращения),  $F_1$  и  $F_2$  – силы, возбуждающие колебания,  $k_y$  и  $b_y$  – суммарные коэффициенты жесткости пружин и демпфирования.

Такое устройство вибропресса обеспечивает в установившемся режиме колебания только по оси  $Y$  относительно начального

$$\left. \begin{aligned} m_{\Sigma} \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + k_y y &= m_{1d} r_{1d} \left( \frac{d\omega_1}{dt} \sin \varphi_1 + \omega_1^2 \cos \varphi_1 \right) + \\ &+ m_{2d} r_{2d} \left( \frac{d\omega_2}{dt} \sin \varphi_2 + \omega_2^2 \cos \varphi_2 \right); \\ J_{np} \frac{d\omega_1}{dt} &= M_{\partial\partial} - M_0 - m_{1d} r_{1d} \left( \frac{d^2 y}{dt^2} + g \right) \sin \varphi_1 + \frac{m_{2d} r_{2d}}{\eta} \left( \frac{d^2 y}{dt^2} + g \right) \sin \varphi_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $r_{1d}$  и  $r_{2d}$  – эксцентриситеты дебалансов;  $y$  – смещение виброплощадки по оси  $Y$ ;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы поворота дебалансов относительно оси  $Y$ ;  $J_{np}$  – приведенный к валу момент инерции ротора;  $g$  – ускорение свободного падения;  $M_{\partial\partial}$  – электромагнитный момент развиваемый электродвигателем;  $M_0$  – момент холостого хода;  $\eta$  – коэффициент полезного действия шестеренчатой передачи;  $t$  – время.

положения, определяемого суммарной массой  $m_{\Sigma}$  виброплощадки и формируемого изделия.

С учетом того, что дебалансный возбудитель приводится во вращение одним электродвигателем, причем встречное вращение дебалансных валов обеспечивается шестеренчатой передачей, уравнения движения механической части вибропресса будет описываться системой уравнений

Анализ последнего уравнения в (1) позволяет сделать вывод, что на движение механической системы будет оказывать влияние электродвигатель. Как правило, в вибровозбудителях применяют трехфазные асинхронные двигатели, динамические свойства которых описываются следующей системой уравнений [2, 3]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= U_{1x} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1x} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2x} + \omega_0 \psi_{1y}; \\ \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= U_{1y} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1y} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2y} - \omega_0 \psi_{1x}; \\ \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2x} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1x} + (\omega_0 - \omega) \psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2y} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1y} - (\omega_0 - \omega) \psi_{2x}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3Z_n L_0}{2J_{np} \Delta} (\psi_{1y} \psi_{2x} - \psi_{1x} \psi_{2y}) - \frac{1}{J_{np}} M_c; \\ U_{1x} &= k_{U1} f_1 + U_0; \\ U_{1y} &= k_{U1} f_1 + U_0; \\ \omega_0 &= \frac{2\pi f_1}{Z_n}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\psi_{1x}$  и  $\psi_{1y}$  – проекции вектора потокосцепления статора в ортогональной системе координат  $Oxy$ , вращающейся со скоростью

магнитного поля;  $U_{1x}$  и  $U_{1y}$  – проекции изображающего вектора фазного напряжения в той же системе координат;  $\psi_{2x}$  и  $\psi_{2y}$  –

соответствующие проекции вектора потока сцепления ротора;  $L_1$  и  $R_1$  – индуктивность и активное сопротивление цепи статора;  $L'_2$  и  $R'_2$  – приведенные индуктивность и активное сопротивление цепи ротора;  $L_0$  – взаимная индуктивность;  $\omega_0$  – угловая скорость вращения магнитного поля;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора дви-

гателя;  $J_{np}$  – приведенный момент инерции ротора;  $Z_n$  – число пар полюсов;  $M_c$  – момент сопротивления на валу электродвигателя;  $\Delta = L_1 L'_2 - L_0^2$ ;  $f_1$  – частота питающего напряжения;  $k_{U1}$  – коэффициент пропорциональности;  $U_0$  – напряжение при нулевой частоте.

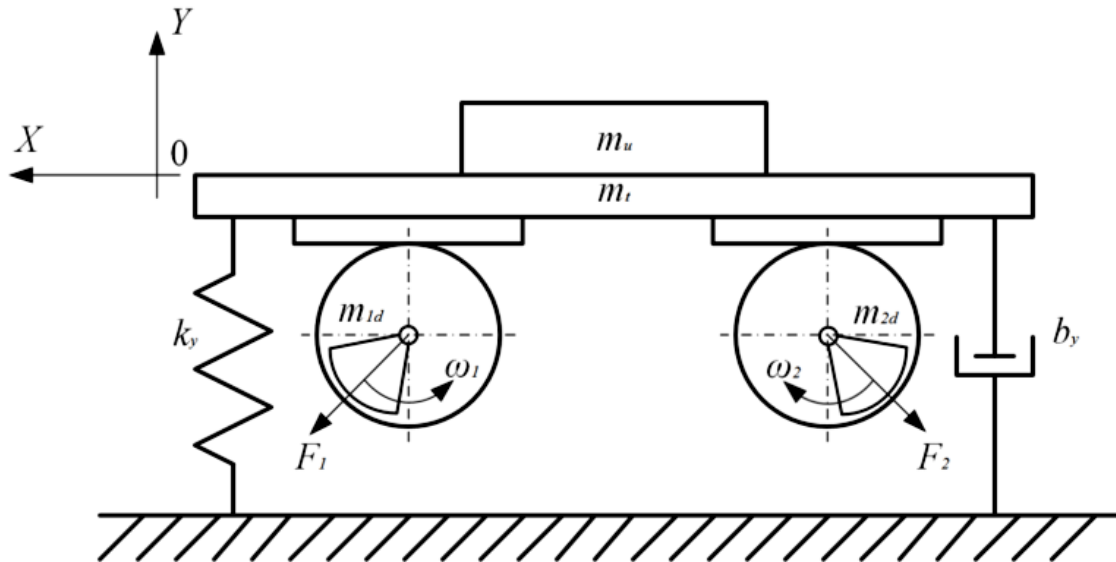


Рис. 1. Расчетная схема механической части вибропресса

При этом необходимо отметить, что для рассматриваемого случая момент сопротивления на валу двигателя равен

$$M_c = M_0 + m_{1d} r_{1d} \left( \frac{d^2 y}{dt^2} + g \right) \sin \varphi_1 - \frac{m_{2d} r_{2d}}{\eta} \left( \frac{d^2 y}{dt^2} + g \right) \sin \varphi_2 \quad (3)$$

При создании расчетной модели вибропресса в программе Matlab Simulink, позволяющей определять параметры колебаний, возникает проблема, связанная с необходимостью вычислений первых производных от скоростей вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  дебалансных валов и второй производной от перемещения  $y$  виброплощадки. Поэтому предлагается при моделировании вибропресса заменить изображения Лапласа этих производных их приближениями

$$L \left\{ \frac{d\omega_1}{dt} \right\} = \frac{p\omega_1}{T_\mu p + 1}, \quad (4)$$

$$L \left\{ \frac{d\omega_2}{dt} \right\} = \frac{p\omega_2}{T_\mu p + 1}, \quad (5)$$

$$L \left\{ \frac{d^2 y}{dt^2} \right\} = \frac{p^2 y}{T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1}, \quad (6)$$

где  $T_\mu$  – малая постоянная времени, величина которой практически не влияет на работу вибропресса;  $p$  – комплексная переменная.

Переходя в (1) и (2) к преобразованиям Лапласа, с учетом формул (3)-(6) разработаем в программе Matlab Simulink расчетную модель, позволяющую моделировать колебания виброплощадки вибропресса (рис. 2). В нее также входит модель асинхронного двигателя в виде подсистемы АМ (рис. 3). Численные значения коэффициентов и постоянных времени, приведенные на рисунках, соответствуют конкретному типу вибропресса, входящего в состав комплекса для изготовления строительных изделий МЕГАТЕХ-Метеор-3М.

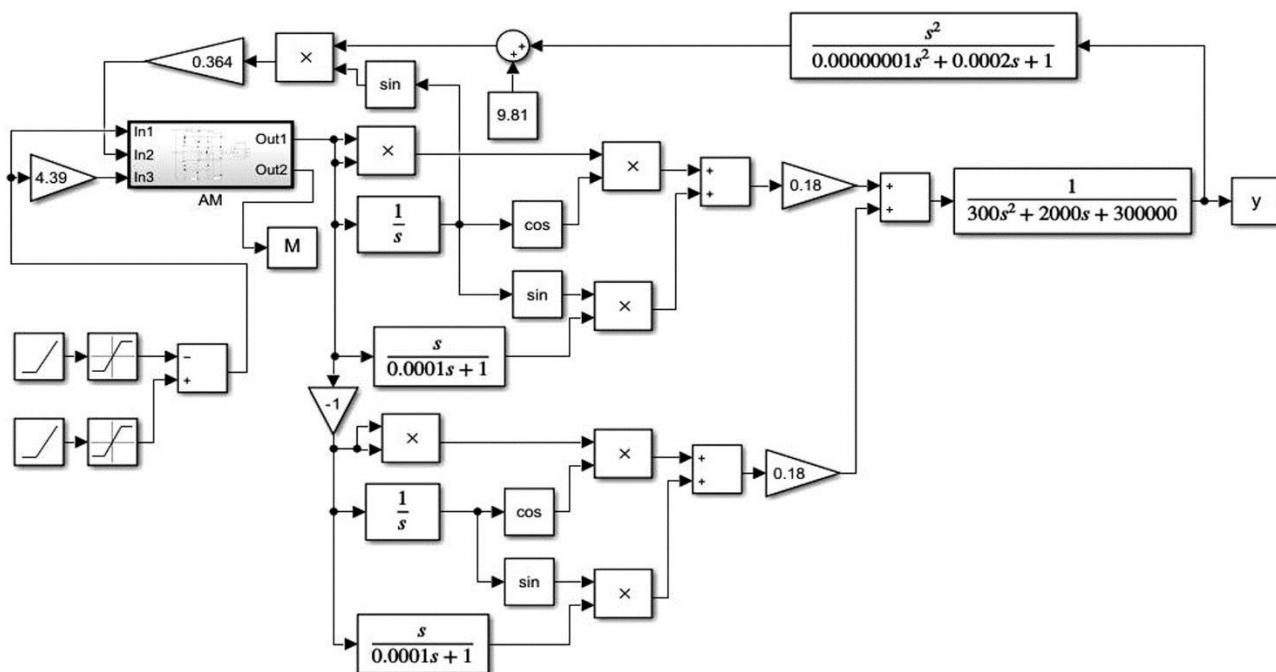


Рис. 2. Расчетная модель вибропресса

Вибропресс характеризуется следующими параметрами:  $m_t = 300$  кг,  $k_y = 300000$  Н/м,  $b_y = 2000$  Нс/м,  $m_{1d} r_{1d} = m_{2d} r_{2d} = 0,18$  кгм,  $\eta = 0,98$ . В качестве привода вибратора используется асинхронный двигатель W22100L мощностью 3 кВт и номинальной скоростью вращения 2900 об/мин. Параметры схемы замещения этого двигателя равны:  $R_1 = 1,853$  Ом,  $L_1 = 0,399$  Гн,  $R'_2 = 1,247$  Ом,  $L'_2 = 0,402$  Гн,  $L_0 = 0,387$  Гн. Двигатель также имеет следующие показатели:  $M_0 = 0,5$  Нм,  $Z_n = 1$ ,  $J_{np} = 0,015$  кгм<sup>2</sup>, постоянные времени статора  $T_1 = 0,0142$  с и ротора  $T_2 = 0,0213$  с. При разработке расчетной модели также учитывалось, что частоту вибраций можно регулировать с помощью преобразователя частоты, в котором применен линейный закон регулирования напряжения в функции частоты, причем  $k_{U1} = 4,39$  В/Гц.

Для оценки адекватности разработанной расчетной модели вибропресса с дебалансными возбудителями проведем моделирование колебаний виброплощадки при отсутствии формируемого изделия, то есть для  $m_\Sigma = 300$  кг. Результаты моделирования показывают, что в этом случае при частоте 49,8 Гц амплитуда колебаний составляет 1,21 мм (рис. 4).

Проведем также моделирование колебаний виброплощадки при максимальной ее нагрузке формируемыми изделиями, когда  $m_\Sigma = 450$  кг. В этом случае частота колебаний остается такой же 49,8 Гц, но амплитуда колебаний уменьшается до 0,8 мм (рис. 5).

Полученные результаты практически полностью совпадают с данными натурных экспериментов, которые показывают, что амплитуда колебаний виброплощадки варьируется от 0,8 мм до 1,2 мм в зависимости от загрузки.

Разработанная расчетная модель позволяет также определять резонансную частоту механических колебаний. Действительно, с помощью блоков задания можно регулировать частоту питающего напряжения и, следовательно, частоту колебаний виброплощадки. Моделирование показывает, что при  $m_\Sigma = 300$  кг резонансу соответствует частота 5 Гц. В то же время резонансную частоту механической части вибропресса можно определить по формуле

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_y}{m_\Sigma}}. \quad (7)$$

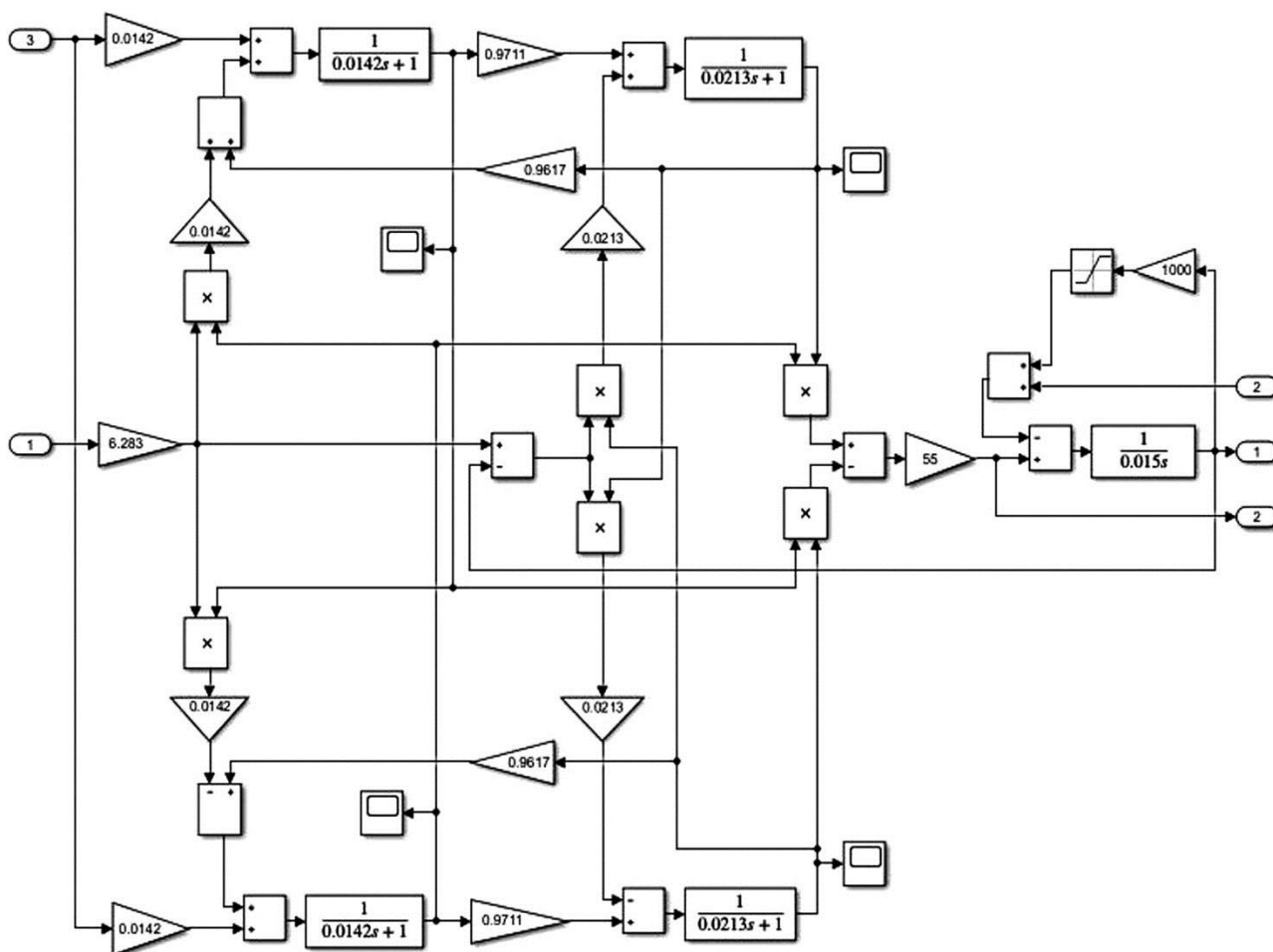


Рис. 3. Расчетная модель асинхронного двигателя W22100L

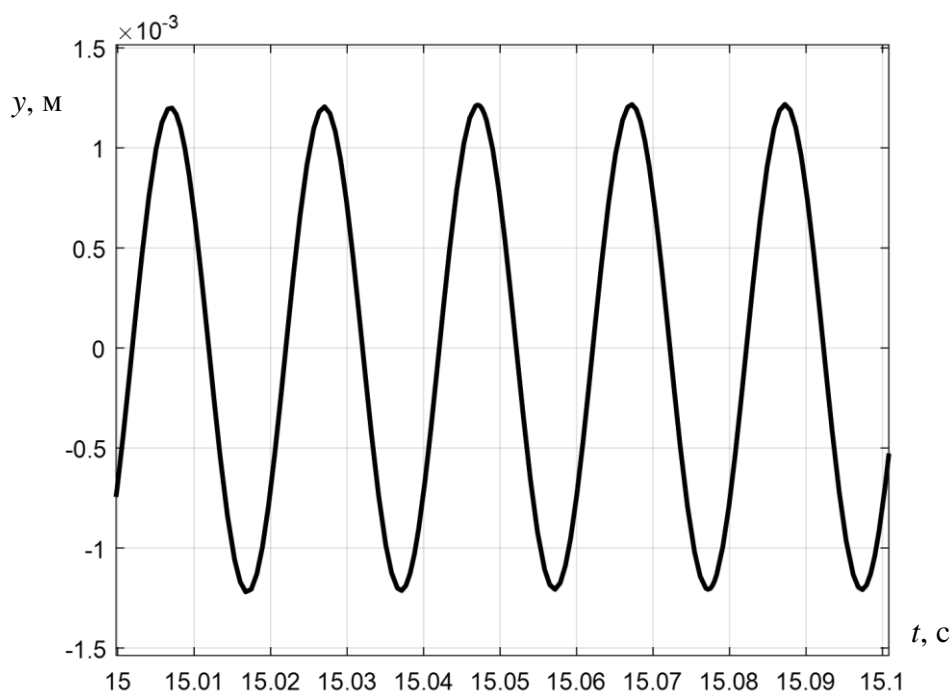


Рис. 4. Расчетный график установившихся колебаний при  $m_{\Sigma} = 300$  кг

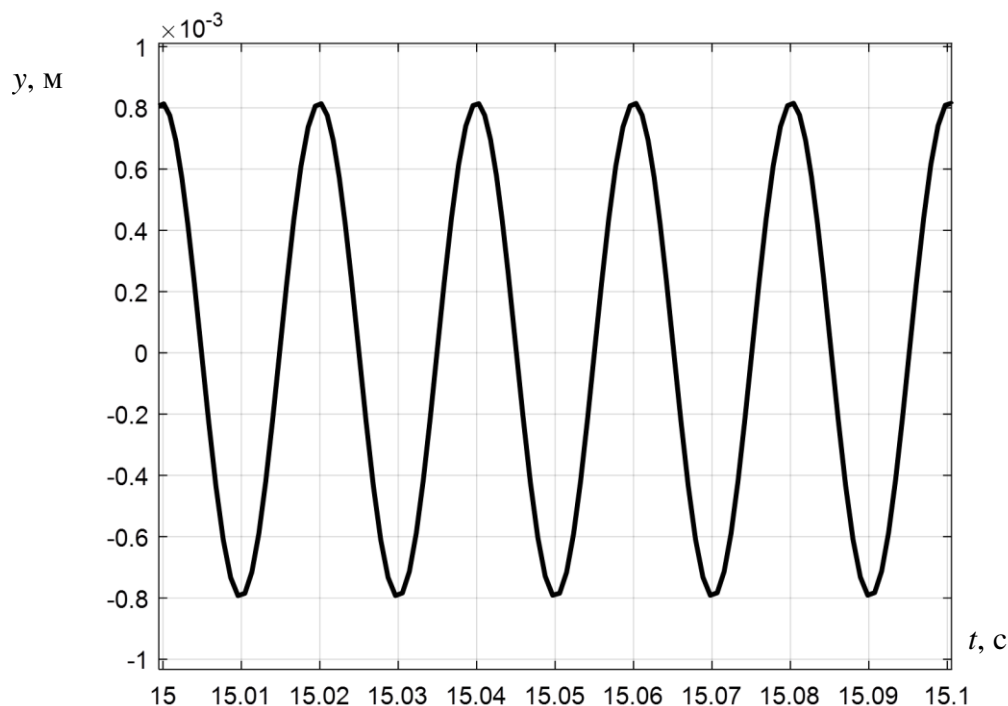


Рис. 5. Расчетный график установившихся колебаний при  $m_{\Sigma} = 450$  кг

Подставляя в (7) значения  $m_{\Sigma} = 300$  кг и  $k_y = 300000$  Н/м, получим резонансную частоту ненагруженной виброплощадки  $f_{рез} = 5,03$  Гц. Расхождение результатов моделирования и аналитического расчета не превышает 0,6 %. При  $m_{\Sigma} = 450$  кг моделирование дает значение резонансной частоты 4,15 Гц, а при расчете по формуле (7) получается  $f_{рез} = 4,11$  Гц, то есть расхождение результатов составляет менее 1 %. Это также подтверждает адекватность разработанной расчетной модели вибропресса.

### Выводы

1. Разработанная расчетная модель вибропресса с однодвигательным вибровозбудителем и двумя дебалансными валами может применяться при расчете частоты и амплитуды колебаний виброплощадки.

2. Погрешность расчетов мала и не превышает 1 %, что позволяет использовать разработанную расчетную модель как при оценке качества формируемого строительного изделия, так и для создания цифрового двойника вибропресса.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ведерников А.С., Дунаев Д.И.** Коррекция статической характеристики частотного преобразователя для уменьшения амплитуд резонансных колебаний вибростолы // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2021. Т. 29. № 2. С. 117-128.

2. **Стариков А.В.** Линеаризованная математическая модель асинхронного электродвигателя как объекта системы частот-

ного управления // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Вып. 16. Сер. Физико-математические науки. Самара: СамГТУ, 2002. С. 175-180.

3. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, Т.В. Табачникова и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. № 4 (64). С. 155-167.

**Максимов Даниил Геннадьевич** – аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета

**Daniil G. Maksimov** – Postgraduate student, Department of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment, Samara State Technical University

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

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

*Статья поступила в редакцию 20.02.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.311: 004.052

## МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КИБЕРАТАК НА МИКРОСЕТИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

И.И. Артюхов, Н.А. Недосекин

## METHODS FOR DETECTION AND PREVENTION OF CYBER ATTACKS ON MICROGRIDS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

I.I. Artyukhov, N.A. Nedosekin

*В статье рассмотрена проблема кибербезопасности микросетей с интегрированными возобновляемыми источниками энергии. Исследуются уязвимости измерительных датчиков, управляющих сигналов и обмен информацией. С появлением коммуникационных сетей и интеллектуальных измерительных устройств количество точек для нанесения кибератак увеличилось, что делает микросети более уязвимыми. Негативные последствия таких атак могут привести к выходу микросети из строя и распространиться по всей сети из-за отсутствия эффективных методов защиты. Для обнаружения и предотвращения кибератак на микросети предлагаются методы на основе искусственного интеллекта.*

*Ключевые слова: микросети, кибератаки, обнаружение, предотвращение, машинное обучение, искусственный интеллект*

Микросеть – это группа взаимосвязанных нагрузок и распределенных источников энергии, которые обеспечивают электроэнергией местных потребителей и могут работать как в автономном, так и в режиме подключения к общей сети. Микросети используются для достижения целей в области экономической эффективности, устойчивого энергоснабжения и надежного энергообеспечения [1-4].

Современные микросети превратились в киберфизические системы, в которых распределенные источники энергии состав-

*The article discusses the issue of cybersecurity in microgrids with integrated renewable energy sources. It explores the vulnerability of measurement sensors, control signals, and information exchange. With the advent of communication networks and smart measurement devices, the number of potential cyberattack points has increased, making microgrids more vulnerable. The negative consequences of such attacks can lead to failures in the microgrid network and their spread across the communication network because of the problems with effective microgrid protection measures. Artificial intelligence-based methods are proposed for detecting and preventing cyberattacks on micro-networks.*

*Keywords: micro-networks, cyberattacks, detection, prevention, machine learning, artificial intelligence*

ляют физический уровень, а коммуникационные сети и программные контроллеры – кибернетический уровень [5].

После изучения данных о кибератаках на энергетический сектор было установлено, что типичная цепочка кибератак начинается с получения удаленного доступа с помощью целевого фишинга. Получив первоначальный доступ, злоумышленники проводят разведку сетевых данных, чтобы распространить и похитить критически важную информацию. После злоумышленники приступают к манипуляциям систе-

мами управления и безопасности, отправляя вредоносные команды и блокируя доступ операторов к их компьютерам [6].

Кибератаки в «умных сетях» могут быть направлены на обмен данными между контроллером микросети и различными интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) путем изменения измеренных показаний или создания задержек в передаче, что приведет к перебоям в подаче электроэнергии, финансовым потерям и нестабильной работе системы [7, 8]. Благодаря использованию передовых коммуникационных технологий и вычислительных инструментов современные электросети превращаются в более интеллектуальные системы с повышенной эффективностью. Однако на способность современной энергосистемы работать надежно и безопасно напрямую влияют такие кибератаки как: отказ в обслуживании (DoS), внедрение ложных данных (FDI), человек по середине (MiTM).

На рисунке показаны микросети с потенциальными объектами для нанесения кибератак. Микросеть имеет точку подключения к основной электросети. Преобразователи управляются локально на физическом уровне. Распределенная система управления реализует задачи управления, поступающие от контроллеров сети. Датчики и средства связи подвержены атакам с подменой данных (FDI), а атаки типа «отказ в обслуживании» (DoS) могут быть нацелены на управляющие сигналы, поступающие на исполнительные механизмы. Рассмотрим более подробно влияние кибератак на микросеть.

Фальсификация данных (False data injection, FDI) – это атака с использованием данных, при которой злоумышленник может вносить изменения в работу датчиков и устройств измерения фазовых координат и компрометировать критически важную информацию, либо вводя ложные данные в коммуникационную сеть, либо полностью подменяя фактические значения. Это может привести к потере синхронизации и некорректной оценке состояния, что негативно

скажется на экономическом управлении и энергоснабжении критически важных объектов [9, 10]. Целостность системы оценки состояния может быть нарушена злоумышленником, который взламывает часть счетчиков и отправит измененные данные, не изменив при этом результат полностью. Атаки с использованием ложных данных могут быть осуществлены даже в том случае, если злоумышленник не знаком с конфигурацией энергосистемы, поскольку он может получить доступ к онлайн-данным, рыночным данным и измерениям потоков электроэнергии [11]. При атаке с использованием ложных данных сигнал обратной связи распределенного контроллера интеллектуальной сети можно описать следующим образом:

$$U(xn(t)) = xn(t) + \phi n(t), \quad (1)$$

где  $U(xn(t))$  – это сигнал обратной связи после получения ложных данных  $\phi n(t)$  вносится в  $n$ -й нормальный сигнал обратной связи контроллера  $xn(t)$ .

Различные типы кибератак с использованием иностранных цифровых идентификаторов, такие как периодические, непериодические и одновременные кибератаки, можно смоделировать путем обновления  $\phi n(t)$  [12]. Такие атаки с использованием FDI также могут вывести из строя или даже разрушить распределенные системы управления, которые регулируют работу современных микросетей. Атаки с использованием FDI обычно приводят к изменению выходных параметров микросетей переменного тока, вызывая повреждение оборудования, путем подмены маршрутов передачи данных и изменения уровней сигналов в распределенной коммуникационной сети. Чтобы атака с использованием FDI осталась незамеченной, диапазон внедрения вредоносных данных выбирается в пределах номинального рабочего состояния системы. Вводя в коммуникационную сеть различную ложную информацию, можно проводить атаки с использованием FDI на сигналы обратной связи распределенных контроллеров [13].



Отказ в обслуживании (DoS) – это вид кибератаки, целью которой является ограничение доступа авторизованного пользователя к сети. Микросети становятся главной мишенью для таких DoS-атак из-за их зависимости от обмена информацией для достижения целей управления [14]. Такие атаки осуществляются путем глушения линий связи с помощью неточных данных и нарушения нормального доступа к данным между центрами управления и периферийными устройствами, такими как датчики и исполнительные механизмы. Для проведения подобных атак не нужно разбираться в настройках микросетей или обладать необходимыми навыками для изменения управляющих сообщений и измерений. Глобальные сети могут быть уязвимы для DoS-атак, если вредоносное ПО установлено на маршрутизаторах подстанций и дает злоумышленникам доступ к коммуникациям устройств измерения. В случае успешной атаки надежность микросети оказывается под угрозой, поскольку для своевременной отправки управляющих сигналов должны быть доступны все каналы связи. Усовершенствованные инфраструктуры учета могут столкнуться с киберугрозой, если злоумышленник получит доступ к взломанному устройству после установки вредоносного ПО. Управляя большим количеством агентов, можно заставить пользователя системы получать чрезмерное количество пакетов данных. Некоторые из разрешенных пакетов будут потеряны авторизованным пользователем из-за объема трафика [15]. В распределенной микросети кибератака DoS может быть смоделирована следующим образом:

$$[\chi_i]_{n \times 1} = \alpha_i(\tau)[\gamma_i]_{n \times 1} + \alpha_j(\tau)[\gamma_j]_{n \times 1}, \quad (2)$$

где  $\chi_i$  представляет собой один из скомпрометированных целевых узлов и  $\gamma_{ij}$  – это соседние узлы скомпрометированного узла.  $\alpha_{ij}(\tau)$  являются коэффициентами усиления,  $(t_1 < \tau < t_2)$  – это временной интервал, в течение которого может произойти вредоносная кибератака, и  $i, j \in \mathbb{R}$  представляет собой один из распределенных источников

энергии в микросети. Коэффициент усиления, равный 1, означает, что канал связи скомпрометирован и недоступен, а коэффициент усиления, равный 0, означает, что канал связи не скомпрометирован [12]. Использование методов фильтрации данных, систем обнаружения и предотвращения вторжений, а также криптографической аутентификации может значительно снизить вероятность DoS-атак в интеллектуальных энергосетях за счет их своевременного обнаружения [16].

Кибератаки типа «человек посередине» (Man-in-the-Middle – MiTM) могут быть нацелены на информацию, которой устройства в микросети должны обмениваться друг с другом, включая управляющие сигналы, данные с датчиков и диспетчерские команды. Такие атаки могут быть нацелены и на жизненно важные компоненты энергосистемы с целью перехвата и сбора информации о коммуникациях сотрудников центра управления, которая может быть использована для проведения новых атак [17]. Злоумышленник может выдавать себя за настоящего пользователя, перехватывать и изменять пакеты сообщений, передаваемые между двумя узлами связи, а также добавлять новые пакеты сообщений, оставаясь при этом незамеченным. Злоумышленник может установить незаконный канал связи между двумя активными узлами и начать отправлять вредоносные данные, чтобы нарушить связь между отправителем и получателем [18]. Для обеспечения устойчивости микросетей с расширенной поверхностью атаки необходимо разрабатывать интеллектуальные технологии. Для обеспечения двустороннего управления потоками энергии в современных микросетях требуется большое количество двунаправленных силовых электронных преобразователей. Эти преобразователи должны быть адаптируемыми, быстродействующими и долговечными, чтобы поддерживать работу сети как в нормальных, так и в критических условиях. Риск кибератак можно значительно снизить, внедрив усовершенствованные методы обнаружения и предотвращения кибератак для микросетей [19].

Уязвимость микросетей к кибератакам можно снизить с помощью различных методов обнаружения кибератак, основанных на анализе данных и машинном обучении. Традиционные методы в значительной степени зависят от точности модели системы, в то время как методы, основанные на машинном обучении, используют вычислительную мощность и объем данных системы. В литературе описано несколько методов обнаружения и предотвращения кибератак на микросети, таких как трансферное обучение, объяснимое обучение, ансамблевое обучение и искусственный интеллект, основанный на физических законах.

При обучении передаче данных используются предварительно обученные модели для обнаружения вредоносных атак, что уменьшает потребность в огромном объеме обучающих данных. Трансферное обучение можно дополнительно разделить на индуктивное трансферное обучение, неконтролируемое трансферное обучение и трансдуктивное трансферное обучение [20]. Обучение передаче на основе подпространственного представления (RSD) применяется к оценщику на основе DNN в [21] для повышения кибербезопасности микросети. В интеллектуальных энергосетях кибератаки могут препятствовать доступу к локальным данным, что может привести к проблемам при планировании энергопотребления и принятии диспетчерских решений. Глубокое трансферное обучение для прогнозирования нагрузки может обеспечить высококачественное прогнозирование нагрузки при использовании меньшего объема данных, так что в случае отсутствия локальных данных прогнозные данные будут доступны [22]. В целом методы прогнозирования можно усовершенствовать, используя обобщающую способность трансферного обучения без необходимости в избыточном объеме данных. Метод оценки нижней границы (LUBE) используется для обнаружения атак FDI в [23] для обеспечения интервалов прогнозирования (PI) по данным интеллектуального счетчика на стороне потребителя. В [24] преобразование Гильберта – Хуана и глубокое обуче-

ние используются для обнаружения атак FDI на уникальных наборах данных, сгенерированных с помощью бутстреппинга.

Последние достижения в области машинного обучения позволили улучшить показатели эффективности, но модели машинного обучения по большей части представляют собой «черный ящик». Объяснимое обучение, или объяснимый искусственный интеллект (Explainable AI, XAI), – это направление в области искусственного интеллекта, которое пытается объяснить прогнозы и результаты работы моделей машинного обучения [25]. С точки зрения кибербезопасности микросетей операторам необходимо доверять моделям и их прогнозам. Объяснимый искусственный интеллект важен для интерпретации решений в критических ситуациях, например, при выявлении аномалий в измерениях и расследовании конкретной атаки. Цена неправильной классификации при определенных обстоятельствах может быть слишком велика [26]. В [27] разработана и протестирована платформа XAI для обнаружения и классификации неисправностей на испытательном стенде microgrid мощностью 50 кВт. Система обнаружения вторжений (IDS) разработана в [28], которая предоставляет объяснение каждой классификации с помощью статистических показателей с использованием аддитивных объяснений Шепли (SHAP).

Ансамблевое обучение предполагает использование различных наборов данных, обучение различных классификаторов и объединение результатов работы классификаторов с помощью различных методов [29]. Экстремальные обучающиеся машины (Extreme-Learning Machines, E3LM) используются для выявления аномалий, вызванных внезапными отказами оборудования, и прошли проверку на системах с 14, 57 и 118 шинами IEEE [30]. Искусственный интеллект, основанный на физических законах, объединяет в себе физические модели и достижения в области искусственного интеллекта. Нейронные сети, основанные на физических законах (Physics-Informed Neural Networks, PINN), и обучение с подкреплением

ем, основанное на физических законах, находят широкое применение в энергосистемах [31]. В работе [32] стратегия распределенного глубокого обучения с подкреплением (Distributed Deep Reinforcement Learning, DRL) используется для разработки оптимальной стратегии защиты от атак с использованием физического воздействия на микросети при соблюдении ряда условий. Несмотря на многообещающие перспективы,

искусственный интеллект, основанный на физических законах, зависит от точности модели и набора данных. Кибербезопасность микросетей от кибератак можно повысить, если приложить усилия для повышения точности модели. С другой стороны, объяснимый ИИ – относительно новая область, и его можно использовать для принятия решений об обнаружении кибератак операторами энергосистем.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Valuing resilience benefits of microgrids for an interconnected island distribution system / A.B. Nassif et al. // *Electronics*. 2022. Т. 11. №. 24. С. 4206.

2. A comprehensive review of architecture, communication, and cybersecurity in networked microgrid systems / A. Aghmadi et al. // *Inventions*. 2023. Т. 8. №. 4. С. 84.

3. Review of networked microgrid protection: architectures, challenges, solutions, and future trends / J. De La Cruz et al. // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2023. Т. 10. №. 2. С. 448-467.

4. Microgrid digital twins: Concepts, applications, and future trends / N. Bazmohammadi et al. // *IEEE Access*. 2021. Т. 10. С. 2284-2302.

5. Signal temporal logic-based attack detection in DC microgrids / O.A. Beg et al. // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Т. 10. №. 4. С. 3585-3595.

6. Матрица MITRE ATT&CK для предприятий. URL: <https://attack.mitre.org/> (дата обращения 16.02.2026)

7. Detection of microgrid cyberattacks using network and system management / M. Karanfil et al. // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2022. Т. 14. №. 3. С. 2390-2405.

8. **Pinto S.J., Siano P., Parente M.** Review of cybersecurity analysis in smart distribution systems and future directions for using unsupervised learning methods for cyber detection // *Energies*. 2023. Т. 16. №. 4. С. 1651.

9. **Reda H.T., Anwar A., Mahmood A.** Comprehensive survey and taxonomies of false data injection attacks in smart grids: attack models, targets, and impacts // *Renewable*

and Sustainable Energy Reviews. 2022. Т. 163. С. 112423.

10. Impact analysis of cyber attacks on smart grid: A review and case study / T.O. Olowu et al. // *New Research Directions in Solar Energy Technologies*. 2021. С. 31-51.

11. A review of false data injection attacks against modern power systems / G. Liang et al. // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016. Т. 8. №. 4. С. 1630-1638.

12. Intelligent anomaly identification in cyber-physical inverter-based systems / A.A. Khan et al. // *Electric Power Systems Research*. 2021. Т. 193. С. 107024.

13. A survey on security communication and control for smart grids under malicious cyber attacks / C. Peng et al. // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Т. 49. №. 8. С. 1554-1569.

14. **Zhang H., Liu B., Wu H.** Smart grid cyber-physical attack and defense: A review // *IEEE Access*. 2021. Т. 9. С. 29641-29659.

15. **Pour M.M., Anzalchi A., Sarwat A.** A review on cyber security issues and mitigation methods in smart grid systems // *South-eastCon 2017*. 2017. С. 1-4.

16. A survey of denial-of-service attacks and solutions in the smart grid / A. Huseinović et al. // *Ieee Access*. 2020. Т. 8. С. 177447-177470.

17. A review of cyber-attack methods in cyber-physical power system / F. Li et al. // *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*. IEEE, 2019. С. 1335-1339.

18. Man-in-the-middle attacks and defence in a power system cyber-physical testbed /

P. Wlazlo et al. // IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications. 2021. Т. 6. № 3. С. 164-177.

19. **Das A. K., Zeadally S.** Data security in the smart grid environment // Pathways to a smarter power system. Academic Press, 2019. С. 371-395.

20. **Alhelou H. H., Hatziargyriou N., Dong Z.Y.** (ed.). Power Systems Cybersecurity: Methods, Concepts, and Best Practices. Springer, 2023.

21. A transfer learning-based method for cyber-attack tolerance in distributed control of microgrids / Y. Xia et al. // IEEE Transactions on Smart Grid. 2023. Т. 15. № 2. С. 1258-1270.

22. An Improved Load Forecasting Method Based on the Transfer Learning Structure under Cyber-Threat Condition / L. Zhao et al. // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Т. 2022. № 1. С. 1696663.

23. **Kavousi-Fard A., Su W., Jin T.** A machine-learning-based cyber attack detection model for wireless sensor networks in microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Т. 17. № 1. С. 650-658.

24. Cyber attack detection process in sensor of DC micro-grids under electric vehicle based on Hilbert-Huang transform and deep learning / H. Cui et al. // IEEE Sensors Journal. 2020. Т. 21. №. 14. С. 15885-15894.

25. A survey of explainable artificial intelligence for smart cities / A.R. Javed et al. // Electronics. 2023. Т. 12. №. 4. С. 1020.

26. Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques for energy and power systems: Review, challenges and opportunities / R. Machlev et al. // Energy and AI. 2022. Т. 9. С. 100169.

27. **Ajayi O.** Explainable ai (xai) for fault detection and classification in microgrids using a real-time simulation framework. 2023.

28. Leveraging explainable artificial intelligence in real-time cyberattack identification: Intrusion detection system approach / X. Larriba-Novo et al. // Applied Sciences. 2023. Т. 13. № 15. С. 8587.

29. **Zhang C., Ma Y.** Ensemble machine learning. New York: Springer, 2012. Т. 144.

30. Extreme learning machine-based state reconstruction for automatic attack filtering in cyber physical power system / T. Wu et al. // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Т. 17. № 3. С. 1892-1904.

31. **Huang B., Wang J.** Applications of physics-informed neural networks in power systems-a review // IEEE Transactions on Power Systems. 2022. Т. 38. № 1. С. 572-588.

32. Resilient optimal defensive strategy of micro-grids system via distributed deep reinforcement learning approach against FDI attack / H. Zhang et al. // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2022. Т. 35. № 1. С. 598-608.

---

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

**Недосекин Никита Алексеевич** – магистрант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

**Nikita A. Nedosekin** – Master's student, Department of Electrical and Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 20.02.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.039:62-622

**УКРУПНЕННАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ  
ВОДОРОДНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА  
КАК ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**А.Н. Егоров, В.Е. Юрин, Д.А. Макаров, Д.М. Аношин**

**COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF RELIABILITY  
OF A HYDROGEN ENERGY COMPLEX AS A  
SOURCE OF ELECTRIC ENERGY**

**A.N. Egorov, V.E. Yurin, D.A. Makarov, D.M. Anoshin**

*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 для получения водяного 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. В настоящей работе проведен анализ надежности разработанного схемного решения производства пиковой электроэнергии на АЭС на базе замкнутого водородного цикла. На основе оценки коэффициента готовности энергокомплекса в работе определено целесообразное число резервного оборудования.*

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

В планах развития энергетики многих стран мира водород занял уверенную позицию экологически чистого и обладающего весомым потенциалом использования топлива [1-3].

Безопасность и эффективность водородного энергокомплекса (ВЭК), в част-

*Hydrogen technologies can ensure efficient operation of nuclear power plants under conditions of uneven power grid consumption throughout the day. During nighttime hours, unused electricity can be used for electrolytic production of hydrogen and oxygen. During peak power consumption hours, hydrogen and oxygen can be used as fuel to generate water steam that will drive a steam turbine, generating additional electricity for the grid. Hydrogen fuel energy can also be used for heating and industrial purposes. The given research analyzes reliability of the developed design for peak power generation at a nuclear power plant using a closed hydrogen cycle. Based on assessment of the power complex operational availability, an appropriate number of backup equipment units was determined.*

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

ности водородного парогенератора, в значительной степени зависит от полноты сжигания водородного топлива, которое может значительно различаться в зависимости условий работы комплекса [4-6]. В качестве решения указанной проблемы авторы разработали способ сжигания водорода в кис-

лородной среде, в том числе с избытком окислителя, в условиях замкнутого цикла. Схема исключает возможность попадания непрореагировавшего водорода в оборудование-потребителя тепловой энергии водородного топлива [7].

Авторы разработали схему многоступенчатого водородного парогенератора с замкнутым циклом сжигания водород-кислородной смеси, которая представлена на рисунке [8].

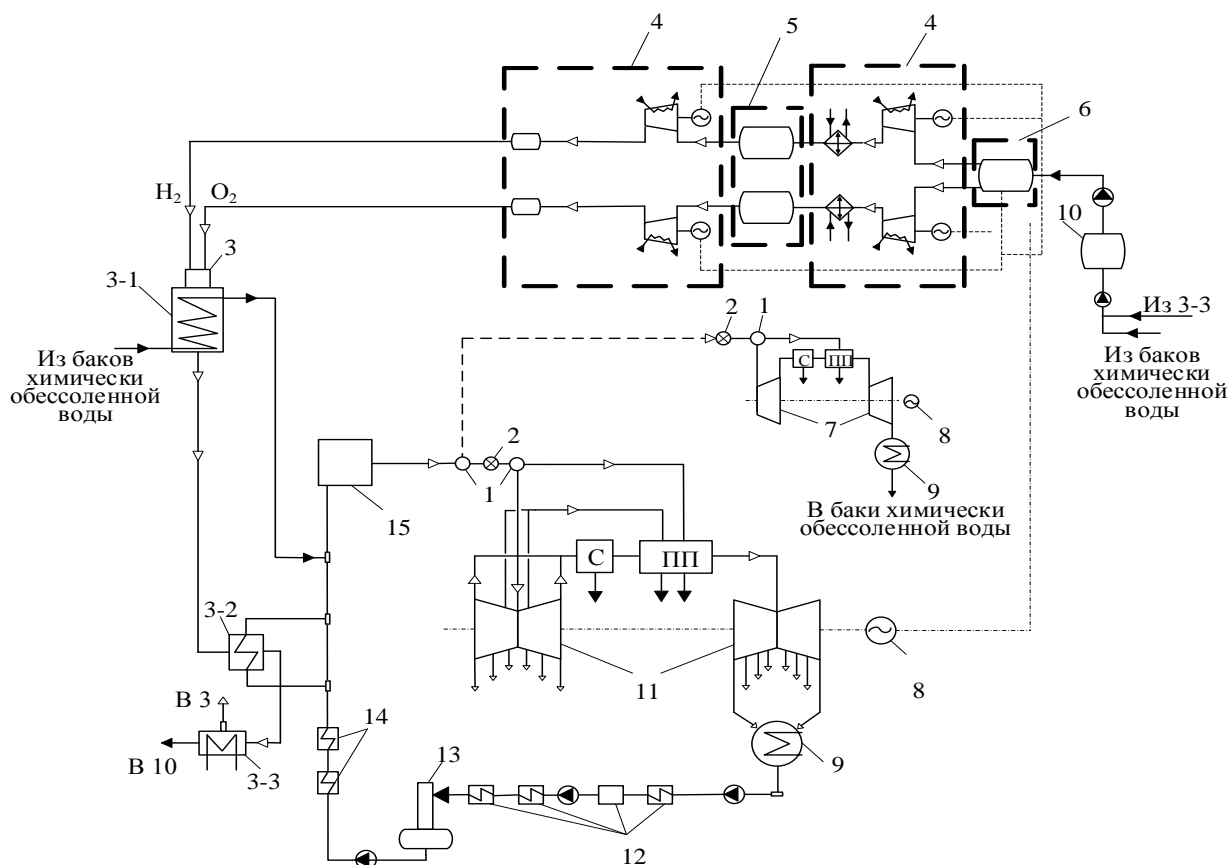


Схема комбинирования энергоблока АЭС (ВВЭР-1200) с водородным энергокомплексом:  
 1 – устройство парораспределения; 2 – стопорный клапан; 3 – водород-кислородные камеры сгорания (парогенераторы) (ВКПГ): 3-1, 3-2, 3-3 – первый, второй и третий теплообменник водородного энергетического комплекса (ТВЭК), соответственно; 4 – система компримирования  $H_2$  и  $O_2$ ;  
 5 – система хранения  $H_2$  и  $O_2$ ; 6 – электролизная установка; 7 – маломощная ПТУ;  
 8 – электрический генератор; 9 – конденсатор; 10 – бак-аккумулятор для нужд электролизной установки; 11 – основная ПТУ; 12 / 14 – подогреватели низкого (ПНД) / высокого (ПВД) давления; 13 – деаэрактор; 15 – парогенераторы (ПГ); С – сепаратор; ПП – промежуточный пароперегреватель

ТВЭК 3-1 необходим для обеспечения безопасного температурного режима работы ВКПГ 3. Нагретая в ТВЭК 3-1 вода направляется в тракт питательной воды перед ПГ АЭС. При этом расход и температура питательной воды растут. ТВЭК 3-2 служит для нагрева части питательной воды после ПВД 14. Из-за повышения температуры и расхода питательной воды увеличивается производительность ПГ АЭС 15 при постоянной мощности реакторной

установки. В ТВЭК 3-3 водород-кислородный пар конденсируется с использованием циркуляционной воды конденсационной установки энергоблока. Непрореагировавшие газы возвращаются в ВКПГ 3, а конденсат – в бак 10, конденсат затем используется для выработки водорода и кислорода. Выработка водорода и кислорода осуществляется методом электролиза воды во время снижения энергопотребления в энергосистеме.

Расчет конструкций и теплообменных поверхностей теплообменников ВЭК с учетом требуемых параметров проведен в работе [9].

Дальнейшее исследование проведено на основе условий эксплуатации ВЭК в составе энергоблока АЭС с ВВЭР-1200, рассмотренных авторами в работе [9]: время зарядки/разрядки – 9/15 ч/день; электрическая мощность энергоблока, используемая

для выработки водорода и кислорода во время снижения энергопотребления в энергосистеме – 1050 МВт; пиковая мощность дополнительной турбины, получаемая за счет использования водородного энергокомплекса во время повышенного спроса на электроэнергию – 115 МВт. Количество используемого оборудования для водородного энергокомплекса приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Количество используемого оборудования для работы ВЭК

Оборудование	Количество оборудования в работе, шт.
Работа во внепиковый период электрической нагрузки (зарядка)	
Электролизные установки	21
Емкости хранения (800 м <sup>3</sup> ) и емкостная арматура Н <sub>2</sub> /О <sub>2</sub>	78/37
Компрессоры (1 ступень компримирования) Н <sub>2</sub> /О <sub>2</sub>	8 / 4
Бак-аккумулятор и емкостная арматура	1
Насосный агрегат (из бака-аккумулятора)	1
Работа в пиковый период электрической нагрузки (разрядка)	
Емкости хранения (800 м <sup>3</sup> ) и емкостная арматура Н <sub>2</sub> /О <sub>2</sub>	78/37
Дожимные компрессоры (2 ступень компримирования) Н <sub>2</sub> /О <sub>2</sub>	4 / 3
ВКПГ	3
1-й ТВЭК	1
2-й ТВЭК	1
3-й ТВЭК	1
Бак-аккумулятор и емкостная арматура	1
Насосный агрегат (из бака-аккумулятора)	1

Приняты следующие допущения при расчете коэффициента готовности ВЭК: функции распределения наработки на отказ подчиняются экспоненциальному закону; интенсивность отказов всех элементов одного назначения одинакова [10, 11]. Для первых двух теплообменных аппаратов введен коэффициент запаса, что является необходимым для оценки надежности вновь разрабатываемого оборудования. Принятый коэффициент запаса составляет 1,5 для первых двух теплообменных аппаратов. Такое снижение времени наработки на отказ теплообменников позволяет учесть возможные неучтенные технические особенности эксплуатации разрабатываемого

теплообменного оборудования при моделировании их работы.

Средние наработки на отказ и интенсивности отказа приняты по данным [12-15], а среднее время восстановления и интенсивность восстановления согласно [16-18] на основе статистических данных эксплуатации входящих в ВЭК элементов и аналогичного по назначению и параметрам оборудования. Предлагаемый авторами ВКПГ в настоящий момент находится на стадии разработки, по этой причине его показатели надежности приняты по наиболее близкому по структуре и режимам работы оборудованию – камерам сгорания газотурбинных установок (ГТУ) [19-20].

Определение коэффициента готовности водородного энергокомплекса, как системы с последовательно подключенным основным оборудованием, производится в соответствии со следующими формулами, учитывающими процесс зарядки ( $K^3$ ) и разрядки ( $K^P$ ):

$$K_{BK} = K^3 \cdot K^P;$$

$$K^3 = K_{ЭУ} \cdot K_{ЕМК}^3 \cdot K_K^3 \cdot K_{АРМ}^3 \cdot K_H^3;$$

$$K^P = K_{ВКПГ} \cdot K_{ЕМК}^P \cdot K_K^P \cdot$$

$$\cdot K_{ТО}^1 \cdot K_{ТО}^2 \cdot K_{ТО}^3 \cdot K_{АРМ}^P \cdot K_H^P,$$

где входящие величины являются коэффициентами готовности основного оборудования водородного энергокомплекса, а именно:  $K_{ЭУ}$  – группы электролизных установок;  $K_{ВКПГ}$  – группы водород-кислородных парогенераторов;  $K_{ЕМК}^3, K_{ЕМК}^P$  – группы емкостей хранения газов системы хранения газов в процессе зарядки и разрядки соответственно;  $K_K^3, K_K^P$  – группы компрессорных установок 1-й и 2-й ступени, соответственно;  $K_{ТО}^1, K_{ТО}^2, K_{ТО}^3$  – двух ТВЭК и конденсатора, соответственно;  $K_{АРМ}^3, K_{АРМ}^P$  – емкостной арматуры бака-аккумулятора в процессе зарядки и разрядки, соответственно;  $K_H^3, K_H^P$  – группы насосных агрегатов после

и до бака-аккумулятора для нужд электролизной установки соответственно.

Коэффициент готовности каждой группы оборудования рассчитывается по следующей формуле [10]:

$$K_i = \sum_0^m \frac{n!}{m!n!} \cdot K_{li}^{n-m} \cdot (1 - K_{li})^m,$$

где  $n, m$  – количество типового оборудования водородного энергокомплекса в работе и в резерве, соответственно;  $K_{li}$  – коэффициент готовности одного элемента группы оборудования.

Коэффициент готовности единицы оборудования группы водородного комплекса:

$$K_{li} = \frac{\mu}{\lambda + \mu},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказа исследуемого оборудования,  $ч^{-1}$ ;  $\mu$  – интенсивность восстановления исследуемого оборудования,  $ч^{-1}$ .

На основании представленных исходных данных, а также с учетом приведенной методики расчета коэффициента готовности, в табл. 2 приведены результаты расчета коэффициента готовности и целесообразного количества резервных агрегатов для каждой группы оборудования ВЭК для процесса зарядки и разрядки.

Таблица 2 – Количество резервного оборудования водородного энергокомплекса

Оборудование	Кол-во агрегатов в резерве	Коэффициент готовности оборудования с учетом / без учета резерва
Работа во внепиковый период электрической нагрузки (зарядка)		
Электролизные установки	1	0,90122 / 0,89654
Емкости хранения и емкостная арматура H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	1/1	0,98473 / 0,98459
Компрессоры (1 ступень) H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	1/1	0,97116 / 0,96858
Бак-аккумулятор (емкостная арматура)	–	0,99987
Насосный агрегат (из бака-аккумулятора)	1	0,99416 / 0,98823
Работа в пиковый период электрической нагрузки (разрядка)		
Емкости хранения и емкостная арматура H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	1/1	0,98473 / 0,98459
Дожимные компрессоры (2 ступень) H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	1/1	0,98417 / 0,98155
ВКПГ	1	0,98354 / 0,97541
1-й промежуточный ТВЭК	1	0,99999 / 0,94559
2-й промежуточный ТВЭК	1	0,99999 / 0,71295
3-й промежуточный ТВЭК	–	0,99853

Окончание табл. 2

Оборудование	Кол-во агрегатов в резерве	Коэффициент готовности оборудования с учетом / без учета резерва
Бак-аккумулятор (емкостная арматура)	–	0,99987
Насосный агрегат (в бак-аккумулятор)	1	0,99416 / 0,98823
Итоговые значения		
В процессе зарядки	6	0,85671 / 0,84988
В процессе разрядки	8	0,94611 / 0,63079
Водородный энергокомплекс	14	0,81054 / 0,53609

Таким образом, определены группы оборудования ВЭК, необходимость в резервировании которых отсутствует по причине высокого исходного коэффициента готовности, обусловленного соответствующим соотношением времени наработки на отказ и времени восстановления оборудования. При этом для электролизных установок, емкостей хранения, компрессоров, водород-кислородных парогенераторов и насосных агрегатов выявлена необходимость обеспечения резервных агрегатов.

Также выявлено, что при учете большего, чем в табл. 2, количества резервного оборудования прирост коэффициента готовности ВЭК крайне незначителен. Например, с увеличением количества резервных агрегатов для группы электролизных установок до 2 прирост коэффициента готовности составит порядка 0,001 %.

*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. **Malyschenko 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. Malyschenko // *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. Надежность ТЭС: учеб. пособие / Г.В. Ноздренко, В.Г. Томилов, В.В. Зыков, Ю.Л. Пугач. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. 63 с.

11. **Шишмарев В.Ю.** Надежность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр «Академия», 2010. 304 с.

12. ЭУС. URL: <https://www.nropem.ru/ru/equipment/elektroliznyeustanovki-eus>.

13. МегаПром. Промышленное и строительное оборудование: Сравнительный анализ компрессоров. URL: <https://xn--80aff1adlgi.xn--p1ai/content/Sravnitelnyuanalizkompressorov>.

14. Колотовский А.Н. Эксплуатация запорной арматуры на объектах магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Арматуростроение. 2006. № 2 (41). С. 62-65.

15. Электронная торговая площадка. Группа Газпромбанка: Горелка основная ПСТ9.387536.000 для камеры сгорания ГТН-16М-1 URL: <https://etpgpb.ru/portal/catalog/products/2300664-gorelka-osnovnaya-pst9-387536-000-dlya-kamery-sgor>.

16. ООО «НПП «Промышленная Автоматика». Блоки розжига запальника и контроля пламени БРЗ- 04-М1-2К и БРЗ-04-М1-2К-01:

руководство по эксплуатации. URL: <https://tempres.ru/upload/br3-04-m1-2k-01.pdf>.

17. Аминов Р.З., Портянкин А.В. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности // Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6.

18. Поршневые компрессоры: замена клапанов, регулировка зазоров, ремонт ПИК. URL: <https://inner.su/articles/porshnevyekompressory-zamena-klapanov-regulirovka-zazorov-remont-pik/>

19. Низамутдинов Р.М. Исследование и доводка характеристик кольцевой камеры сгорания ГТД наземного применения на основе анализа надёжности её работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05; науч. рук. Б.Г. Мингазов. Казань, 2003. 147 с.

20. Попырин Л.С., Штротберг Ю.Ю., Дильман М.Д. Надёжность парогазовых установок // Теплоэнергетика. 1999. № 7. С. 50-53.

---

**Егоров Александр Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник НОЦ «Энергетические системы и комплексы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

**Макаров Даниил Алексеевич** – ассистент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Аношин Даниил Михайлович** – ассистент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander N. Egorov** – PhD (Technical Sciences), Senior Research Fellow at the Federal Research Center "Saratov Scientific Center" of the Russian Academy of Sciences. Leading Research Fellow at the Scientific and Educational Center "Energy Systems and Complexes", Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

**Daniil A. Makarov**– Assistant, Department of Thermal and Nuclear Energy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Daniil M. Anoshin**– Assistant, Department of Thermal and Nuclear Energy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 22.02.26, принята к опубликованию 12.03.26*

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.93'1:621.3:744.43

## ДВУХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ УСЛОВНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ И СПЕЦИФИКАЦИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИХ ЧЕРТЕЖАХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

**Р.Р. Ахметвалеев, Е.В. Гагарина, Д.К. Галлямов, Е.Г. Мешков,  
Д.М. Патраев, А.З. Муфтахов, Т.А. Валеев**

## A TWO-LEVEL MODEL FOR RECOGNIZING STANDARDIZED GRAPHICAL SYMBOLS OF ELECTRICAL COMPONENTS IN TECHNICAL DRAWINGS OF TRANSFORMER SUBSTATIONS

**R.R. Akhmetvaleev, E.V. Gagarina, D.K. Galliamov, E.G. Meshkov,  
D.M. Patraev, A.Z. Muftakhov, T.A. Valeev**

*В статье предложен двухуровневый метод автоматизированного анализа технических чертежей трансформаторных подстанций, основанный на параллельном применении моделей глубокого обучения архитектуры YOLOv11. Первый уровень предназначен для детекции условных графических обозначений электрических компонентов, второй – для локализации структурных зон чертежа, включая спецификации с целью их последующей обработки OCR-системами. Обучение моделей выполнено на двух специализированных наборах данных с использованием стратегии аугментации, имитирующей реальные дефекты сканирования. Экспериментальные результаты показывают рост метрики mAP<sub>50</sub> для распознавания электрических компонентов до 0,78 и достижение значения до 0,99 при детекции зон спецификаций. Предложенный подход обеспечивает высокую точность локализации как мелких схемотехнических символов, так и табличных данных, что создает основу для автоматизированного формирования цифровых двойников энергообъектов.*

*The paper presents a two-level method for automated analysis of technical drawings of transformer substations based on the parallel application of deep learning models using the YOLOv11 architecture. The first level is designed for detecting standardized graphical symbols of electrical components, while the second focuses on localizing structural zones of the drawings, including the specifications, for subsequent processing by OCR systems. The models were trained using two specialized datasets based on the augmentation strategy that simulates real scanning defects. Experimental results demonstrate an increase in the mAP<sub>50</sub> metric for electrical component recognition up to 0.78 and up to 0.99 for specification zone detection. The proposed approach ensures high localization accuracy for both small schematic symbols and tabular data, providing a foundation for the automated creation of digital twins of energy facilities.*

Ключевые слова: *трансформаторные подстанции, электрические схемы, YOLOv11, распознавание образов, техническая документация, аугментация данных, глубокое обучение, спецификации оборудования*

## 1. Введение

Эффективная цифровизация процессов проектирования и эксплуатации объектов электроэнергетики требует автоматического перевода бумажной и растровой документации в машиночитаемый формат. Существующие государственные стандарты [1-3] регламентируют начертание схем, однако реальная документация характеризуется высокой вариативностью.

Традиционные подходы к оцифровке электротехнического чертежа часто пытаются решить задачу, обрабатывая весь чертеж единым алгоритмом. Однако структура технического чертежа может быть разнообразной: он содержит графическую часть (схема соединений) и табличную часть (спецификации). Кроме того, разработчик чертежа использует собственные подходы к оформлению технической документации, что усложняет унификацию и автоматизацию процессов [4, 5]. Ручная обработка документации сопряжена с высокими временными затратами и риском ошибок интерпретации из-за отсутствия единых правил оформления.

Для эффективной оцифровки требуется разделение задачи на два потока:

*Схемотехнический анализ*: поиск и классификация условных графических обозначений (УГО) для восстановления топологии сети.

*Структурный анализ*: выделение областей с табличными данными (спецификации) для их изолированной обработки специализированными OCR-движками совмещенное с выделением крупных групп схемотехнических элементов.

В данной работе исследуется применимость архитектуры YOLOv11 [8] для решения обеих задач параллельно.

## 2. Методы и принципы исследования

### 2.1. Подготовка и структура данных

Исследование проводилось на выборке реальной документации. Предварительная

Keywords: *transformer substations, electrical schematics, YOLOv11, pattern recognition, technical documentation, data augmentation, deep learning, equipment specifications*

разметка данных произведена методом выделения прямоугольником (Bounding box) полных габаритов соответствующих секций или таблиц. Методология разметки основывается на положениях государственных стандартов, входящих в комплекс Единой системы конструкторской документации. Разметка данных выполнена итеративным методом с предварительным обучением модели YOLOv11 на небольшой части выборки и последующей верификацией ассессорами (метод «Human-in-the-loop» [6]), что ускорило процесс в 3-4 раза.

Для экспериментов были сформированы два независимых версионированных набора данных. Для обеспечения репрезентативности каждого набора данных использовалось случайное разделение (Random Split) в порциях:

Обучающая выборка (Train): 80 %

Валидационная выборка (Valid): 10 %

Тестовая выборка (Test): 10 %

#### 2.1.1. Набор данных

*«Электрические компоненты»*

Первый набор данных ориентирован на распознавание мелких объектов схемы. В соответствии с конфигурацией, выделено 20 классов, охватывающих основные типы оборудования и их вариации:

- измерительные приборы: А (амперметр), V (вольтметр), VA (варметр), Pi (счетчик);

- коммутация и защита: QF-SF (автоматы), FU (предохранители), FV (ОПН), КК (испытательные коробки);

- разъединители и выключатели нагрузки: QS (разъединитель), QW (выключатель), и их вариации с различными типами заземляющих ножей: ground-down (с нижними заземляющими ножами), ground-up (с верхними заземляющими ножами), ground-both (с верхними и нижними заземляющими ножами);

- силовое оборудование: Т (силовой трансформатор), ТА (трансформатор тока);

- прочее оборудование: EL (лампы), line (исходящие линии).

Набор данных сформирован на базе 493 файлов электрических схем трансформаторных подстанций. Общий объем аннотированных данных составляет 21 460 объектов, что говорит о высокой информационной плотности документов: в среднем на одном изображении присутствует 43,5 элемента. Лидером по частоте появления является класс автоматических выключателей (QF-SF), составляющий 18,82 % от общего числа меток (4 039 экз.) и присутствующий на 95,5 % чертежей. Совместно с трансформаторами тока (TA, 17,84 %) и графическими примитивами исходящих линий (14,30 %) эти три категории формируют более половины всей обучающей выборки (> 50 %). Ряд классов, несмотря на меньший абсолютный объем, является критически важным для структуры схем. Так, силовые трансформаторы (T) и предохранители (FU) встречаются в 93,7 и 92,7 % изображений соответственно, являясь обязательными атрибутами большинства узлов. Классы, описывающие вспомогательные элементы (VA) или уникальные конфигурации заземляющих ножей (например, QS-ground-up), представлены единичными экземплярами (менее 0,2 % выборки или < 30 объектов на всю выборку).

### 2.1.2. Набор данных

#### «Структурные группы и спецификации»

Второй набор данных разработан для решения задачи макроанализа структуры чертежа. В отличие от детекции электрических компонентов, целью данной модели является классификация типа распределительного устройства и локализация зон с табличными данными для их последующей передачи в модуль оптического распознавания символов (OCR).

Набор включает 4 класса макрообъектов, охватывающих основные конструктивные блоки подстанций и зоны метаданных:

- `specification_table` – класс, обозначающий границы таблиц спецификаций и экспликаций оборудования. Точная локализация этого объекта критически важна для автоматической экстракции текстовых атрибутов

(наименование, тип, количество оборудования), минуя графический шум схемы;

- KSO (КСО) – камеры сборные одностороннего обслуживания. Обозначает зоны чертежа, содержащие компоновку ячеек среднего напряжения;

- RUNN (РУНН) – распределительные устройства низкого напряжения. Класс используется для идентификации шкафов 0,4 кВ;

- RUVN (РУВН) – распределительные устройства высокого напряжения (вводные устройства 6-10 кВ и выше).

Набор данных «Структурные группы и спецификации», сформированный для детекции структурных блоков и габаритных элементов оборудования, включает 370 изображений. Общий объем разметки составляет 1 526 объектов. В отличие от задачи поиска компонентов, набор данных характеризуется низкой плотностью объектов на сцену – в среднем 1,5-7,5 элементов на изображение. Это обусловлено семантической классификацией объектов поиска являются крупные узлы и таблицы, занимающие значительную площадь чертежа.

Почти половину выборки (49,15 % или 750 объектов) составляют ячейки КСО (камеры сборные одностороннего обслуживания). Примечательна высокая плотность их размещения: данный класс присутствует только на 180 изображениях, что дает в среднем ~4,2 объекта на целевой кадр. Это отражает реальную топологию подстанций, где ячейки КСО устанавливаются секциями (рядами). Остальные категории (RUNN, RUVN, `specification_table`) распределены значительно равномернее. Их доля варьируется от 15 до 19 %.

Таким образом, несмотря на меньший по сравнению с первым набором данных объем, данная выборка является репрезентативной для задачи сегментации чертежей, покрывая типовые сценарии размещения оборудования (одиночное и групповое) и предоставляя необходимый объем фоновых данных.

Использование двух наборов позволяет реализовать иерархический подход к обработке документа: сначала определяется вид

группы элементов (КСО/РУНН/РУВН) и находится спецификация, а затем, запускаются алгоритмы OCR и детальной детекции компонентов.

**2.2. Стратегия аугментации**

Целью этапа базового обучения является установление базовой метрики производительности архитектур YOLOv11 (n/s/m/l) на «чистых» данных и проверка корректности разметки.

Для повышения надежности распознавания проводится дополнительный этап обучения с применением стратегии аугментации – синтетического увеличения объема обучающих данных путем применения стохастических преобразований [7]. В контек-

сте распознавания документации аугментация служит для эмуляции реальных дефектов сканирования и предотвращения эффекта переобучения на ограниченном наборе чертежей. Кроме этого, аугментация компенсирует смещение модели в сторону мажоритарных классов путем искусственного увеличения вариативности редких примеров.

Эксперименты реализованы с использованием фреймворка ultralytics, библиотеки глубокого обучения PyTorch и библиотеки albumentations для реализации стратегии аугментации.

Используемые преобразования и цели воздействия их применения приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры аугментации обучающей выборки

Аугментация	Цель воздействия
RandomRotate90	Инвариантность к ориентации чертежа
RandomBrightnessContrast	Компенсация перепадов контраста сканера
Rotate ( $\pm 5^\circ$ )	Имитация перекося подачи листа
GaussNoise	Шум матрицы сканера
RandomScale	Вариативность масштаба (A3/A4)
ImageCompression	Артефакты сжатия JPEG
Blur / MotionBlur	Расфокусировка оптики сканера
HueSaturationValue	Эффект «пожелтевшей бумаги»
Perspective	Искажения при сканировании под углом
OpticalDistortion	Линзовые искажения

**2.3. Обучение моделей для решения задач детекции**

Выбор архитектуры YOLOv11 [8] обусловлен внедрением усовершенствованного механизма извлечения признаков (C3k2 block), который обеспечивает более глубокую семантическую обработку изображений по сравнению с модулем C2f в версии v8. Для задачи анализа электрических схем, насыщенных мелкими и визуально схожими элементами, важным преимуществом 11-й версии стала интеграция улучшенных механизмов пространственного внимания (Spatial Attention). Это позволяет модели эффективнее фокусироваться на значимых деталях

условных обозначений, игнорируя графический шум линий связи, и демонстрировать лучший баланс между точностью и вычислительной эффективностью при обработке документов высокого разрешения.

Использовались четыре размерности модели YOLOv11: Nano (2,6 млн параметров), Small (9,4 млн), Medium (20,1 млн), Large (25,3 млн). Проведение экспериментов на линейке из четырех масштабных вариаций архитектуры позволяет эмпирически установить оптимальный баланс между метриками точности и временем отклика. Это необходимо для обоснованного выбора конфигурации

нейросети при её интеграции в автоматизированную систему заполнения опросных листов, где критичны как скорость обработки потока документов, так и достоверность извлекаемых данных.

Обучение и валидация моделей выполнялись на графическом процессоре NVIDIA с поддержкой архитектуры CUDA.

Учитывая специфику входных данных (высокая плотность линий, наличие мелких элементов), базовое разрешение входного тензора было установлено на уровне 1024×1024. Стандартное для YOLO разрешение 640×640 оказалось недостаточным для сохранения детализации ряда символов.

В качестве оптимизатора выбран адаптивный алгоритм AdamW. Прочие параметры обучения:

- Количество эпох: 500 (с механизмом Early Stopping, patience=50);
- Размер батча (Batch size): 32;
- Learning Rate (lr): 0.001 с косинусным затуханием (cos\_lr=True)%

#### 2.4. Оценка качества моделей

Для численной оценки качества обученных моделей использовались стандартные метрики задач обнаружения объектов:

- Precision – точность. Характеризует способность модели отличать истинные объекты от фона и не генерировать ложноположительных срабатываний (False Positives). Высокое значение означает, что большинство предсказанных рамок действительно содержат целевые элементы;

- Recall – полнота (чувствительность). Отражает способность модели находить целевые объекты, присутствующие на изображении, минимизируя пропуски (False Negatives). Метрика важна для задачи подсчета компонентов, где потеря даже одного элемента крайне нежелательна;

- mAP<sub>50</sub> – усредненная по всем классам точность (Mean Average Precision), рассчитанная при пороге перекрытия (IoU – Intersection over Union) ≥ 0,50. Является показателем стабильности распознавания факта наличия объекта, допуская незначительные отклонения границ рамки.

### 3. Основные результаты

В табл. 2 приведены метрики для набора данных «Электрические компоненты» с высокой плотностью мелких объектов.

Таблица 2 – Сравнительный анализ качества детекции элементов схем (набор данных «Электрические компоненты»)

Модель	Этап обучения	Precision	Recall	mAP <sub>50</sub>
YOLOv11-n	Baseline	0.627	0.698	0.680
	Augmented	0.784	0.804	0.781
YOLOv11-s	Baseline	0.700	0.796	0.725
	Augmented	0.790	0.772	0.734
YOLOv11-m	Baseline	0.716	0.674	0.730
	Augmented	0.768	0.792	0.775
YOLOv11-l	Baseline	0.735	0.697	0.712
	Augmented	0.735	0.851	0.776

В задаче детекции компонентов аугментация позволила моделям преодолеть барьер по метрикам качества, заложенный базовой моделью. Наиболее показателен рост по полноте у архитектуры YOLOv11-l.

Это означает, что модель научилась находить зашумленные и перекрытые элементы, которые игнорировались в базовом сценарии, существенно опередив более легкие версии.

В табл. 3 представлены результаты для набора данных «Структурные группы и спецификации» макрообъектов крупного масштаба (группы элементов и спецификации).

Модель YOLOv11-n продемонстрировала исключительно высокую точность, фак-

тически сравнявшись с тяжелыми архитектурами. Это объясняется низкой семантической сложностью макрообъектов, для описания которых избыточная емкость сети приводит к переобучению или зашумлению градиентов.

Таблица 3 – Сравнительный анализ качества детекции элементов схем (набор данных «Структурные группы и спецификации»)

Модель	Этап обучения	Precision	Recall	mAP <sub>50</sub>
YOLOv11-n	Baseline	0.940	0.932	0.970
	Augmented	0.989	0.977	0.987
YOLOv11-s	Baseline	0.937	0.915	0.965
	Augmented	0.985	0.961	0.984
YOLOv11-m	Baseline	0.939	0.933	0.965
	Augmented	0.988	0.976	0.988
YOLOv11-l	Baseline	0.938	0.931	0.958
	Augmented	0.974	0.979	0.991

По результатам сравнительного анализа качества детекции электрических компонентов и анализа структурных групп и спецификаций для интеграции в бизнес-процесс автоматического заполнения опросных листов принята архитектура, в соответствии с которой, сначала поступающий чертеж обрабатывается первичным фильтром на основе модели YOLOv11-n, а затем, на частях чертежа, содержащих электрические схемы осуществляется глубокий анализ на основе модели YOLOv11-l для детального распознавания электрических компонентов.

Рис. 1 иллюстрирует результаты работы модели, обученной на наборе данных «Структурные группы и спецификации». Исходное изображение характеризуется типичной для отрасли сложностью: наличием смешанной структуры (графика и таблица), высокой плотностью элементов в цепях учета и защиты, а также вариативностью начертания линий связи. Модель успешно сегментировала чертеж на функциональные блоки: выделена область высоковольтного оборудования (классы

РУВН и КСО), обнаружено распределительное устройство низкого напряжения (РУНН), таблица спецификации.

Идеальное совпадение предсказанной рамки (синий контур) с границами таблицы позволяет передать этот фрагмент изображения в OCR-модуль без захвата посторонних графических элементов схемы, что минимизирует ошибки распознавания текста.

Рис. 2 иллюстрирует результаты работы модели, обученной на наборе данных «Электрические компоненты» по тому же исходному изображению, что и на рис. 1. Модель корректно разделила плотную группу трансформаторов тока (ТА) и счетчиков в цепи измерения, несмотря на взаимное перекрытие символов. Успешно разграничены визуально схожие, но функционально различные элементы, такие как автоматические выключатели (QF-SF) и разъединители (QS). Детектированы графические примитивы исходящих линий (lines), что критически важно для восстановления связности графа электрической цепи.

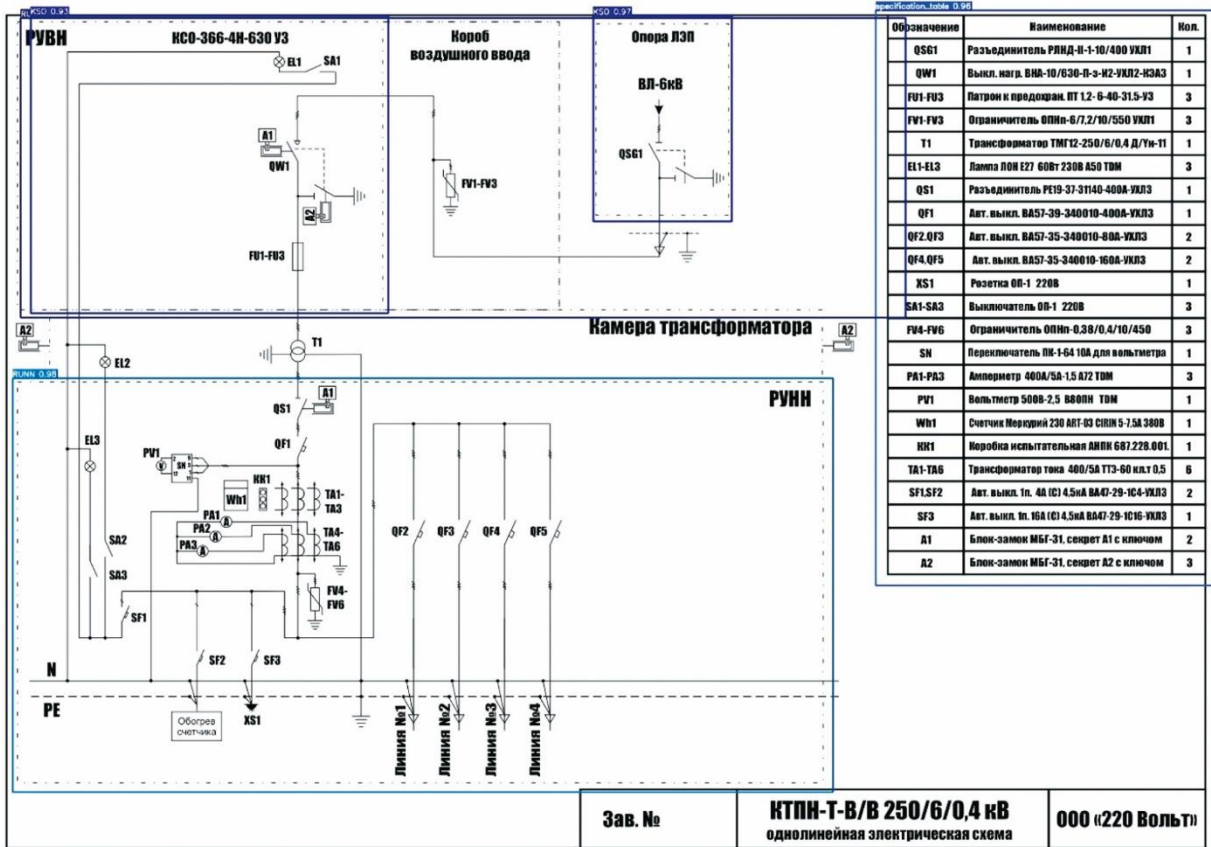


Рисунок 1 – Пример работы модели для обнаружения макрообъектов

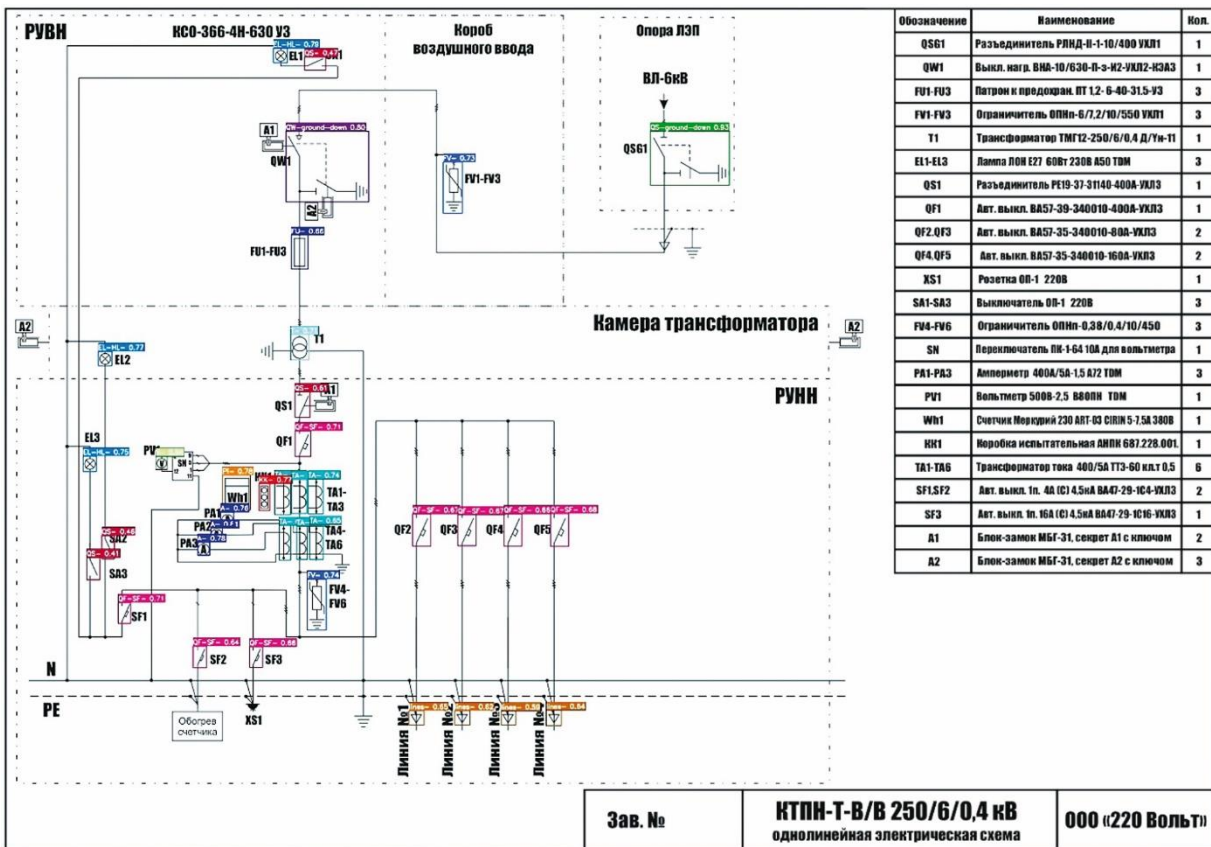


Рис. 2. Пример работы модели для обнаружения электрических компонентов

#### **4. Обсуждение**

В отличие от существующих подходов к распознаванию схем [9-11] предложенный метод разделяет задачу на два параллельных потока анализа. Работа [9] демонстрирует детекцию символов и текста на диаграммах технологических трубопроводов и КИПиА (P&ID) с высокой плотностью элементов с использованием глубоких моделей, однако не использует специализированные модели для различных масштабов объектов. В работе [10] предложен подход к распознаванию символов на инженерных чертежах с использованием самообучения и легенд схем, однако метод требует наличия легенды на чертеже для эффективной работы. В [11] представлен практический подход к распознаванию однолинейных схем электрических систем на основе цифровой обработки изображений и глубоких моделей, ориентированный преимущественно на однолинейные диаграммы. Наш метод сочетает детекцию макрообъектов и микроэлементов, применяя специализированные модели для каждой задачи, что позволяет достичь более высокой точности локализации и снижает вероятность ошибок, создавая основу для надежного формирования цифровых двойников энергообъектов.

#### **5. Заключение**

Использование легкой модели YOLOv11-n для первичного макроанализа позволило быстро и точно выделять крупные объекты и зоны спецификаций ( $mAP_{50} = 0,987$ ), решая тем самым задачу структурной сегментации чертежа. Для де-

текции мелких и плотных схемотехнических символов применялась более емкая архитектура YOLOv11-l, что вместе с аугментацией данных позволило достичь  $mAP_{50} = 0,78$ , значительно повысив полноту распознавания за счет обнаружения зашумленных и перекрытых элементов. Таким образом, эксперименты подтвердили целесообразность использования легкой модели для первичного анализа и более емкой архитектуры для детального извлечения номенклатуры оборудования, что показывает эффективность предложенного двухуровневого подхода.

Кроме этого, в работе продемонстрировано, что применение стратегии аугментации существенно повышает полноту и устойчивость распознавания в условиях зашумленных и искаженных изображений.

Полученные результаты создают предпосылки для перехода к автоматическому восстановлению топологии электрических сетей в рамках формирования цифровых двойников энергообъектов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда «Сколково» (договор от 31.07.2023 № 30601/0004-2023) в ходе реализации пилотного проекта «Внедрение самообучающейся интеллектуальной системы управления производством уникальной несерийной электротехнической продукции класса СППР» в рамках федерального проекта «Искусственный интеллект» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (Постановление Правительства РФ от 21.05.2021 № 767).*

#### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- ГОСТ 2.702-2011. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения электрических схем. Москва: Стандартинформ, 2012.
- ГОСТ 2.721-74. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения. Москва: Издательство стандартов, 1974.

- ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. Москва: Издательство стандартов, 1981.
- Jamieson L., Francisco Moreno-García C., Elyan E.** A review of deep learning methods for digitisation of complex documents and engineering diagrams // Artif Intell

Rev. 2024. Vol. 57. P. 136.  
<https://doi.org/10.1007/s10462-024-10779-2>.

5. **Elyan E., Jamieson L., Ali-Gombe A.** Deep learning for symbols detection and classification in engineering drawings // *Neural Networks*. 2020. Vol. 129. P. 91-102. ISSN 0893-6080. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.05.025>.

6. **Holzinger A.** Interactive Machine Learning (iML) // *Informatik-Spektrum*. 2016. Vol. 39. <https://doi.org/10.1007/s00287-015-0941-6>.

7. **Shorten C., Khoshgoftaar T.** A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning // *Journal of Big Data*. 2019. Vol. 6. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>.

8. **Khanam R., Hussain M.** YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725>.

9. Deep-learning-based recognition of symbols and texts at an industrially applicable

level from images of high-density piping and instrumentation diagrams / H. Kim, W. Lee, M. Kim et al. // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 183. P. 115337. ISSN 0957-4174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115337>.

10. Legend-Informed Symbol Recognition in Engineering Diagrams with Self-supervised Learning / A. Hain, S. Götzhäuser, N. Réhault et al. // *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Research Track and Applied Data Science Track. ECML PKDD 2025. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 16020. Springer, Berlin, Heidelberg, 2026. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-72243-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-662-72243-5_23).

11. Practical single-line diagram recognition based on digital image processing and deep vision models / L. Yang, J. Wang, J. Zhang et al. // *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 238. Part F. P. 122389. ISSN 0957-4174. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122389>.

**Ахметвалеев Руслан Ринатович** – старший преподаватель кафедры «Цифровые Технологии и Моделирование», сотрудник Научно-исследовательская лаборатории «Межвузовский центр искусственного интеллекта», «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

**Гагарина Елена Владимировна** – генеральный директор, ООО НПП «220Вольт», г. Нефтекамск, Республика Башкортостан

**Галлямов Денис Курбангалеевич** – руководитель производственно-технического отдела, ООО НПП «220 Вольт», г. Нефтекамск, Республика Башкортостан

**Мешков Егор Григорьевич** – директор по развитию, ООО «Лексема», г. Уфа

**Валеев Тимур Артурович** – техник Научно-исследовательской лаборатории «Межвузовский центр искусственного интеллекта», Уфимский государственный нефтяной технический университет

**Муфтахов Артур Зинурович** – техник Научно-исследовательской лаборатории

**Ruslan R. Akhmetvaleev** – Senior Lecturer, Department of Digital Technologies and Modeling, Research Fellow at the Interuniversity Center for Artificial Intelligence Research Laboratory, Ufa State Petroleum Technological University

**Elena V. Gagarina** – Director General, 220Volt LLC, Neftekamsk, Republic of Bashkortostan

**Denis K. Gallyamov** – Head of the Production and Technical Division, 220 Volt LLC Neftekamsk, Republic of Bashkortostan

**Egor G. Meshkov** – Development Director, Lexema LLC, Ufa

**Timur A. Valeev** – Technician at the Research Laboratory of the Interuniversity Center for Artificial Intelligence, Ufa State Petroleum Technological University

**Artur Z. Muftakhov** – Technician at the Research Laboratory of the Interuniversity Center

«Межвузовский центр искусственного интеллекта», Уфимский государственный нефтяной технический университет

**Патраев Денис Михайлович** – техник Научно-исследовательской лаборатории «Межвузовский центр искусственного интеллекта», Уфимский государственный нефтяной технический университет

for Artificial Intelligence, Ufa State Petroleum Technological University

**Denis M. Patraev** – Technician at the Research Laboratory of the Interuniversity Center for Artificial Intelligence, Ufa State Petroleum Technological University

*Статья поступила в редакцию 26.01.26, принята к опубликованию 12.03.26*

УДК 621.396.6:621.314

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ С РЕКУПЕРАТИВНЫМ ЭФФЕКТОМ

Л.Г. Блинникова

## INFORMATION AND CONTROL SYSTEM DAMPING OF OSCILLATIONS IN AN ELECTROMAGNETIC SUSPENSION WITH RECUPERATIVE EFFECT

L.G. Blinnikova

Предлагается информационно-управляющая система демпфирования колебаний электромагнитной подвески. Электромагнитные системы демпфирования позволяют осуществлять рекуперацию энергии и активное гашение колебаний, но их недостатком является отсутствие эффективных электронных управляющих систем. Целью работы является теоретическое обоснование и экспериментальное исследование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний. Принцип действия электромагнитного амортизатора основан на появлении ЭДС индукции в катушке индуктивности, расположенной по оси движения штока амортизатора, имеющего постоянный магнит. Силу сопротивления амортизатора можно изменять, регулируя силу отдаваемого им в нагрузку электрического тока с помощью импульсных преобразователей параметров электрической энергии на основе широтно-импульсной модуляции. В ходе эксперимента подтвердилась работоспособность информационно-управляющей системы, реализованной на микроконтроллере и микросхемах корректора коэффициента мощности, и ее способность осуществлять рекуперацию энергии.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, демпфирование колебаний, электромагнитный амортизатор, ЭДС индукции, широтно-импульсная модуляция, рекуперация энергии

An information and control system for damping the oscillations of an electromagnetic suspension is proposed. Electromagnetic damping systems allow for energy recovery and active damping of oscillations though they lack effective electronic control systems. The aim is to provide a theoretical basis and experimental study of an information and control system for damping oscillations. The principle of operation of an electromagnetic shock absorber is based on the appearance of an induced electromotive force in an inductor coil located along the movement axis of the shock absorber rod, which has a permanent magnet. The resistance force of the shock absorber can be changed by adjusting the force of the electric current which it delivers to the load using pulse-width modulation-based pulse converters of electrical energy parameters. During the experiment, the functionality of the information and control system implemented by means of the microcontroller and power factor corrector chips, including its ability to recover energy were confirmed.

Keywords: information and control system, vibration damping, electromagnetic shock absorber, EMF induction, pulse-width modulation, energy recovery

### Введение

Развитие промышленности и экономики Российской Федерации в современных условиях невозможно без активного применения информационно-управляющих систем.

В сложившихся политических и экономических реалиях внедрение инновационных технологий необходимо для успешного развития любой отрасли промышленности. Новой тенденцией в автомобилестроении является разработка автоматизированных систем подвески, важным элементом которой служит амортизатор. Производители уверены, что дальнейшее совершенствование амортизаторов транспортных средств подразумевает повсеместное применение электронных технологий и новые решения в конструкции самих демпферов.

В последние годы у нас в стране и за рубежом активно разрабатываются электромагнитные рекуперативные амортизаторы и подвесные системы, преобразующие энергию механических колебаний в электрическую энергию: электромагнитная подвеска A. Bose, рекуперативная подвеска GenShock от Levant Power Corporation, амортизаторы Посметьева В.И., Михановича В.В., Zuo L., Goldner R. и др. [1-3].

В электромагнитных системах демпфирования изменение характеристик демпфирующего элемента достигается за счет изменений свойств магнитного поля. При движении катушки индуктивности в магнитном поле в ней возникает электрический ток, который затем можно использовать, например, для подзарядки аккумуляторной батареи.

Однако в настоящее время подобные разработки не получили практического применения и внедрения в основном из-за сложности и высокой стоимости конструкции, а также отсутствия эффективных электронных управляющих систем.

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование и экспериментальное исследование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний электромагнитной подвески с рекуперативным эффектом.

### Теоретическое обоснование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний электромагнитной подвески

Принцип действия электромагнитного амортизатора основан на появлении ЭДС индукции в катушке индуктивности, намотанной на каркасе, расположенном по оси движения поршня амортизатора, имеющего постоянный магнит [4]. Величина ЭДС  $\varepsilon$ , В определяется скоростью перемещения поршня:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = k_1 v_n, \quad (1)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  $k_1$  – коэффициент пропорциональности;  $v_n$  – скорость движения поршня амортизатора, м/с.

Из сравнения выражений для электрической мощности  $P$ , Вт:  $P = \varepsilon I = k_1 v_n I$  и механической мощности:  $P = F_c v_n$ , следует, что сила сопротивления амортизатора  $F_c$ , Н пропорциональна силе тока [5]:

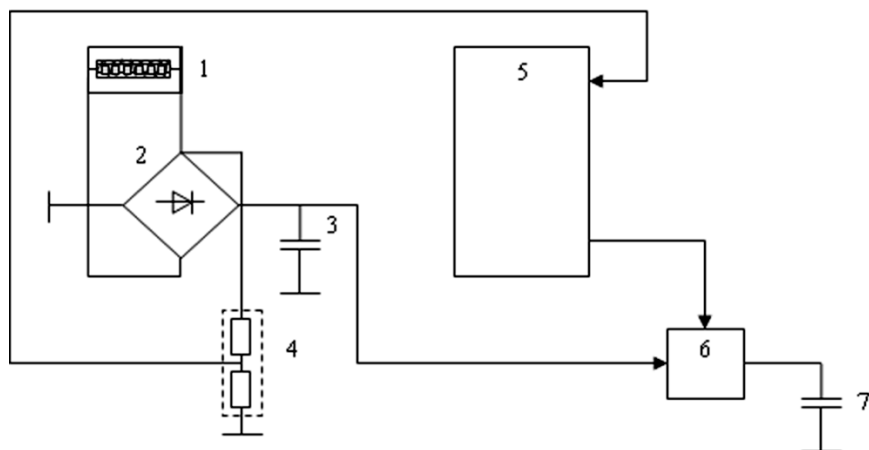
$$F_c \sim k_2 I, \quad (2)$$

где  $k_2$  – коэффициент пропорциональности,  $I$  – сила отдаваемого амортизатором в нагрузку электрического тока, А.

Таким образом, силу сопротивления амортизатора можно изменять, регулируя силу отдаваемого им в нагрузку электрического тока с помощью информационно-управляющей системы с использованием импульсных преобразователей параметров электрической энергии на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [6].

Предлагаемая информационно-управляющая система может быть реализована на микроконтроллере, например, Atmega8, и микросхемах корректора коэффициента мощности (ККМ).

Функциональная электрическая схема информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески показана на рис. 1 и более подробно описана в работе [7].



**Рис. 1.** Функциональная схема информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески: 1 – электромагнитный амортизатор; 2 – диодный мост; 3 – конденсатор; 4 – делитель напряжения; 5 – микроконтроллер; 6 – блок отбора мощности; 7 – накопительный конденсатор

Электромагнитный амортизатор 1 вырабатывает ЭДС, величина которой определяется магнитным полем постоянного магнита и скоростью движения штока, а ее знак – направлением движения. Напряжение выпрямляется диодным мостом 2 и заряжает фильтрующий конденсатор 3. С делителя 4 напряжение поступает на один из входов микроконтроллера 5, выход которого управляет блоком отбора мощности 6. Мощный силовой ключ на время импульса открывается и через него течет ток, заряжая накопительный конденсатор 7. При изменении коэффициента заполнения ШИМ-сигнала изменяется время открытого состояния силового ключа, входящего в блок 6, что позволяет получить изменяющуюся силу сопротивления амортизатора.

#### **Экспериментальное исследование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний**

Для правильной работы электромагнитного амортизатора необходимо, чтобы устройство, отбирающее энергию от магнитной системы амортизатора, представляло собой активную нагрузку, сопротивление которой должно изменяться таким образом, чтобы соответствовать механическим характеристикам типового амортизатора.

В связи с этим устройство отбора энергии может представлять собой совокупность ККМ и повышающего импульсного блока

питания, напряжение которого может использоваться для зарядки аккумуляторной батареи (АКБ) или рассеивания тепла в окружающее пространство, если батарея заряжена.

В разработанной информационно-управляющей системе используется микросхема L6562 в силу ее широкой доступности, наличия большого количества аналогов (IN6562, производство «Интеграл», Беларусь) и низкой стоимости.

Микросхема позволяет строить на ее базе интегрированный блок питания с одним переключающим элементом и трансформатором. В блоке одновременно реализуются контроль коэффициента мощности и обратно-ходовой импульсный преобразователь питания с ШИМ.

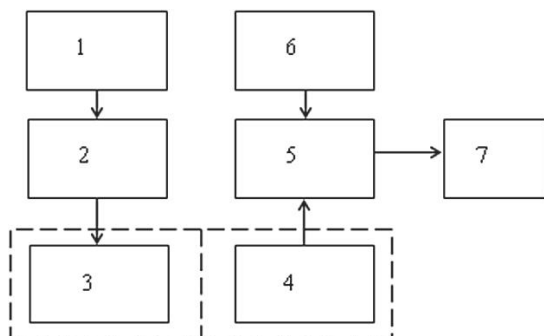
Особенностью этого блока питания является то, что коэффициент заполнения ШИМ-сигнала меняется в зависимости от нагрузки, и используется контроль перехода через ноль тока в первичной обмотке трансформатора для переключения ключевого элемента. В этом случае нагрузка на транзистор минимальна, и надежность работы устройства выше.

Функциональная схема и внешний вид экспериментальной установки для исследования работы информационно-управляющей системы демпфирования колебаний электромагнитной подвески на элементах с высокой степенью интеграции показаны на рис. 2.

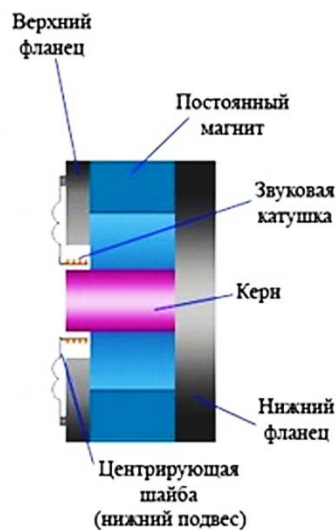
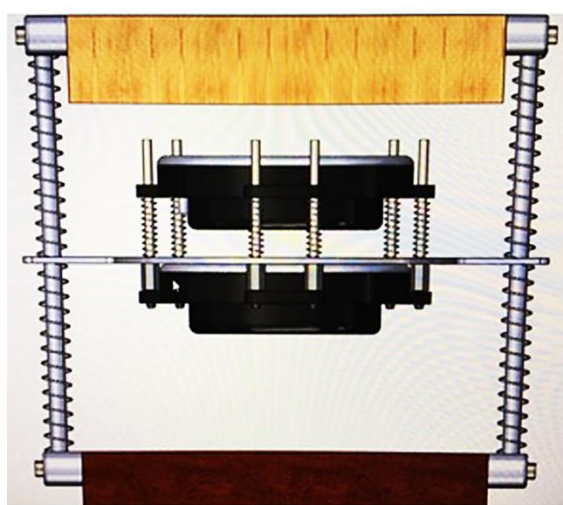
Функциональный генератор сигналов 1 позволяет генерировать сложные сигналы.

Усиленный стереоусилителем 2 сигнал подается на вибромодуль 3, поверхность которого начинает колебаться синхронно с поданным сигналом.

Вибромодуль 3, представляющий собой замкнутую магнитную систему со звуковой катушкой (рис. 3), механически соединен с точно таким же вибромодулем 4, который осуществляет обратное преобразование механической вибрации в электромагнитный сигнал, имитируя работу амортизатора.



**Рис. 2.** Экспериментальная установка для исследования работы информационно-управляющей системы демпфирования колебаний электромагнитной подвески:  
 1 – функциональный генератор сигналов; 2 – усилитель; 3, 4 – вибромодули;  
 5 – информационно-управляющая система; 6 – блок питания; 7 – аккумуляторная батарея



**Рис. 3.** Вибромодули

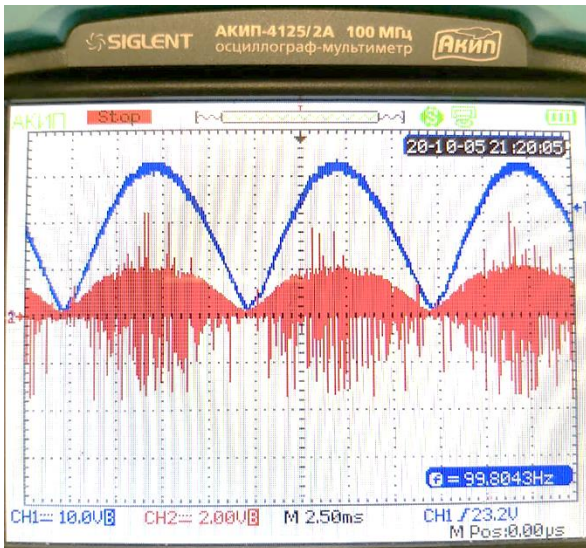
Информационно-управляющая система демпфирования колебаний 5 осуществляет оптимальный отбор энергии от электромагнитного амортизатора, благодаря чему колебания будут затухающими с необходимой скоростью.

Блок питания 6 обеспечивает информационно-управляющую систему постоянным напряжением.

С целью проверки работоспособности информационно-управляющей системы на вибромодуль 3 подавался синусоидальный

сигнал частотой 50 Гц. Одна из осциллограмм, полученных в результате эксперимента, показана на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что форма тока (нижний сигнал красного цвета) пропорциональна напряжению (верхний сигнал синего цвета), т.е. нагрузка для амортизатора квази-активная, она имитирует обычное сопротивление, значение которого и будет определять амортизаторную характеристику («номинал» этого резистора регулирует микросхема, подключаемая к микропроцессору).



**Рис. 4.** Осциллограмма, полученная при работе информационно-управляющей системы демпфирования колебаний

Осциллограмма показывает, что разработанная информационно-управляющая система 5 позволяет отбирать энергию колебаний оптимальным образом, т. е. коммутация силового ключа происходит в моменты времени, когда переключаемый ток равен нулю.

При сопротивлении нагрузки  $R_{н} = 0,11 \text{ Ом}$  и напряжении  $U = 2 \text{ В}$  (рис. 4) действующее значение силы тока  $I$ , А:

$$I = \frac{U}{R\sqrt{2}} \approx \frac{2}{0,11\sqrt{2}} \approx 12,9. \quad (3)$$

Действующее значение напряжения  $U$ , В рассчитывается при  $U_m = 30 \text{ В}$ :

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx \frac{30}{\sqrt{2}} \approx 21,3. \quad (4)$$

Следовательно, отбираемая от механической системы мощность  $P$ , Вт:

$$P = U \cdot I \approx 21,3 \cdot 12,9 \approx 275. \quad (5)$$

Этой мощности достаточно для заряда типовой АКБ.

Следует отметить, что отбираемая электрическая мощность зависит от режима движения транспортного средства и определяется необходимостью получения амортизаторной характеристики.

Таким образом, предложенная информационно-управляющая система демпфирования колебаний электромагнитной подвески позволяет осуществлять рекупера-

цию энергии, тем самым снижая нагрузку на генератор и двигатель транспортного средства. Преобразованная системой энергия может быть использована для подзарядки аккумуляторной батареи, для питания радиоэлектронной аппаратуры и т. д.

Рекуперация особенно важна в случае транспортных средств на электрической тяге, которым присущ дефицит электроэнергии, например, электромобилей, а также при разработке активных систем гашения колебаний радиоэлектронной аппаратуры.

Функциональный генератор сигналов 1 позволяет генерировать сложные сигналы, сформированные поточечно из программы MATLAB/Simulink, которые имитируют микропрофиль дороги. Моделирование работы системы управления рекуперативным магнитным амортизатором в системе Simulink с учетом случайного микропрофиля дорожного покрытия более подробно описано в работах [5, 8].

Микропрофиль дороги представляется в виде стационарного эргодического случайного процесса с корреляционной функцией вида [9]:

$$R(x) = \sigma^2 \left( A_1 e^{-\alpha_1 |x|} + A_2 e^{-\alpha_2 |x|} \cos \beta x \right), \quad (6)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия высот микронеровностей,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha_1, \alpha_2, \beta$  – параметры,  $\text{м}^{-1}$ ;  $A_1, A_2$  – весовые коэффициенты, причем  $A_1 + A_2 = 1$ .

В модели используется авторегрессионный (АР) фильтр. АР-модель описывается разностным уравнением вида [10]:

$$y(n) = e(n) - \sum_{k=1}^{M-1} a_k y(n-k), \quad (7)$$

где  $a_k$  – коэффициенты авторегрессии;  $(M-1)$  – порядок АР-модели;  $e(n)$  – входной сигнал, в качестве которого используется белый шум;  $y(n)$  – выходной сигнал – моделируемая случайная последовательность.

Коэффициенты авторегрессии находятся из системы уравнений Юла – Уолкера с корреляционной матрицей Теплица [10, 11].

Результаты эксперимента соответствуют результатам моделирования работы электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний электромагнитной подвески в среде Simulink и ранее представлены в работе [5].

**Выводы**

Приведено теоретическое обоснование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний электромагнитной подвески с рекуперативным эффектом. Принцип построения данной системы основан на преобразовании энергии механических колебаний в электрическую энергию с возможностью ее последующего использования, например, для заряда АКБ.

Проведено экспериментальное исследование, подтвердившее работоспособность

электронной системы управления рекуперативным амортизатором и ее способность осуществлять рекуперацию энергии. Отбираемая электрическая мощность составила порядка 275 Вт.

Предлагаемая информационно-управляющая система демпфирования колебаний может быть использована при разработке и создании систем гашения колебаний транспортных средств, аппаратуры, приборов, устройств и оборудования как промышленного, так и военного назначения.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. **Блинникова Л.Г., Гармаш Ю.В.** Обзор энергоэффективных подвесок и магнитных амортизаторов транспортных средств // Студенческий научный поиск – наука и образованию XXI века: материалы XII Междунар. студ. науч.-практ. конф. 24 апреля 2020 г., СТУ, Рязань, 2020. С. 4-7.

2. A Review on Energy-Regenerative Suspension Systems for Vehicles / J.Q. Zhang, Z.Z. Peng, L. Zhang, Y. Zhang // Proceedings of the World Congress on Engineering 2013. Vol III. Pp. 1889-1892.

3. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions / L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, Y. Zhou // Smart Materials and Structures. 2010. № 19. P. 1-10.

4. Патент РФ на полезную модель 162488. Устройство магнитного амортизатора-генератора / В.И. Сарбаев, Ю.В. Гармаш, Л.Г. Блинникова, Ю.В. Усачев. 10.06.2016.

5. **Гармаш Ю.В., Блинникова Л.Г., Сарбаев В.И.** Адаптивная информационно-управляющая система демпфирования ко-

лебаний // Вопросы электротехнологии. 2025. № 1 (46). С. 56-65.

6. **Слепов Н.Н.** Широотно-импульсная модуляция. Москва: Энергия, 1978. 191 с.

7. **Сарбаев В.И., Гармаш Ю.В., Блинникова Л.Г.** Электронно-регулируемый амортизатор // Электротехника. 2019. № 4. С. 63-66.

8. **Гармаш Ю.В., Блинникова Л.Г.** Моделирование работы устройства управления рекуперативным магнитным амортизатором в системе Simulink с учетом случайного микропрофиля дорожного покрытия // Научный резерв. 2024. № 2 (26). С. 8-14.

9. **Певзнер Я.М., Тихонов А.А., Певзнер Я.М.** Исследование статистических свойств микропрофиля основных типов автомобильных дорог // Автомобильная промышленность. 1964. № 1. С. 15-19.

10. **Марпл-мл. С.Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва: Мир, 1990. 265 с.

11. Цифровая обработка сигналов и MATLAB / А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2013. 512 с.

---

**Блинникова Лариса Геннадьевна** – старший преподаватель кафедры математических и естественнонаучных дисциплин Рязанского гвардейского высшего воздушно-десантного командного училища Министерства обороны РФ

**Larisa G. Blinnikova** – Senior Lecturer, Department of Mathematics and Natural Sciences, Ryazan Guards Higher Airborne Command School of the Ministry of Defense of the Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 11.02.26, принята к опубликованию 12.03.26*

## 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 объём рукописи (включая иллюстрации и таблицы) – не более 10 страниц.
- Указанное ограничение объёма 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 20.03.2026      Дата выхода в свет 31.03.2026

Формат 60×84 1/8    Бум. офсет.

Усл. печ. л. 13,0    Уч. изд. л. 6,0

Тираж 500 экз.      Заказ 7      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 1-е полугодие 2026 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: 20.03.2026      Date of publication: 31.03.2026

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

Conventional printed sheet 13,0      Publication base sheet 6,0

Circulation: 500 printed copies.    Order 7      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*

