

# ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

г. Орёл, 15 – 16 ноября 2023 г.



## ENERGY AND RESOURCES SAVING XXI CENTURY

Oryol, 15th – 16th November 2023

Орёл 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ПРАВИТЕЛЬСТВО ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ  
АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ  
ФИЛИАЛ ПАО «РОССЕТИ ЦЕНТР» – «ОРЁЛЭНЕРГО»  
АО «ОРЁЛОБЛЭНЕРГО»  
ООО «ОРЛОВСКИЙ ЭНЕРГОСБЫТ»  
ЦЕНТР ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ НАУКИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
НАН РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
ФГБОУ ВО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И.С. ТУРГЕНЕВА»  
КАФЕДРА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ»

## **ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК**

**Материалы  
XXI международной  
научно-практической конференции  
г. Орёл, 15 – 16 ноября 2023 г.**

под редакцией д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова,  
д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова

Орёл  
ОГУ имени И.С. Тургенева  
2023

УДК 620.92 (063)  
ББК 31.15Я 431  
Э65

Э65            **Энерго- и ресурсосбережение – XXI век:** материалы XXI международной научно-практической конференции (г. Орёл, 15 – 16 ноября 2023 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ОГУ имени И.С. Тургенева; редкол.: д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 122 с. : ил. –ISBN 978-5-9708-1124-5. – Текст : непосредственный.

В материалы XXI международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» включены труды ученых и специалистов России, стран ближнего и дальнего зарубежья. Материалы, представленные участниками, с учётом выбранного ими научного направления были размещены на сайте конференции <http://myconfs.ru/energoser2023>, которая проводилась в очном и дистанционном формате на базе кафедры электрооборудования и энергосбережения ОГУ имени И.С. Тургенева в период с 15 по 16 ноября 2023 года.

Работа конференции была организована по следующим секциям:

1. Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении, металлургии и других отраслях экономики.
2. Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их развития.
3. Энерго- и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе.
4. Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении.

Материалы конференции могут быть полезны учёным и специалистам, работающим в области энергетики и электротехники, занимающимися вопросами автоматизации и управления технологическими процессами и производствами. Они также могут быть полезны студентам, соискателям учёных степеней и инженерно-техническим работникам, занимающимся теоретическими и практическими исследованиями в области энерго- и ресурсосбережения в различных отраслях экономики.

УДК 620.92 (063)  
ББК 31.15Я 431

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

1. Федотов Александр Анатольевич – канд. экон. наук, доцент, PhD, председатель организационного комитета, ректор ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Почетный работник сферы образования Российской Федерации.
2. Чернышов Вадим Алексеевич – заместитель председателя организационного комитета, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».
3. Голенков Вячеслав Александрович – д-р. техн. наук, профессор, лауреат Государственных премий Российской Федерации, руководитель научной школы ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».
4. Бутырин Павел Анфимович – член-корреспондент РАН, академик АЭН Российской Федерации, президент АЭН Российской Федерации, лауреат премии имени П. Н. Яблочкова.
5. Кувалдин Александр Борисович – Заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик АЭН Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».
6. Никольский Олег Константинович – Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод» ФГБОУ ВО «АлтГТУ имени И.И. Ползунова», г. Барнаул.
7. Подмастерьев Константин Валентинович – Заслуженный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, директор Института приборостроения, автоматизации и информационных технологий, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева».
8. Рыжкова Елена Николаевна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».
9. Злобин Николай Васильевич – генеральный директор АО «Орёлоблэнерго», г. Орёл.
10. Колубанов Игорь Васильевич – и.о. заместителя генерального директора – директор филиала ПАО «Россети – Центр» - «Орёлэнерго».
11. Юрьев Юрий Николаевич – генеральный директор ООО «Орёлэнергообит», г. Орёл.
12. Королева Татьяна Геннадьевна – технический секретарь организационного комитета, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

1. Качанов Александр Николаевич – председатель программного комитета, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, академик АЭН Российской Федерации, заведующий кафедрой «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».
2. Степанов Юрий Сергеевич – заместитель председателя программного комитета, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, лауреат премий Президента и Правительства Российской Федерации, ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».
3. Демидович Виктор Болеславович – д-р. техн. наук, профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники ФГБОУ ВО «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова», академик-секретарь научно-отраслевого отделения № 6 АЭН Российской Федерации.
4. Любимов Виктор Васильевич – Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, член-корр. РАЕН, заведующий кафедрой «Физико-химические процессы и технологии» ФГБОУ ВО ТулГТУ.
5. Петров Георгий Николаевич – д-р. техн. наук, Заслуженный деятель науки Таджикистана, академик международной Энергетической Академии, ведущий специалист Центра инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана.
6. Хейфиц Михаил Львович - д-р. техн. наук, профессор, заместитель академика – секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Белоруссии.
7. Li Qingling (Китай) - Prof., Dipl.-Ing., Qingdao University of Chemical Technology, Department of Mechanical Engineering.
8. Коренков Дмитрий Андреевич – технический секретарь программного комитета, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».

## ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

1. Радченко Сергей Юрьевич – председатель комитета, д-р.техн. наук., профессор, Почетный работник ВПО Российской Федерации, проректор по научно-технологической деятельности и аттестации научных кадров ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».

2. Дудина Елена Федоровна – заместитель председателя технического комитета, канд. филол. наук, начальник отдела организации научных мероприятий и академического развития ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»;

3. Александрова Анжелика Паруйровна – канд. филол. наук, доцент, начальник отдела бюро переводов ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»;

4. Воробьев Сергей Александрович – начальник отдела организационного сопровождения НИР, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры городского хозяйства и строительства автомобильных дорог;

5. Лунев Роман Алексеевич – секретарь технического комитета, канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».

## НАУЧНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

1. Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении, металлургии и других отраслях экономики.

2. Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их развития.

3. Энерго- и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе.

4. Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении.

---

## ORGANIZING COMMITTEE

1. Fedotov Alexander Anatolievich - Chairman of the Organizing Committee, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, PhD, Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Orel State University named after I.S. Turgenev, Honorary Worker of Education of the Russian Federation.

2. Chernyshov Vadim Alekseevich - Vice-Chairman of the Organizing Committee, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Equipment and Energy Saving, Orel State University n.a. I.S. Turgenev.

3. Golenkov Vyacheslav Alexandrovich - Doctor of Engineering Sciences, Professor, State Prize Laureate in Science and Engineering of the RF, Head of the Research School at the Orel State University n.a. I.S. Turgenev.

4. Butyrin Pavel Anfimovich - Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, President of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, laureate of the P.N. Yablochkov Prize.

5. Kuvaldin Alexander Borisovich - Honored Master of Sciences of Russia, Academician of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies, National Research University "MEI" (Moscow Power Institute).

6. Nikolski Oleg Konstantinovich – Honored Master of Sciences of Russia, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drive, Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov, Barnaul.

7. Podmasterev Konstantin Valentinovich - Served employee of higher professional education of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Instrument Engineering, Automation and Information Technologies, Orel State University n.a. I.S. Turgenev.

8. Ryzhkova Elena Nikolajevna - Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrical Technologies, National Research University "MEI" (Moscow Power Institute)

9. Zlobin Nikolai Vasilevich – General Director of JSC «Oreoblenergo», Orel.

10. Kolubanov Igor Vasilevich – acting Deputy General Director – Branch Director of PJSC «Rosseti – Center» - «Oryolenergo».

11. Yuriev Yuriy Nikolaevich - General Director of «Orlovsky energosbyt» («Oryol Energy Sales»).

12. Koroleva Tatyana Gennadevna – Technical Secretary of the Committee, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Equipment and Energy Saving, Orel State University n.a. I.S. Turgenev.

### **PROGRAM COMMITTEE**

1. Kachanov Alexander Nikolayevich - Chairman of the Program Committee, Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor, Academician of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF, Head of the Department of Energy Equipment and Energy Saving, Orel State University n.a. I.S. Turgenev, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation.

2. Stepanov Yury Sergeevich - Deputy-Chairman of the Program Committee, Honored Master of Sciences of Russia, Doctor of Engineering Sciences, Professor, State Prize Laureate, Orel State University n.a. I.S. Turgenev.

3. Demidovich Victor Boleslavovich - Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor of the Department of Electrotechnology and Converting Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "LETI n.a. V.I. Uljanov", Secretary of the Scientific Branch Department Nr.6 of the Academy of Electrical Engineering Sciences of the RF.

4. Ljubimov Victor Vasilievich - Honored Master of Sciences of Russia, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Corresponding Member of the RAS, Head of the Department of Electrical and Nanotechnologies, Tula State Technical University, Tula.

5. Petrov Georgy Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Honored Scientist of Tajikistan, academician of the International Energy Academy, leading specialist of the Center for Innovative Development of Science and New Technologies of the National Academy of Sciences of Tajikistan.

6. Kheyphits Mikhail Lvovich - Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Secretary of the Scientific Branch Department of Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus.

7. Li Qingling - Prof., Dipl.-Ing., Qingdao University of Chemical Technology, Department of Mechanical Engineering (China).

8. Korenkov Dmitriy Andreevich - Technical Secretary of the Program Committee, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Equipment and Energy Saving, Orel State University n.a. I.S. Turgenev.

### **TECHNICAL COMMITTEE**

1. Radchenko Sergey Yurjevitch - Doctor of Engineering Sciences, Pro-fessor, Vice-rector for Scientific and Technological Activity and Certification of Scientific Personnel, Orel State University n.a. I.S. Turgenjev, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation.

2. Dudina Elena Fedorovna - Candidate of Philological Sciences, Head of the Department of Organization of Scientific Events and Academic Development, Orel State University n.a. I.S. Turgenjev.

3. Alexandrova Anzhelika Paruirovna - Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Head of the Translation Agency Department, Orel State University n.a. I.S. Turgenjev.

4. Vorobyev Sergey Aleksandrovich - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Economy and Road Construction, Head of the Department of Organizational Support of Research work.

5. Lunev Roman Alekseevich - Secretary of the Technical Committee, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies, Orel State University n.a. I.S. Turgenev.

### **SCIENTIFIC AND ENGINEERING DIRECTIONS**

1. Energy-saving electrical processes and installations in mechanical engineering and metallurgy and other sectors of the economy.

2. Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development.

3. Energy and resource saving in the agro-industrial complex.

4. Intelligent technologies in power engineering.

**СЕКЦИЯ 1. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ И  
ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ**

Руководитель:

**Кувалдин Александр Борисович**, академик АЭН Российской Федерации, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии», НИУ «МЭИ», г. Москва

Научная статья

УДК 674.047.3-047.58

**Моделирование изменения емкости рабочего конденсатора электротермических установок для ВЧ сушки пиломатериалов**

**Шевляков Дмитрий Эдуардович<sup>1</sup>, Дмитрий Андреевич Коренков<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>dmsch3557@yandex.ru

<sup>2</sup>dimas.corenkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

*Аннотация.* В статье анализируются зависимости между ёмкостью рабочего конденсатора ВЧ установок для диэлектрического нагрева и магнитной проницаемостью, температурой, влажностью древесины с применением компьютерного моделирования.

*Ключевые слова:* ВЧ сушка древесины, частота тока, конденсатор, программный комплекс «Simintech», планирование эксперимента.

*Для цитирования:* Шевляков Дм.Э., Коренков Д.А. Моделирование изменения емкости рабочего конденсатора электротермических установок для вч сушки пиломатериалов // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 6 – 10.

Energy-saving electrotechnological processes and installations in mechanical engineering,  
metallurgy and other sectors of the economy

Original article

**Modeling of changes in the capacitance of the working capacitor of electrothermal installations for HF drying of lumber**

**Shevlyakov Dmitry Eduardovich<sup>1</sup>, Dmitry AndreevichKorenkov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>dmsch3557@yandex.ru

<sup>2</sup>dimas.corenkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

Corresponding author: Dmitry Andreevich Korenkov, [dimas.corenkov@yandex.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru)

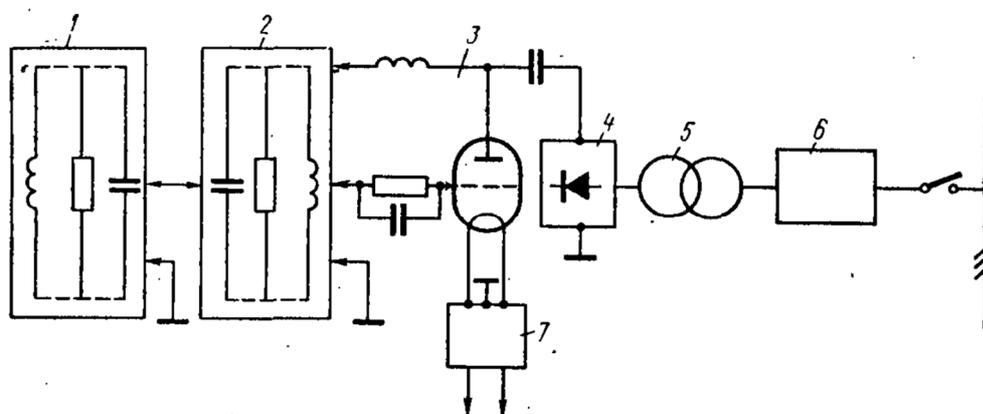
*Abstract:* The article analyzes the relationship between the capacity of the working capacitor of RF installations for dielectric heating and the magnetic permeability, temperature, humidity of wood using computer modeling.

*Keywords:* HF wood drying, current frequency, capacitor, Simintech software package, experiment planning.

*For citation:* Shevlyakov Dm.E., Korenkov D.A. Modeling of changes in the capacitance of the working capacitor of electrothermal installations for HF drying of lumber // Energy and resource saving – XXI century. 2023. P. 6 – 10.

Высокочастотный (ВЧ) метод сушки пиломатериалов позволяет добиться более высокого качества конечной продукции по сравнению с конвективным или традиционным методами при меньшей продолжительности. Высокочастотная сушка реализуется путём укладки заготовок в рабочий конденсатор, состоящий из двух и более электродов, подключаемых к генератору токов высокой частоты [1].

Высокочастотные электротермические установки схожи по устройству между собой, общая схема представлена на рисунке 1. Различия заключаются в специфических вспомогательных устройствах или системах необходимых для конкретного рабочего технологического процесса (система охлаждения, мощность и вид рабочего органа, элементная база генераторного блока и уровень автоматизации системы управления). Данный тип установок имеет ряд эксплуатационных особенностей, отдельно выделим необходимость поддержания во время работы резонансной согласованной частоты генератора и рабочего конденсатора, которая обеспечивает максимальный КПД ( $\eta$ ) и коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), нарушение данного условия работы приводит к сильному снижению данных технико-экономических параметров [2].



**Рисунок 1 – Общая схема высокочастотных электротермических установок с ламповыми генераторами**

*1 — рабочий контур; 2 — промежуточный согласующий контур; 3 — блок генераторной лампы; 4 — анодный выпрямитель; 5 — анодный повышающий трансформатор; 6 — блок аварийных защит и блокировок; 7 — источник питания цепей накала генераторных ламп.*

Для обеспечения эффективности процесса сушки пиломатериалов требуется постоянная настройка параметров контуров, с помощью которых осуществляется согласование генератора и нагрузки. Из анализа доступных схмотехнических решений [3, 4], относящихся к ламповым моделям генераторов, преимущественно, позднего советского периода, следует, что такая настройка предусматривалась либо в ручном режиме силами оперативного персонала, либо не предусматривалась вовсе. Известны и немногочисленные разработки [5], направленные на обеспечение согласованной работы высокочастотного генератора и нагрузки, также не предусматривающие автоматизацию данного процесса, но требующие адаптацию технологии к условиям сушки крупногабаритных пиломатериалов. Из отмеченного следует заключить, что разработка системы управления параметрами согласующих элементов, оптимальное значение которых должно устанавливаться в зависимости от мгновенных характеристик нагрузки, является актуальной задачей повышения энергоэффективности установок для диэлектрической сушки пиломатериалов.

На текущем этапе решения данной задачи требуется разработка математической модели, описывающей изменение параметров нагрузки, а именно емкости рабочего конденсатора. Одним из распространенных способов укладки пиломатериалов прямоугольной формы является укладка с вертикальными электродами, показанная на рисунке 2.

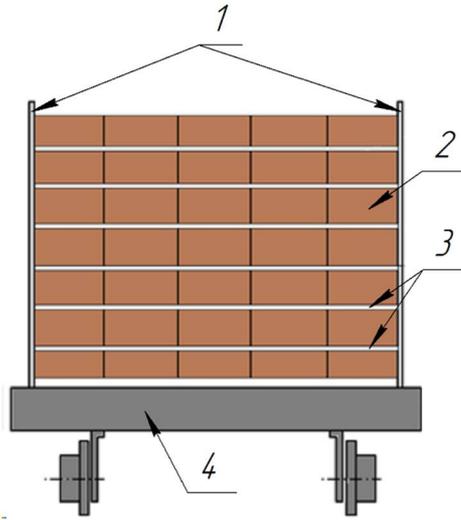


Рисунок 2 – Рабочий конденсатор с вертикальными электродами  
 1 — вертикальные электроды конденсатора; 2 — пиломатериалы;  
 3 — прокладки; 4 — тележка

Для вычисления электрической ёмкости такого конденсатора применима формула (1), [6]:

$$C_p = \frac{(\varepsilon'_B S_B + \varepsilon'_D S_D) \varepsilon'_B S}{4\pi(d_D \varepsilon'_B S + d_B \varepsilon'_B S_B + \varepsilon'_D S_D d_B)}, \quad (1)$$

где  $n$  — число электродных пластин;

$\varepsilon'_B$  — диэлектрическая проницаемость воздуха;

$\varepsilon'_D$  — диэлектрическая проницаемость высушиваемой древесины;

$S$  — общая односторонняя площадь электродной пластины;

$S_B$  — площадь пластины, занятая горизонтальными воздушными промежутками между пиломатериалами,  $\text{см}^2$ ;

$S_D$  — площадь пластины электрода, занятая высушиваемыми пиломатериалами,  $\text{см}^2$ ;

$d_B$  — сумма всех воздушных промежутков по высоте штабеля,  $\text{см}$ ;

$d_D$  — сумма толщин всех пиломатериалов по высоте штабеля,  $\text{см}$ .

Из анализа формулы (1) следует, что если пренебречь усушкой, то габаритные размеры пиломатериалов в штабеле на динамическое изменение емкости конденсатора практически не влияют. Тогда одним из важных и динамически изменяющихся параметров рабочего конденсатора в ходе сушки является диэлектрическая проницаемость древесины ( $\varepsilon'_D$ ), значение которой зависит от её температуры ( $T$ ) и влагосодержания ( $W$ ). Функциональная связь между указанными величинами была получена путем аппроксимации табличных данных [7] для древесины хвойных пород. Результаты аппроксимации представлены на рисунке 3, а.

Наиболее сложным представляется расчет изменения емкости рабочего конденсатора во времени, что связано с решением системы уравнений тепло- и массопереноса с учетом распределения внутренних источников теплоты. С учетом ряда допущений и упрощений данная система сводится к виду (2)-(4), [8]:

$$\frac{dT_{cp}}{dt} = (1 - \xi(T_{cp}, W_{cp})) \frac{Q_v(T_{cp}, W_{cp})}{C(T_{cp}, W_{cp}) \cdot \rho_0}; \quad (2)$$

$$\frac{dW_{cp}}{dt} = -\xi(T_{cp}, W_{cp}) \frac{Q_v(T_{cp}, W_{cp})}{\rho_0 \cdot r(T_{cp})}; \quad (3)$$

$$Q_v(T_{cp}, W_{cp}) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(T_{cp}, W_{cp}) \operatorname{tg} \delta(T_{cp}, W_{cp}) E^2, \quad (4)$$

где  $T_{cp}$  и  $W_{cp}$  — среднее значение температуры и влагосодержание материала,

$Q_v$  – удельная мощность внутренних источников теплоты;

$\rho_0$  – плотность материала в сухом состоянии;

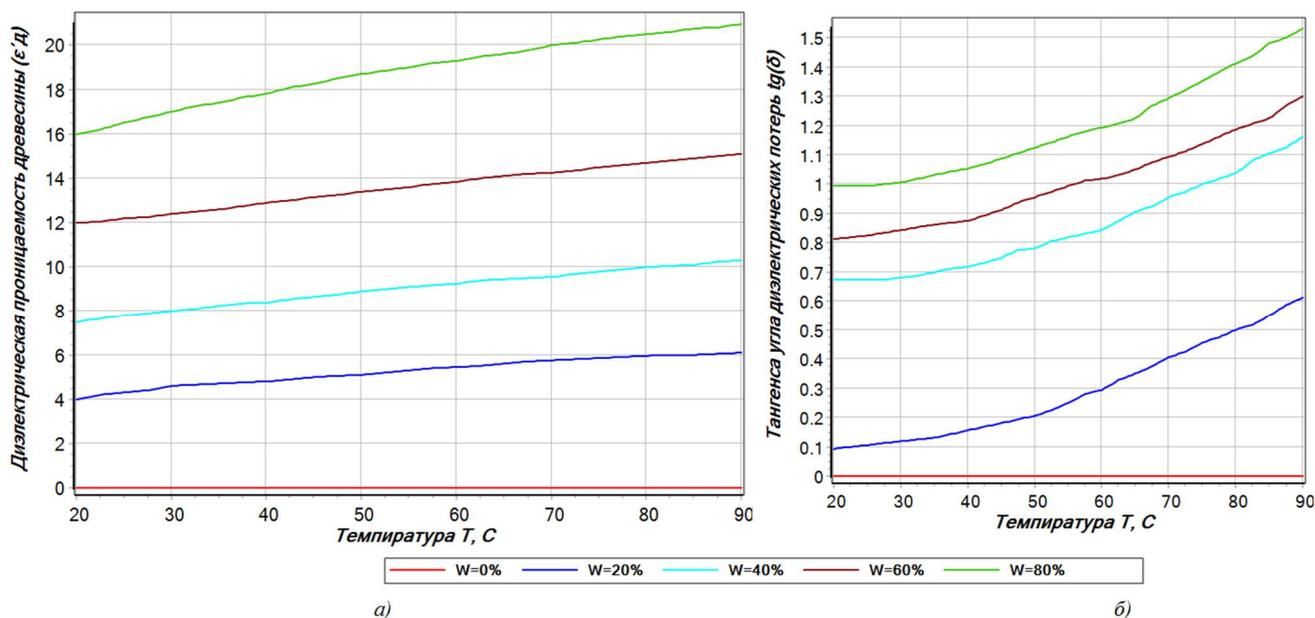
$r$  – удельная теплота парообразования,

$\xi$  – критерий фазового превращения,

$C$  – теплоемкость материала,

$f$  – рабочая частота ВЧ генератора,

$\operatorname{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь, функциональная связь которого с температурой и влажностью для древесины хвойных пород показана на рисунке 3, б.



**Рисунок 3 - Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  (а) и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  (б) древесины от температуры и влагосодержания**

Подстановка результатов численного решения (2)-(4) в уравнение (1) с учетом зависимостей, приведенных на рисунке 2, показала, что в процессе сушки емкость рабочего конденсатора типичных для установок данного класса размеров может меняться в достаточно широком диапазоне значений от 1800 пФ при начальном влагосодержании 60 % до 400 пФ при конечном влагосодержании 12 %. Полученные результаты теоретических расчетов не противоречат данным, приведенным в [6], что свидетельствует об адекватности представленной математической модели. В дальнейшем планируется разработать и смоделировать работу системы управления согласующих контуров электротермической установки в программном продукте Simintech.

#### Список литературы

1) Шевляков, Д. Э. Об обеспечении оптимальной работы силовых ВЧ генераторов на переменную емкостную нагрузку / Д. Э. Шевляков, Д. Э. Шевляков, Д. А. Коренков // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век : материалы XX международной научно-практической конференции, Орёл, 14–16 ноября 2022 года. – 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2022. – С. 19-22.

2) Княжевская, Г. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г. С. Княжевская, М. Г. Фирсова, Р. Ш. Килькеев; Под ред. А. Н. Шамова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Машиностроение : Ленингр. отд-ние, 1989. - 64с.

3) Донской, А. В. Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами / А. В. Донской, Г. С. Рамм, Ю. Б. Вигдорович. - Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1957. - 307 с.

4) Юрасов, Е. В. Ламповые генераторы и передатчики [Текст] : Учебник для специальных технических школ / Е. В. Юрасов. - Москва : Гос. воен. изд-во, 1938. - 335 с.

5) Пат. 2210874 С2 Российская Федерация, МПК H05B 6/02, F26B 3/347. Установка для нагрева в поле токов высокой частоты древесины и других диэлектриков (варианты) / Рыболовлев В. П.; заявитель и патентообладатель Рыболовлев В. П. – № 2001108732/09; заявл. 02.04.2001; опубл. 20.08.2003.

6) Особенности высокочастотной сушки пиломатериалов / В. П. Галкин, А. А. Горяев, Н. Б. Баланцева [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2017. – Т. 21, № 4. – С. 73-77. – DOI 10.18698/2542-1468-2017-4-73-77.

7) Лесная энциклопедия: в 2-х томах / редкол.: Г. И. Воробьев (гл. ред.) [и др.]. – Москва : Советская энциклопедия, 1985-1986. Т. 1: Абелия-Лимон. - 1985. - 563 с. : ил.

8) Коренков Д.А., Ревякин В.О. Подход к моделированию кинетики вакуумно-высокочастотной сушки // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 470-473.

### References

1) Shevlyakov, D. E. On ensuring optimal operation of RF power generators for variable capacitive load / D. E. Shevlyakov, D. E. Shevlyakov, D. A. Korenkov // Energy and resource conservation - XXI century : materials of the XX International scientific and Practical conference, Orel, November 14-16, 2022. – 302026, Orel, Komsomolskaya str., 95: I.S. Turgenev Orel State University, 2022. – pp. 19-22.

2) Knyazhevskaya, G. S. High-frequency heating of dielectric materials / G. S. Knyazhevskaya, M. G. Firsova, R. S. Kilkeev; Edited by A. N. Shamov. - 2nd ed., reprint. and additional - Leningrad : Mashinostroenie : Leningr. otd-nie, 1989. - 64s.

3) Donskoy, A.V. High-frequency electrothermal installations with lamp generators / A.V. Donskoy, G. S. Ramm, Yu. B. Vigdorovich. - Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1957. - 307 p.

4) Yurasov, E. V. Lamp generators and transmitters [Text] : Textbook for special technical schools / E. V. Yurasov. - Moscow : State Military. publishing house, 1938. - 335 p.

5) Pat. 2210874 С2 Russian Federation, IPC H05B 6/02, F26B 3/347. Installation for heating in the field of high-frequency currents of wood and other dielectrics (options) / Rybolovlev V. P.; applicant and patent holder Rybolovlev V. P. - No. 2001108732/09; application 02.04.2001; publ. 20.08.2003.

6) Features of high-frequency drying of lumber / V. P. Galkin, A. A. Goryaev, N. B. Balantseva [et al.] // Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin. – 2017. – Vol. 21, No. 4. – pp. 73-77. – DOI 10.18698/2542-1468-2017-4-73-77.

7) Forest Encyclopedia : in 2 volumes / editor: G. I. Vorobyov (chief editor) [and others]. – Moscow : Soviet Encyclopedia, 1985-1986. Vol. 1: Abelia-Lemon. - 1985. - 563 p. : ill.

8) Korenkov D.A., Revyakin V.O. Approach to modeling the kinetics of vacuum-high-frequency drying // Information technologies in electrical engineering and electric power industry: materials of the 12th All-Russian Scientific and Technical conf. – Cheboksary: Chuvash Publishing House. un-ta, 2020. pp. 470-473.

### Информация об авторах

Дм.Э. Шевляков – магистрант;

Д.А. Коренков – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения.

### Information about the authors

Dm. E. Shevlyakov – undergraduate;

D. A. Korenkov – candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department.

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 10.11.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 11 – 14.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 11 – 14.

Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении,  
металлургии и других отраслях экономики

Научная статья  
УДК 621.311

### Установка для индукционной закалки крупногабаритных валков прокатных станов

Александр Николаевич Качанов<sup>1</sup>, Евгений Андреевич Миронов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>kan@ostu.ru

<sup>2</sup>gen996@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Евгений Андреевич Миронов, gen996@mail.ru

**Аннотация.** В статье приведены результаты анализа условий эксплуатации валков прокатных станов. Рассмотрена роль индукционного нагрева как наиболее эффективного способа бесконтактного подвода тепла в электропроводящую среду с учётом его особенностей, влияющих на качество готовых валков. Предложено техническое решение по использованию установки индукционного нагрева с бегущим электромагнитным полем как средства для повышения энергоэффективности закалки рабочих поверхностей крупногабаритных валков прокатных станов.

**Ключевые слова:** индукционная закалка, непрерывно-последовательный нагрев, валок прокатного стана, бегущее электромагнитное поле, повышение энергоэффективности, аустенизация стали.

**Для цитирования:** Качанов А.Н., Миронов Е.А. Установка для индукционной закалки крупногабаритных валков прокатных станов // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 11 - 14.

Energy-saving electrotechnological processes and installations in mechanical engineering,  
metallurgy and other sectors of the economy

Original article

### Installation for induction hardening of rolling mills large rolls

Alexander Nikolaevich Kachanov<sup>1</sup>, Evgeniy Andreevich Mironov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>FSBEI HE "OGU named after I.S. Turgenev", Orel, Russia

<sup>1</sup>kan@ostu.ru

<sup>2</sup>gen996@mail.ru

Corresponding author: Evgeniy Andreevich Mironov, gen996@mail.ru

**Abstract.** The article presents the results of an analysis of the operating conditions of rolling mill rolls. The role of induction heating is considered as the most effective method of non-contact heat supply to an electrically conductive medium, taking into account its features that affect the quality of the finished rolls. A technical solution has been proposed for the use of an induction heating installation with a traveling electromagnetic field as a means to increase the energy efficiency of hardening the working surfaces of large rolls of rolling mills.

**Keywords:** induction hardening, scan heating, rolling mill roll, traveling electromagnetic field, increasing energy efficiency, steel austenitization.

**For citation:** Kachanov A.N., Mironov E.A. Improving the energy efficiency of induction hardening of rolling mills large rolls // Energy and resource saving - XXI century. 2023. P. 11 - 14.

Введение. Важной составляющей машиностроительной отрасли является прокатное производство, в котором, для получения высокосортной продукции, используются мощные

сложные, полностью автоматизированные линии. Их надежная и бесперебойная работа в значительной степени определяется качеством рабочих и опорных прокатных валков. При интенсивной, непрерывной работе прокатного стана, валки, входящие в его состав, испытывают воздействия очень высоких контактных давлений, которые могут превышать величину предела текучести деформируемого металла, по этой причине валки должны обладать соответствующей прочностью и твердостью [1].

Следует отметить, что в машиностроительной области актуальными являются задачи исследования процессов изготовления и термообработки крупногабаритных валков именно холодной прокатки, как наиболее требовательных и ответственных узлов прокатных станов. Особо высокие требования твердости и прочности предъявляются к рабочему слою валков, по которым происходит контактирование [2], поэтому в качестве окончательной термообработки целесообразно применять поверхностную индукционную закалку как наиболее эффективный способ бесконтактного подвода тепла в электропроводящую среду.

Важно точно соблюдать режим нагрева для того, чтобы не допустить пережога и обезуглероживания поверхности валка вследствие перегрева, а также недостаточного нагрева в области фазовых превращений, что приводит к ухудшению твердости и износостойкости валков вследствие появления в закаленном слое остаточного феррита из-за его неполного растворения при аустенизации [3]. Для предотвращения возникновения отслоений закаленного слоя при эксплуатации валка, необходимо проводить предварительный прогрев сердцевины валка с целью увеличения толщины переходной зоны, а также сглаживания и рассредоточения опасного пика растягивающих напряжений, образующихся после закалки.

Индукционная поверхностная закалка бочек крупногабаритных валков прокатных станов чаще всего реализуется с помощью непрерывно-последовательного нагрева, требующего применения источника питания небольшой мощности. Суть данного способа нагрева заключается в том, что валок, подлежащий закалке, устанавливается в закалочную установку с размещенными на ней индуктором и специальным спрейером, которые имеют возможность с заданной скоростью перемещаться вдоль бочки валка. Успешным решением задачи, направленной на получение изделия с требуемой твердостью и прочностью закаленной поверхности при повышении энергоэффективности, может стать применение индукционной закалки валков прокатных станов с использованием бегущего электромагнитного поля (БЭМП). На рисунке 1 представлен эскиз установки индукционного нагрева с бегущим электромагнитным полем для закалки крупногабаритных валков прокатных станов.

В предлагаемой авторами [4] установке реализуется непрерывно-последовательный способ закалки с использованием индуктора повышенной частоты для создания большой удельной мощности в поверхностном слое и индуктора с БЭМП промышленной частоты, который обеспечивает, не только глубинный нагрев валка, но и его вращение. Вращение валка необходимо для получения более равномерного распределения источников теплоты в закаливаемом слое, а также для сбивания паровой рубашки, образующейся при кипении воды во время закалки, которая понижает скорость охлаждения и ведёт к образованию мягких пятен на поверхностном слое.

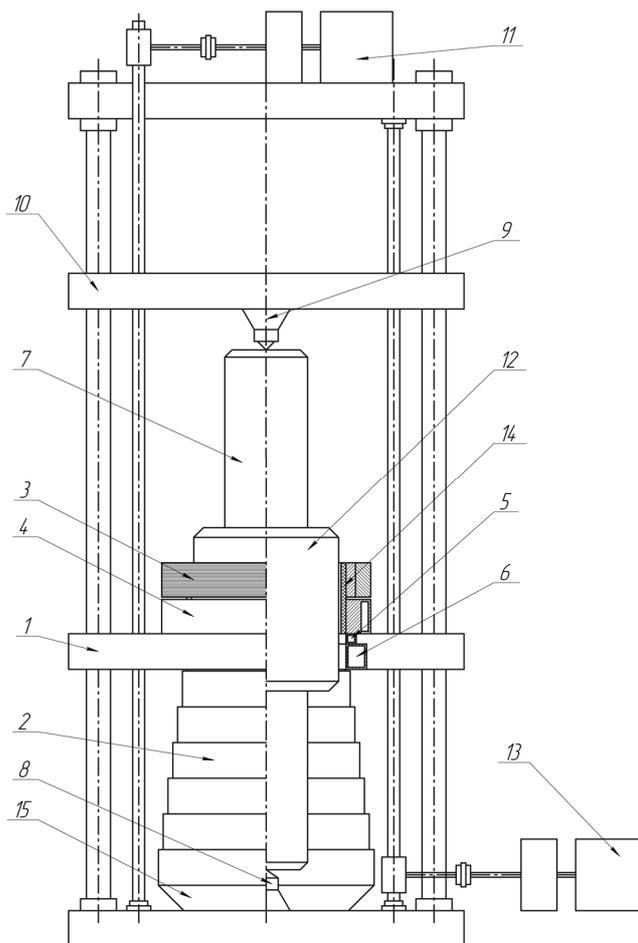
Перед началом процесса закалки валок 7 прокатного стана пропускают через нижнюю траверсу 1 и устанавливают на нижний центр 8. Затем валок фиксируют в вертикальном положении с помощью верхнего центра 9, расположенного на верхней траверсе 10. Нижнюю траверсу устанавливают на уровне нижней части бочки 12 валка, поверхность которой подлежит закалке. К закалочному блоку, включающему в себя два водоохлаждаемых индуктора 3 и 4, а также устройство 5 воздушного дутья и спрейер 6, подключают шланги подачи воздуха и рукава водоснабжения (на эскизе не показаны).

Технологический процесс закалки начинается с момента подачи на индуктор 3, создающий БЭМП, тока промышленной частоты и воды для охлаждения. Далее запускают цикл предварительного нагрева бочки валка, при котором нижняя траверса с помощью электропривода 13 нижней траверсы начинает перемещаться вверх до границы закаливаемой

части бочки валка, затем опускается вниз в исходное положение. Данная процедура повторяется до тех пор, пока температура поверхности валка не достигнет значений, заданных в технологической карте. Процесс предварительного нагрева может занимать значительное время, которое зависит от размеров и массы валка. Футеровка 14 уменьшает тепловые потери с поверхности бочки валка, способствует выравниванию его средней температуры, увеличивает термический КПД. Вместе с тем её толщина должна быть минимальной, так как с ростом толщины футеровки уменьшается значение естественного коэффициента мощности установки ( $\cos\varphi$ ) [5]. Одновременно с перемещением нижней траверсы поднимаются и опускаются полые секции телескопического защитного кожуха 2, обеспечивающего дополнительное уменьшение потерь тепла излучением при нагреве валка за счёт его внешней изоляции.

После цикла предварительного нагрева осуществляют закалочный проход, на котором нижняя траверса начинает движение из нижнего положения вверх при включенном индукторе с бегущим электромагнитным полем промышленной частоты. Одновременно с этим подают электропитание и водоохлаждение на закалочный индуктор 4 повышенной частоты, а также осуществляют подачу воздуха в устройство воздушного дутья и подачу охлаждающей воды под давлением в спрейер для закалки нагретой поверхности бочки валка. Поток воздуха из устройства воздушного дутья отсекает от зоны нагрева брызги воды, отраженные от поверхности бочки валка, тем самым обеспечивая повышение качества закалки. При этом вода и образующийся конденсат стекают по стенкам защитного кожуха в воронку водосборника 15 системы оборотной воды. После завершения технологического процесса закалки поверхности бочки валка траверсу с закалочным блоком опускают в крайнее нижнее положение, валок освобождают от фиксации и извлекают из установки.

Рассмотренное техническое предложение направлено на решение одной из актуальных задач, стоящих перед металлургическим машиностроением, а именно, на обеспечение надёжности и продолжительности работы прокатных станов, их эксплуатационных свойств, высокой производительности при повышении



**Рисунок 1 – Установка индукционного нагрева с бегущим электромагнитным полем для закалки крупногабаритных валков прокатных станов:**

1 – нижняя траверса; 2 – защитный кожух; 3 – индуктор с БЭМП; 4 – закалочный индуктор; 5 – устройство воздушного дутья; 6 – спрейер; 7 – валок; 8 – нижний центр; 9 – верхний центр; 10 – верхняя траверса; 11 – электропривод верхней траверсы; 12 – бочка валка; 13 – электропривод нижней траверсы; 14 – футеровка; 15 – воронка водосборника

энергоэффективности индукционной закалки крупногабаритных валков. При этом этим необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований с использованием современных программных методов расчета [6], направленных на дальнейшую разработку энергоэффективных индукционных устройств для закалки крупногабаритных валков прокатных станов, отвечающих высоким требованиям по критериям долговечности, износостойчивости, трещиностойкости, прочности и твердости рабочих поверхностей валков.

#### Список источников

1. Геден, М.В. Термическая обработка валков холодной прокатки / М.В. Геден, Г.П. Соболев, И.В. Паисов. – М., Metallurgy, 1973. – 344 с.
2. Шепеляковский, К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве / К.З. Шепеляковский. // - М., Машиностроение, 1972. – 288 с.
3. Качанов, Н.Н. Прокаливаемость стали / Н.Н. Качанов. - М.: Metallurgy, 1978. – 192 с.
4. Пат. № 2613307, МПК C21D 9/38, C21D 1/10 «Устройство индукционного нагрева для закалки крупногабаритных валков прокатных станов» / Качанов А.Н. Миронов Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева». – № 2022126467; заявл. 10.10.2022; опубл. 06.04.2023.
5. Качанов А.Н., Миронов Е.А., Селиверстова О.С. Исследование индукционного устройства для нагрева плоских металлических изделий в бегущем электромагнитном поле в программной среде ELCUT // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия технические науки. №3, 2019 – С. 63-67.
6. Качанов А.Н., Миронов Е.А. Результаты исследования электромагнитных сил и мощности тепловыделения в индукционных системах с бегущим электромагнитным полем // Вестник МЭИ. 2023. № 3. С. 55-62. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-55-62.

#### References

1. Gedeon, M.V. Heat treatment of cold rolling rolls / M.V. Gideon, G.P. Sobol, I.V. Paisov. – M., Metallurgy, 1973. – 344 p.
2. Shepelyakovsky, K.Z. Hardening of machine parts by surface hardening during induction heating / K.Z. Shepelyakovsky. // - M., Mechanical Engineering, 1972. – 288 p.
3. Kachanov, N.N. Hardenability of steel / N.N. Kachanov. - M.: Metallurgy, 1978. – 192 p.
4. Pat. No. 2613307, MPK C21D 9/38, C21D 1/10 “Induction heating device for hardening large rolls of rolling mills” / Kachanov A.N. Mironov E.A.; applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “OSU named after. I.S. Turgenev.” – No. 2022126467; application 10.10.2022; publ. 04/06/2023.
5. Kachanov A.N., Mironov E.A., Seliverstova O.S. Study of an induction device for heating flat metal products in a traveling electromagnetic field in the ELCUT software environment // Bulletin of Tver State Technical University. Technical science series. No. 3, 2019 – pp. 63-67.
6. Kachanov A.N., Mironov E.A. Results of a study of electromagnetic forces and heat generation power in induction systems with a traveling electromagnetic field // Bulletin of MPEI. 2023. No. 3. P. 55-62. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-55-62.

#### Информация об авторах

А.Н. Качанов – д-р техн. наук, профессор, академик АЭН Российской Федерации, заведующий кафедрой электрооборудования и энергосбережения  
Е.А. Миронов – магистр, ассистент кафедры электрооборудования и энергосбережения

#### Information about the authors

A.N. Kachanov – Doctor of technical sciences, Professor, Academician of the AES RF, Head of the Department of Electrical Equipment and Energy Saving  
E.A. Mironov – master’s degree, assistant at the Department of Electrical Equipment and Energy Saving

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 08.11.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 15 - 18.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 15 - 18.

Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении,  
металлургии и других отраслях экономики

Научная статья  
УДК 674.047.3-047.58

**Анализ влияния конфигурации штабеля на параметры электрического поля внутри  
сушильной камеры**

**Шевляков Даниил Эдуардович<sup>1</sup>, Коренков Дмитрий Андреевич<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>daniil3557@yandex.ru

<sup>2</sup>dimas.corenkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

**Аннотация.** В статье анализируются параметры электрического поля при изменении геометрических параметров укладки штабеля. С помощью компьютерного моделирования и обработки результатов двухфакторным анализом.

**Ключевые слова:** ВЧ сушка древесины, распространение электрического поля, программный комплекс «Elcut», планирование эксперимента.

**Для цитирования:** Шевляков Д.Э., Коренков Д.А. Анализ влияния конфигурации штабеля на параметры электрического поля внутри сушильной камеры // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 15 - 18.

Energy-saving electrotechnological processes and installations in mechanical engineering,  
metallurgy and other sectors of the economy

Original article

**Analysis of the influence of the stack configuration on the parameters of the electric field  
inside the drying chamber**

**Shevlyakov Daniil Eduardovich<sup>1</sup>, Dmitry Andreevich Korenkov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>daniil3557@yandex.ru

<sup>2</sup>dimas.corenkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

Corresponding author: Dmitry Andreevich Korenkov, [dimas.corenkov@yandex.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru)

**Abstract.** The article analyzes the parameters of the electric field when changing the geometric parameters of stacking. With the help of computer modeling and processing of the results by two-factor analysis.

**Keywords:** HF drying of wood, electric field propagation, Elcut software package, experiment planning.

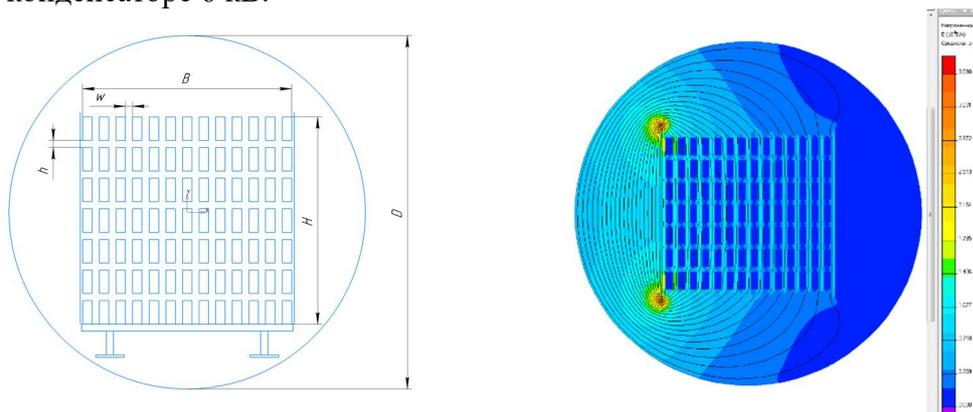
**For citation:** Shevlyakov D.E., Korenkov D.A. Analysis of the influence of the stack configuration on the parameters of the electric field inside the drying chamber // Energy and resource saving – XXI century. 2023. P. 15 - 18.

Вакуумно-диэлектрический нагрев диэлектрических материалов в электрическом поле высокочастотных (далее ВЧ) токов (от 1,76 до 152,5 МГц) – один из активно развивающихся методов термообработки. В настоящее время этот метод сушки широко применяется в различных отраслях промышленности, таких как пищевая, легкая и деревообрабатывающая. Однако существует общая проблема – разброс конечной влажности продукта из-за неравномерного распределения внутренних источников теплоты [1] и, следовательно, неравномерности нагрева. Для уменьшения этого явления требуется изучение закономерностей распределения параметров электромагнитного поля в загрузке в зависимости от влияния различных факторов.

Укладка штабеля является главной и наиболее трудоемкой операцией, которая значительно влияет на качество высушенного материала. Существуют два основных способа укладки, первый из которых включает укладку рядов досок между горизонтальными электродами. Данный способ укладки имеет ряд серьезных, в первую очередь технологических, недостатков, из-за чего на практике чаще всего используется метод с вертикальными электродами. Чтобы предотвратить искрение между электродами и загрузкой, оставляют воздушные зазоры, которые изменяют конфигурацию электромагнитного поля внутри неё. Однако вертикальные электроды, выполненные в виде сеток, натянутых на трубчатый каркас, позволяют сократить время разгрузочно-погрузочных работ, что более практично в эксплуатации. В связи с этим была проанализирована геометрическая модель, представленная на рис. 1, а, в которой пиломатериал при формировании штабеля располагается кромкой на опорную поверхность (прокладки). Такой способ расположения обладает преимуществами с точки зрения предотвращения повторной конденсации каплеобразной влаги на пласте пиломатериала, но требует обоснования с точки зрения других аспектов диэлектрической сушки. В первую очередь необходимы проверка равномерности распределения напряженности электрического поля  $E$  в поперечном разрезе штабеля и поиск оптимальных геометрических параметров укладки, обеспечивающих эту равномерность.

Из анализа приведенной геометрической модели следует, что при имеющихся технических ограничениях на высоту и ширину штабеля и при фиксированном сечении пиломатериала основными факторами, влияющими на распределение электромагнитного поля в поперечном сечении штабеля, могут являться ширина шпаций  $w$  и высота прокладок  $h$ . При этом ранее проведенные исследования показали, что влиянием диаметра рабочей камеры  $D$  можно пренебречь [2, 3].

Исследование влияния данных показателей на величину напряженности  $E$  и равномерность её распределения производилась по методике полного факторного эксперимента с использованием математического и компьютерного моделирования. В программном комплексе «Elcut» в соответствии с рис. 1, а была построена геометрическая модель. Для описания распределения электрического поля выбрана математическая модель [4], результаты численного анализа которой методом конечных элементов приведены на рисунке 1, б. Моделирование проводилось для частоты 13,56 МГц при амплитуде напряжения на конденсаторе 6 кВ.



**Рисунок 1 – Укладка штабелей с вертикальными электродами (а) и картина распределения напряженности электрического поля по поперечному сечению рабочей камеры (б)**

$D$  – диаметр камеры;  $H$  и  $B$  – высота и ширина штабеля;  $w$  – ширина шпаций;  
 $d$  – воздушный зазор;  $h$  – высота прокладки.

С целью определения среднего значения напряженности электрического поля в каждой заготовке и в целом по штабелю, а также для количественной оценки равномерности распределения параметров электромагнитного поля был разработан специальный вычислительный модуль на языке программирования Java, который импортирует данные из Elcut, сортирует их и экспортирует в удобном для визуализации формате в табличный

процессор Excel. В последнем вычисляются все интересующие усредненные параметры электромагнитного поля. Так были получены значения средней напряженности электрического поля для каждой заготовки в штабеле (рис. 2) при ширине шпаций и высоте прокладок по 3 см.

721,76	770,81	701,93	624,35	555,25	495,16	444,92	402,16	366,74	334,05	309,54	291,78	281,74	276,79
549,40	557,30	541,32	510,02	473,34	435,42	401,35	372,98	346,74	325,19	308,07	296,26	287,98	281,35
497,69	491,93	474,44	451,11	424,29	400,11	374,37	354,70	335,89	320,47	309,16	300,09	294,50	289,32
483,57	474,80	456,14	433,32	409,58	386,24	365,48	347,04	332,01	319,17	308,68	301,74	296,19	291,88
496,47	490,97	473,89	450,77	425,25	399,05	374,33	354,11	335,24	320,73	308,97	300,01	294,17	289,58
548,47	555,00	540,68	509,22	471,55	436,07	401,74	370,24	346,30	325,20	307,75	296,39	288,32	282,66
721,09	760,53	695,75	623,67	554,42	491,52	444,17	399,85	364,42	332,99	310,63	290,44	280,82	275,65

■ – макс. значение напряженности (E)    ■ – мин. значение напряженности (E)

**Рисунок 2 – Распределение  $E_{cp}$ , В/м по высушиваемым заготовкам при параметрах укладки штабеля  $d = 3$  см,  $w = 3$  см**

В качестве критерия оценки однородности распределения поля выбран коэффициент неоднородности, вычисляемый по формуле:

$$E_{\max/cp} = \frac{E_{\max}}{E_{cp}}, \quad 1)$$

где  $E_{\max}$  - значение максимальной напряженности электрического поля в древесине, В/м.

Для распределения, показанного на рисунке 2, коэффициент неоднородности составил 1,88.

Для установления вида функциональных зависимостей  $E_{cp} = F_1(h, w)$  и  $E_{\max/cp} = F_2(h, w)$  в первом приближении выбран линейный полином. Чтобы определить его коэффициенты в соответствии с ПФЭ  $2^2$  необходимо провести четыре опыта. Уровни варьирования факторов указаны в таблице 1, в таблице 2 приведена матрица планирования эксперимента и результаты численных экспериментов для двух дублей. Расхождение результатов в каждом опыте обусловлено разным шагом построения конечно-элементной сетки.

**Таблица 1 – Уровни варьирования факторов**

Фактор		Уровень фактора			
		максимальный		минимальный	
$h$ , см	$x_1$	3	+1	1	-1
$w$ , см	$x_2$	3	+1	1	-1

**Таблица 2 – План и результаты опытов**

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$E_{cp}^1$ , В/м	$E_{cp}^2$ , В/м	$E_{\max/cp}^1$	$E_{\max/cp}^2$
1	1	1	730,2	720,4	1,9	1,33
2	1	-1	414,3	470,6	1,97	1,49
3	-1	1	739,9	724,6	2,1	1,38
4	-1	-1	420,9	411,5	1,88	1,65

Проверка однородности дисперсий выполняется по G-критерию Кохрена, значение которого составило 0,81. Его табличное значение для доверительной вероятности 95 % составляет  $G_T = 0,9065$ . Так как  $G_T > G_p$ , дисперсии однородны, вследствие чего коэффициенты полинома рассчитаны по средним значениям, а после проверены на весомость по критерию Стьюдента [5, 6]. В итоге была получена модель вида:

$$E_{cp}(h, w) = 878,56 - 149,795 \cdot w. \quad 2)$$

Проверка адекватности модели выполнена по критерию Фишера. Его расчетное и табличное значения составили соответственно 1,98 и 9,1 для доверительной вероятности 95 %. Таким образом, полученное уравнение (2) с достаточной точностью описывает наблюдаемые результаты численных экспериментов. Для зависимости  $E_{\max/cp} = F_2(h, w)$  применялся аналогичный подход, но статистическое влияние  $d$  и  $w$  на отношение максимальной напряженности к средней не удалось установить подтвердить.

Из анализа полученных результатов следует, что ширина шпаций влияет на средний уровень напряженности электрического поля намного сильнее высоты прокладок. При этом коэффициент неоднородности практически не меняется и остается недопустимо высоким, что не позволяет рекомендовать применение рассмотренного способа укладки на практике, не смотря на другие его преимущества. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение закономерностей распределения параметров электромагнитного поля для других вариантов укладки штабелей в рабочей камере.

#### Список источников

1. Болдырев, П.В. Сушка древесины: Практическое руководство / П.В. Болдырев – СПб.: Проффикс, 2002. – 156 с.
2. Качанов, А. Н. Исследование распределения электромагнитного поля при высокочастотной сушке древесины / А. Н. Качанов, Д. А. Коренков.
3. Качанов, А. Н. Анализ факторов, влияющих на параметры электромагнитного поля в древесине при высокочастотной сушке / А. Н. Качанов, Д. А. Коренков.
4. Шевляков, Д.Э. Исследование режимов работы силовых ВЧ генераторов с переменной емкостной нагрузкой / Шевляков Д. Э., Шевляков Дм.Э., Коренков Д.А.
5. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике. / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Коплов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
6. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. / А.А. Спиридонов – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

#### References

1. Boldyrev, P.V. Drying wood: A practical guide / P.V. Boldyrev – St. Petersburg: Profiks, 2002. – 156 s.
2. Kachanov, A. N. Investigation of the distribution of the electromagnetic field during high-frequency drying of wood / A. N. Kachanov, D. A. Korenkov.
3. Kachanov, A. N. Analysis of factors affecting the parameters of the electromagnetic field in wood during high-frequency drying / A. N. Kachanov, D. A. Korenkov.
4. Shevlyakov, D.E. Investigation of operating modes of power RF generators with variable capacitive load / Shevlyakov D. E., Shevlyakov Dm.E., Korenkov D.A.
5. Ivobotenko, B.A. Experiment planning in electromechanics. / B.A. Ivobotenko, N.F. Ilyinsky, I.P. Kopylov. – M.: Energiya, 1975. – 184 s.
6. Spiridonov, A.A. Experiment planning in the study of technological processes. / A.A. Spiridonov – M.: Mashinostroenie, 1981. – 184 s.

#### Информация об авторах

Д.Э. Шевляков – магистрант;

Д.А. Коренков – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения.

#### Information about the authors

D. E. Shevlyakov – undergraduate;

D. A. Korenkov – candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department.

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 10.11.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 19 - 22.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 19 - 22.

Энергосберегающие электротехнологические процессы и установки в машиностроении,  
металлургии и других отраслях экономики

Научная статья  
УДК 674.047.3-047.58

### **Численный анализ математической модели кинетики процесса вакуумно-высокочастотной сушки**

**Дмитрий Андреевич Коренков**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,  
dimas.corenkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

*Аннотация.* В статье рассмотрен один из вариантов анализа математической модели, описывающей кинетику процесса вакуумно-высокочастотной сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов на примере древесины. Для анализа модели использованы численные методы в программной среде Mathcad.

*Ключевые слова:* вакуумно-высокочастотная сушка, кинетика сушки, численное моделирование.

*Для цитирования:* Коренков Д.А. Численный анализ математической модели кинетики процесса вакуумно-высокочастотной сушки // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 19 - 22.

Energy-saving electrotechnological processes and installations in mechanical engineering,  
metallurgy and other sectors of the economy

Original article

### **Numerical analysis of mathematical model of vacuum-high-frequency drying process kinetics**

**Dmitry Andreevich Korenkov**

Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia  
[dimas.corenkov@yandex.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0221-1963>

*Abstract.* The article considers one of the options for analyzing a mathematical model describing the kinetics of the vacuum-high-frequency drying process of capillary-porous colloidal materials using wood as an example. You use numerical methods in Mathcad to analyze your model.

*Keywords:* vacuum high-frequency drying, drying kinetics, numerical modeling.

*For citation:* Korenkov D.A. Analysis of possible configurations of working chambers during high frequency drying of wooden support blanks // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 19 - 22.

В настоящее время вопросы эффективного контроля и управления различными электротехнологическими процессами не теряют своей актуальности, поскольку их решение позволяет достигнуть роста качества выпускаемой продукции при одновременном сокращении издержек производства. К таким процессам, требующим совершенствования методов автоматического регулирования, можно отнести вакуумно-высокочастотную сушку различных капиллярно-пористых коллоидных материалов, в том числе и древесины [1].

Для решения задачи разработки эффективных методов управления процессом удаления влаги из материалов необходимы математические модели, адекватно описывающие явления тепломассопереноса и тепломассобмена. Предыдущие исследования позволили получить математическое описание динамики изменения полей температуры и влагосо-

держания с учетом изменения параметров внешней среды [2, 3]. Однако для построения системы управления более удобным является применение модели в кинетической постановке в виде системы уравнений относительно средних значений температуры  $T_{cp}$  и влагосодержания материала  $u_{cp}$  с учетом удельной мощности внутренних источников теплоты  $Q_v$ :

$$\frac{dT_{cp}}{dt} = (1 - \xi(T_{cp}, u_{cp})) \frac{Q_v(T_{cp}, u_{cp})}{C(T_{cp}, u_{cp}) \cdot \rho_0}; \quad (1)$$

$$\frac{du_{cp}}{dt} = -\xi(T_{cp}, u_{cp}) \frac{Q_v(T_{cp}, u_{cp})}{\rho_0 \cdot r(T_{cp})}; \quad (2)$$

$$Q_v(T_{cp}, u_{cp}) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(T_{cp}, u_{cp}) \operatorname{tg} \delta(T_{cp}, u_{cp}) E^2, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – плотность материала в сухом состоянии;  $r$  – удельная теплота парообразования,  $\xi$  – критерий фазового превращения,  $C$  – теплоемкость материала,  $f$  – рабочая частота ВЧ генератора,  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  – диэлектрические свойства материала. Более подробное описание приведенной математической модели, а также допущения, сделанные при её составлении, приведены в работе [4].

Совместное решение системы уравнений (1) - (3) ввиду нелинейности зависимостей теплофизических и диэлектрических свойств от температуры и влагосодержания для большинства материалов возможно численными методами. В простейшем случае аппроксимация производных в (1) и (2) конечно-разностными аналогами позволит вычислить значения сеточных функций температуры и влагосодержания в узлах сетки. При этом сначала необходимо вычислить температуру на текущем шаге по времени, а затем использовать это значение для коррекции свойств материала при определении значения влагосодержания на том же шаге:

$$T_{cp}^i = T_{cp}^{i-1} + \Delta t \cdot (1 - \xi(T_{cp}^{i-1}, u_{cp}^{i-1})) \frac{Q_v(T_{cp}^{i-1}, u_{cp}^{i-1})}{C(T_{cp}^{i-1}, u_{cp}^{i-1}) \cdot \rho_0}, \quad (4)$$

$$u_{cp}^i = u_{cp}^{i-1} - \Delta t \cdot \xi(T_{cp}^i, u_{cp}^{i-1}) \frac{Q_v(T_{cp}^{i-1}, u_{cp}^{i-1})}{\rho_0 \cdot r(T_{cp}^i)}, \quad (5)$$

где  $\Delta t$  – шаг по времени.

С учетом промежуточной коррекции свойств материала алгоритм расчета будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

Алгоритм был реализован в математической среде Mathcad. Расчеты проводились для древесины хвойной породы с начальным влагосодержанием 0,58 кг/кг при начальной температуре 20 °С. Параметры источника: частота  $f = 27$  МГц, напряжение рабочего конденсатора 130 В при межэлектродном расстоянии 5 см. Время сушки задавалось равным 4 ч. Результаты численного анализа модели (1) - (3) показаны на рисунке 2.

Полученные результаты в целом соответствуют усредненным значениям полей температуры и влагосодержания, вычисленным для соответствующих моментов времени с помощью более совершенных моделей, учитывающих пространственные волновые эффекты, а также результатам экспериментальных исследований [5]. Следовательно, система уравнений (1)-(3) может быть использована для дальнейших исследований, направленных на поиск эффективных алгоритмов управления процессами высокочастотной и вакуумно-

высокочастотной сушки различных материалов и построение соответствующих оптимальных регуляторов.

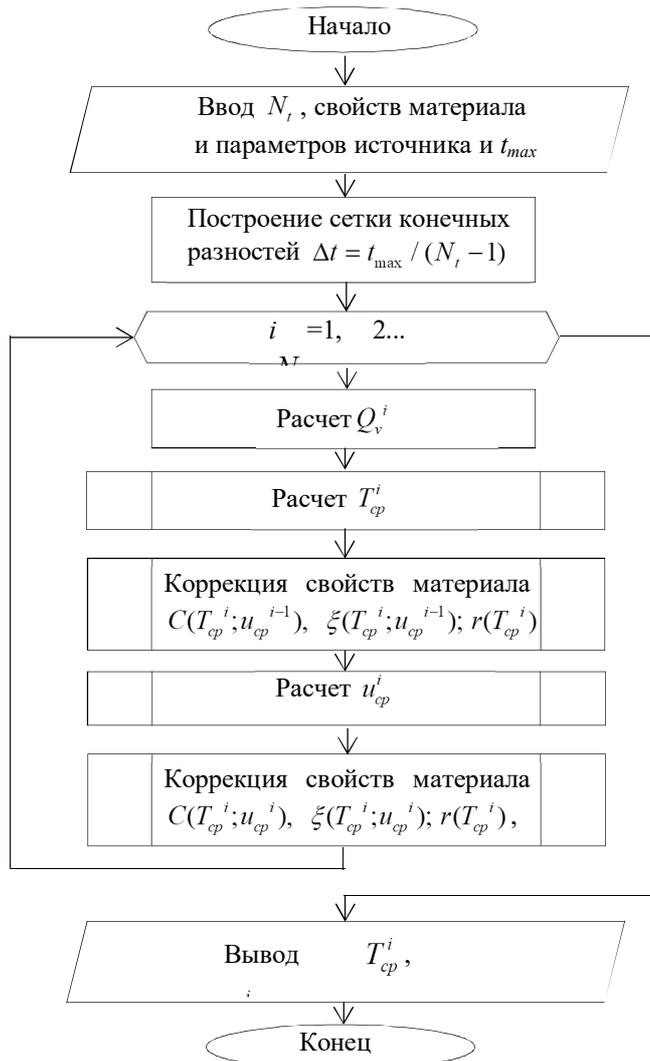


Рисунок 1 – Алгоритм численного анализа математической модели (1)-(3)

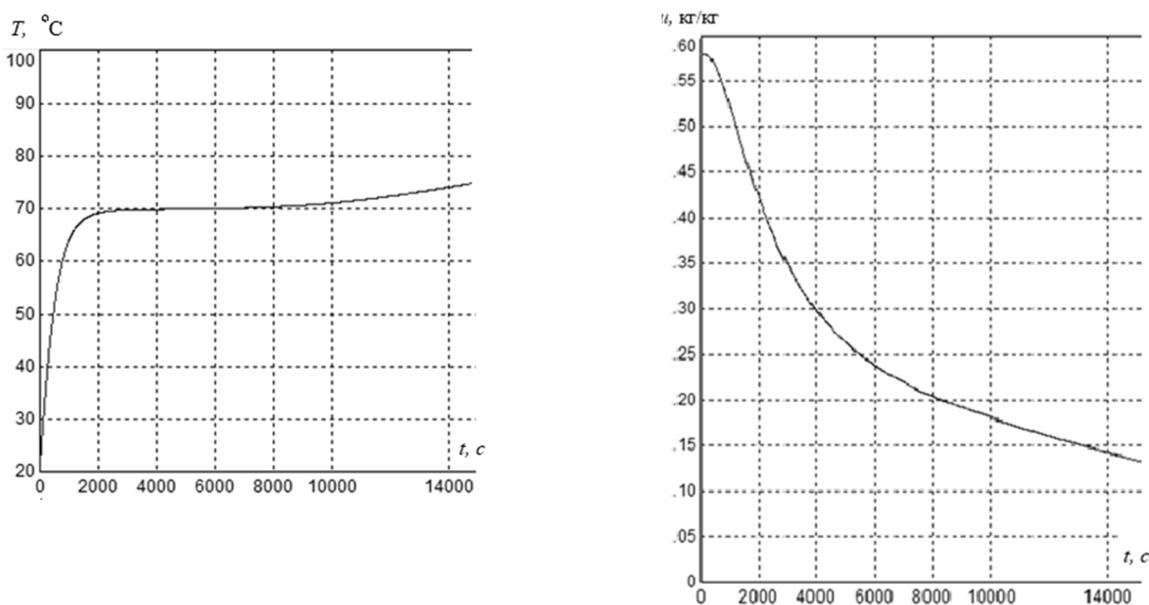


Рисунок 2 – Результаты численного анализа математической модели (1)-(3)

### Список источников

1. Качанов А.Н., Королева Т.Г., Щербаков А.В. Проблемы энергосбережения при вакуумно-диэлектрическом способе сушки древесины на деревообрабатывающих предприятиях // Энергоэффективность и энергобезопасность на промышленных предприятиях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства: Труды всероссийского научно-практического семинара 24-25 марта 2010 г., г. Салават. Уфа: АНРБ, Гилем. 2010. С. 133-137.
2. Kachanov A.N., Korenkov D.A., Revkov A.A., Vorkunov O.V., Maksimov V.V. High-frequency drying processes simulation of wooden tangent towers in a vacuum chamber. International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP, 2021. pp. 11-20. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9_2).
3. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Математическая модель для исследования процессов вакуумно-высокочастотной сушки древесины // Промышленная энергетика. 2020. № 9. С. 33-38.
4. Коренков Д.А., Ревякин В.О. Подход к моделированию кинетики вакуумно-высокочастотной сушки // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 470-473.
5. Liu H.H., Yang L., Cai Y., Hayashi K., Li K. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying // BioResources. 2014. Vol. 9. № 2. P. 3064-3076.

**Коренков Дмитрий Андреевич**, канд. техн. наук., доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения» ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»; 302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95; e-mail: [dimas.corenkov@yandex.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru).

### References

1. Kachanov A.N., Koroleva T.G., Shcherbakov A.V. Problems of energy saving in the vacuum-dielectric method of drying wood at woodworking enterprises // Energy efficiency and energy security at industrial enterprises of industry and housing and communal services: Proceedings of the All-Russian scientific and practical seminar March 24-25, 2010, Salavat. Ufa: ANRB, Gilem. 2010. P. 133-137.
2. Kachanov A.N., Korenkov D.A., Revkov A.A., Vorkunov O.V., Maksimov V.V. High-frequency drying processes simulation of wooden tangent towers in a vacuum chamber. International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP, 2021. pp. 11-20. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86047-9_2).
3. Kachanov A.N., Korenkov D.A. Mathematical model for the study of vacuum-high-frequency wood drying processes/Industrial energy. 2020. № 9. P. 33-38.
4. Korenkov D.A., Revyakin V.O. Approach to modeling the kinetics of vacuum-high-frequency drying//Information technologies in electrical engineering and the electric power industry: materials of the 12th All-Union. scientific-technical conf. - Cheboksary: Publishing House Chuvash. un-ta, 2020. P. 470-473.
5. Liu H.H., Yang L., Cai Y., Hayashi K., Li K. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying // BioResources. 2014. Vol. 9. № 2. P. 3064-3076.

### Информация об авторах

Д.А. Коренков – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения.

### Information about the authors

D.A. Korenkov – candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department.

Статья поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 13.11.2023.

The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 13.11.2023.

## СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ

Руководитель:

**Качанов Александр Николаевич**, академик АЭН Российской Федерации, Заслуженный работник высшего образования Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор, зав. каф. электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

Научная статья

УДК 621.333

### Исследование внешних магнитных проводимостей электрической машины с поперечным потоком

**Виктор Николаевич Антипов<sup>1</sup>, Андрей Дмитриевич Грозов<sup>2</sup>,  
Анна Владимировна Иванова<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> ФГБУН Институт химии силикатов РАН (ИХС РАН), Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> bht@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4110-0564>

<sup>2</sup> a\_grozov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2383-8300>

<sup>3</sup> iann57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1307-276X>

Автор, ответственный за переписку: Виктор Николаевич Антипов, bht@mail.ru

**Аннотация.** Конструкция электрических машин с поперечным потоком позволяет реализовать более высокие плотности крутящего момента за счет разделения, в отличие от электрических машин с продольным потоком, пространства для размещения обмотки и для пути магнитного потока. Недостатки машин с поперечным потоком ограничивают их промышленное применение, в связи с чем разрабатываются процедуры проектирования и предлагаются рациональные решения. Выполнено исследование потоков рассеяния синхронной машины с постоянными магнитами и поперечным потоком для децентрализованной энергетики путем численного расчета электромагнитного поля. Для анализа выбран трехфазный синхронный генератор мощностью 5,0 кВт, напряжением 400 В, частотой вращения 150 мин<sup>-1</sup>. Показано принципиальное различие потока рассеяния полюса ротора в машинах с поперечным и продольным потоками. В отличие от традиционных конструкций синхронных машин с продольным потоком, боковой поток рассеяния полюса ротора попадает на статор и участвует в создании электродвижущей силы, т.е. определяет значение числа витков обмотки. Представлено сравнение магнитных потоков полученных моделированием магнитного поля и предложенным расчетом. Выполнено сопоставление результатов при различной оценке внешних проводимостей. Выбраны методы расчета внешних магнитных проводимостей, которые дают близкое совпадение с результатами численного расчета электромагнитного поля. Для проектирования рекомендована методика с откорректированным расчетом внешних магнитных проводимостей. Традиционный расчет дает такие же размеры магнитов и значения ЭДС холостого хода, практически идентичные внешние характеристики генераторов при разном числе витков обмотки и может быть использован для сравнительных оценок.

**Ключевые слова:** поперечный магнитный поток, постоянные магниты, синхронные ветрогенераторы, расчет внешних магнитных проводимостей, анализ параметров.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках Госзадания ИХС РАН (тема № 0081-2022-0007).

**Для цитирования:** Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Исследование внешних магнитных проводимостей электрической машины с поперечным потоком // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 23 - 28.

## Investigation of external magnetic conductivities of an electric machine with a transverse flux

Victor Nikolaevich Antipov<sup>1</sup>, Andrey Dmitrievich Grozov<sup>2</sup>, Anna Vladimirovna Ivanova<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences (ICH S RAS), Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> bht@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4110-0564>

<sup>2</sup> a\_grozov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2383-8300>

<sup>3</sup> iann57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1307-276X>

Corresponding author: Victor Nikolaevich Antipov, bht@mail.ru

**Abstract.** The design of electric machines with a transverse flux allows for higher torque densities due to the separation, unlike electric machines with a longitudinal flow, of space for the placement of the winding and for the path of the magnetic flux. The disadvantages of cross-flux machines limit their industrial application, and therefore design procedures are being developed and rational solutions are being proposed. In this paper, the scattering fluxes of a synchronous machine with permanent magnets and a transverse flux for decentralized energy are studied by numerical calculation of the electromagnetic field. A three-phase synchronous generator with a power of 5.0 kW, a voltage of 400 V and a rotation speed of 150 min<sup>-1</sup> was selected for analysis. The fundamental difference between the scattering flux of the rotor pole in machines with transverse and longitudinal fluxes is shown. Unlike traditional designs of synchronous machines with a longitudinal flux, the lateral scattering flux of the rotor pole falls on the stator and participates in the creation of an electromotive force, i.e. determines the value of the number of winding turns. A comparison of the magnetic fluxes obtained by modeling the magnetic field and the proposed calculation is presented. A comparison of calculations with different estimates of external conductivities has been performed. Methods for calculating external magnetic conductivities are selected, which give a close match with the results of numerical calculation of the electromagnetic field when calculating magnetic fluxes. For the design of electric machines with a transverse flux, a method with a corrected calculation of external magnetic conductivities is recommended. At the same time, the traditional calculation gives the same magnet sizes and values of the no-load EMF, almost identical external generators characteristics with a different number of winding turns and can be used for comparative estimates.

**Keywords:** synchronous generator, permanent magnets, transverse flux, topology, decentralized energy.

**Acknowledgments:** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project 0081-2022-0007).

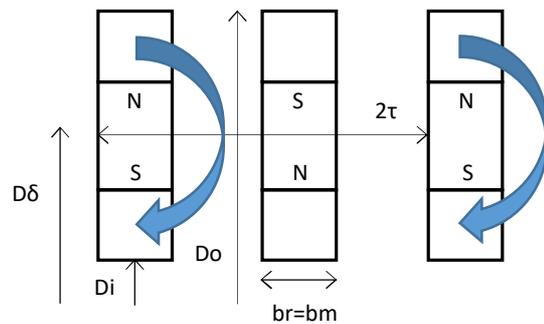
**For citation:** Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Investigation of external magnetic conductivities of an electric machine with a transverse flux // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 23 - 28.

Введение. Синхронные электрические машины с поперечным потоком все чаще предлагаются для ветроэнергетики, поскольку позволяют реализовать более высокие плотности крутящего момента за счет разделения, в отличие от электрических машин с продольным потоком, пространства для размещения обмотки и для пути магнитного потока. Недостатки машин с поперечным потоком – сложность производства, низкий коэффициент мощности, большие потоки рассеяния, высокая пульсация крутящего момента – ограничивают их промышленное применение. Тем не менее, в последнее время эти недостатки преодолеваются различными конструктивными решениями [1, 2], разработкой процедуры проектирования и анализа сложных 3D-геометрий, поиском рациональных решений и соотношения геометрических размеров.

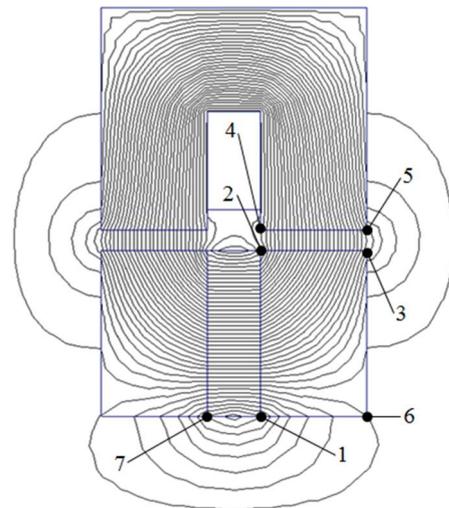
Для децентрализованной ветроэнергетики применяется топология с концентрацией магнитного потока, которая считается более эффективной, чем топология с радиальными магнитами. Наиболее рациональной является топология, в которой намагничивание происходит по длине магнита, длина магнита равна ширине обмотки, а зубец статора расположен по радиусу ротора. В [3] предложено иметь две обмотки, в которых индуктируются ЭДС от потоков четных и нечетных полюсов и которые соединены встречно. Это решение следует отметить как весьма прогрессивное. Рассматриваемая далее топология представлена на рисунке 1.

Для проектирования машин с поперечным потоком важное значение имеют потоки рассеяния. Ранее потоки рассеяния ротора определялись традиционно по [5] как проводимости рассеяния магнита  $\lambda_{sm}$  и проводимости рассеяния полюсов  $\lambda_{sp}$ , каждая из которых складывается из проводимостей бокового и торцевого рассеяния. Цель работы – уточнение потоков рассеяния электрической машины с поперечным потоком на основе численного двумерного моделирования электромагнитного поля. Для дальнейшего анализа выбран трехфазный синхронный генератор мощностью 5,0 кВт, напряжением 400 В, частотой вращения  $150 \text{ мин}^{-1}$ . Расчеты выполнены для одной фазы. Трехфазная машина получается путем сборки трех модулей, в котором магниты сдвинуты на 120 градусов. Размеры магнитопровода машины: длина магнита  $l_m=10 \text{ мм}$ , ширина магнита  $b_m=20 \text{ мм}$ , высота магнита  $h_m=32 \text{ мм}$ , длина ротора  $L_r=50 \text{ мм}$ , высота статора  $H_{st}=43 \text{ мм}$ , длина и ширина сечения ротора  $l_{cr}=b_{cr}=b_m$ , длина сечения статора  $l_{cs}=l_{cr}$ , ширина сечения статора  $b_{cs}=b_{cr}=b_m$ .

Распределение векторного магнитного потенциала показано на рисунке 2. Полученные значения магнитных потоков в обозначенных точках сведены в табл. 1.



**Рисунок 1 – топология с намагничиванием по длине магнита, равной ширине обмотки и расположению зубца статора по радиусу ротора**



**Рисунок 2 – Распределение векторного магнитного потенциала в генераторе с поперечным потоком ( $l_m=10 \text{ мм}$ ,  $b_m=20 \text{ мм}$ ,  $h_m=32 \text{ мм}$ )**

**Таблица 1 – Значения магнитных потоков, полученные численным моделированием**

Магнитные потоки	$\Phi_m$ (1-2)	$\Phi_{rot}$ (2-3)	$\Phi_\delta$ (4-5)	$\Phi_{spb}$ (1-6)	$\Phi_{smb}$ (1-7)	$\Phi_{spsb}$ (3-6)	$\Phi_N$
Значения, мВб	0,3962	0,2812	0,2698	0,0652	0,0252	0,0488	0,3300

В отличие от традиционных конструкций синхронных машин с продольным потоком, боковой поток рассеяния полюса ротора  $\Phi_{spsb}$  попадает на статор и участвует в создании электродвижущей силы, т.е. определяет значение числа витков обмотки.

Расчет проводимостей рассеяния выполнен по [5], а именно:  
проводимость рассеяния магнита боковая

$$G_{smb} = k_t \mu_0 b_m;$$

проводимость рассеяния полюса ротора боковая как проводимость между прямоугольными поверхностями, лежащими в одной плоскости

$$G_{sprb} = b_{cr} \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{\pi l_{cr}}{l_m} \right);$$

проводимость рассеяния полюса ротора боковая на статор как проводимость между прямоугольными призмами между боковыми поверхностями при совпадении осей

$$G_{sprsb} = 3,7\mu_0 (l_{cs} + b_{cs}) \frac{h_m}{h_m + \delta};$$

общая проводимость потоков по воздуху составляет

$$G = 2G_{smb} + G_{sprb} + 0,5G_{\delta} + 0,25G_{sprsb};$$

проводимость потоков рассеяния по воздуху

$$G_s = 2G_{smb} + G_{sprb}.$$

На диаграмму размагничивания магнита (рисунок 3) наносятся характеристики внешних проводимостей  $G$  и  $G_s$  (крутизна наклона к оси  $H$  равна  $K = Gl_m / S_m$ ), что позволяет определить индукцию размагничивания и необходимые для расчета магнитные потоки.

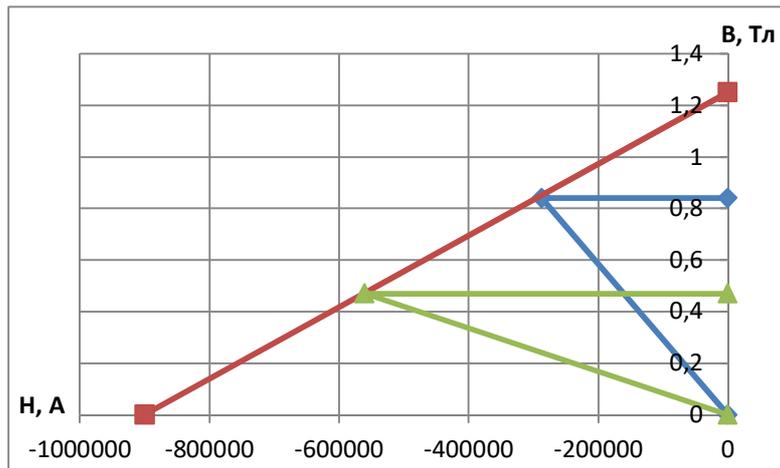


Рисунок 3 – К расчету магнитных потоков по внешним проводимостям

Сопоставление магнитных потоков, полученных моделированием магнитного поля и предложенным расчетом, представлено в табл. 2, там же приведены результаты моделирования и расчета модельного генератора с поперечным потоком мощностью 150 Вт (размеры магнитопровода:  $l_m=12$  мм,  $b_m=12$  мм,  $h_m=17$  мм,  $L_r=36$  мм,  $H_{sr}=28$  мм). Результаты сопоставления позволяют откорректировать расчет электрической машины с поперечным потоком по предложенным расчетам внешних проводимостей.

Таблица 2 – Сопоставление магнитных потоков, полученных моделированием магнитного поля и предложенным расчетом

Генераторы	5,0 кВт			0,15 кВт		
	ЭМП	$G_2$	$\Delta\%$	ЭМП	$G_2$	$\Delta\%$
$B_m$ , Т	0,762	0,740	-2,9	0,956	0,890	-6,9
$\Phi_m$ , мВб	0,4876	0,4736	-2,9	0,1951	0,1816	-6,9
$\Phi_{\delta}$ , мВб	0,2698	0,2634	-2,4	0,0916	0,0875	-4,5
$B_{\delta}$ , Т	0,675	0,659	-2,4	0,636	0,608	-4,4
$\Phi_N$ , мВб	0,3300	0,3075	-6,9	0,1167	0,1166	-0,1
$B_N$ , Т	0,825	0,769	-6,8	0,810	0,810	0

Для трехмерного поля необходимо учесть торцевые потоки рассеяния.

Проводимость рассеяния торцевая магнита равна

$$G_{smt} = k_t \mu_0 h_m.$$

Проводимость рассеяния полюса ротора торцевая рассчитывается как проводимость между прямоугольными поверхностями, лежащими в одной плоскости [5]:

$$G_{spst} = h_m \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{2 \left( l_{cr} + \sqrt{l_{cr}^2 + l_{cr} l_m} \right)}{l_m} \right).$$

Проводимость рассеяния полюса статора боковая рассчитывается как проводимость между прямоугольными призмами между боковыми поверхностями при совпадении осей

$$G_{spst} = 3,7 \mu_0 (l_{cs} + b_{cs}) \frac{h_m}{h_m + \delta}.$$

Программа электромагнитного расчета генератора с поперечным потоком была откорректирована в соответствии с вышеизложенными изменениями проводимостей и потоков. Результаты, полученные при сопоставлении расчетов, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Сопоставление результатов расчетов при различной оценке внешних проводимостей

Генераторы	5,0 кВт			0,15 кВт		
Методики	[5]	[4]	Δ%	[5]	[4]	Δ%
Φ <sub>δ</sub> , мВб	0,3019	0,4406	45,9	0,1097	0,1023	-6,75
Φ <sub>с</sub> , мВб	0,1540	1,166	657,0	0,0433	0,1306	201,62
N	86	59	-31,3	82	85	3,66
E <sub>0</sub> , В	230	230	0	24	24	0
U, о.е.	0,948	0,967	2,0	0,943	0,928	-1,59

Для одинаковых размеров магнитов при расчетах получены одинаковые значения ЭДС холостого хода и практически идентичные внешние характеристики генераторов при разном числе витков обмотки. Основное отличие и весьма существенное заключается в величине потоков рассеяния. Для сравнения на рисунке 3 показаны диаграммы магнитов сравниваемых расчетов.

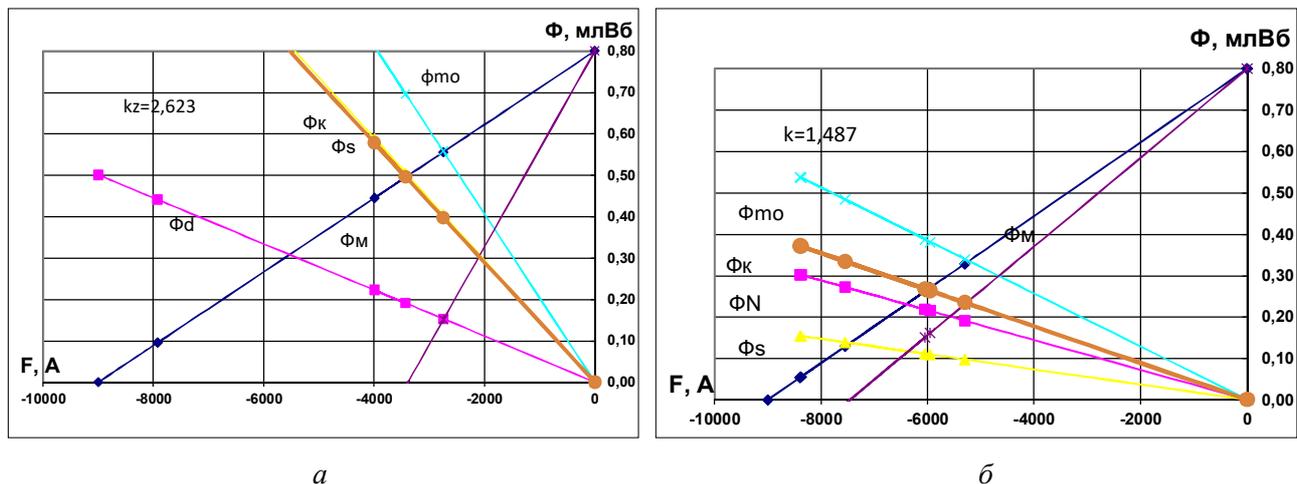


Рисунок 3 – Диаграммы магнитов синхронного генератора 5 кВт:

а) расчет внешних проводимостей по [4], б) расчет внешних проводимостей по [5].

Таким образом, неоткорректированная методика может использоваться для оценочных расчетов и сопоставления вариантов, тогда как для проектирования методика должна быть скорректирована с учетом вышеизложенного материала.

Заключение. В отличие от традиционных конструкций синхронных машин с продольным потоком, в электрической машине с поперечным потоком боковой поток

рассеяния полюса ротора на статор участвует в создании электродвижущей силы, т.е. определяет значение числа витков обмотки.

Выбранные методы расчета внешних магнитных проводимостей для машины с поперечным потоком дают близкое совпадение с результатами численного расчета электромагнитного поля.

Для проектирования электрических машин с поперечным потоком рекомендуется методика с откорректированным расчетом внешних магнитных проводимостей.

Вместе с тем традиционный расчет дает такие же размеры магнитов и значения ЭДС холостого хода, практически идентичные внешние характеристики генераторов при разном числе витков обмотки и может быть использован для сравнительных оценок.

#### **Список источников**

1. Soleimani E.J., Vahedi A. Review in Transverse Flux Permanent Magnet Generator Design // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. 2016. Vol. 12. No. 4. P. 257-269. DOI: 10.22068/IJEEE.12.4.257.
2. Ballestín-Bernad V., Artal-Sevil J. S., Domínguez-Navarro J. A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design // Energies. 2021. Vol. 14, 7173.
3. Ajamloo A.M., Nasiri-Zarandi R., Ghaheri A. Design and Optimization of a New TFPM Generator with Improved Torque Profile // Proc. 34th International Power System Conference (PSC2019). 2019. P. 106-112.
4. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 324 с.
5. Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. 2-е изд. М.: Энергия, 1980.

#### **References**

1. Soleimani E.J., Vahedi A. Review in Transverse Flux Permanent Magnet Generator Design // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. 2016. Vol. 12. No. 4. P. 257-269. DOI: 10.22068/IJEEE.12.4.257.
2. Ballestín-Bernad V., Artal-Sevil J. S., Domínguez-Navarro J. A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design // Energies. 2021. Vol. 14, 7173.
3. Ajamloo A.M., Nasiri-Zarandi R., Ghaheri A. Design and Optimization of a New TFPM Generator with Improved Torque Profile // Proc. 34th International Power System Conference (PSC2019). 2019. P. 106-112.
4. Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N. Permanent magnet electric generators. – Moscow: Energoatomizdat, 1988.
5. Al'tman A. B., Gerberg A. N., Gladyshev P. A. et al. Permanent Magnets: A Handbook / Pyatin, Yu.M, Ed., Moscow: Energiya, 1980.

#### **Информация об авторах**

В.Н. Антипов – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем химической энергетики;

А.Д. Грозов – научный сотрудник лаборатории проблем химической энергетики;

А.В. Иванова – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем химической энергетики.

#### **Information about the authors**

V.N. Antipov – Dr. of Sciences (Engineering), Leading scientist of Laboratory of chemical energy problems;

A.D. Grozov – Scientist of chemical energy problems laboratory;

A.V. Ivanova – PhD (Phys.-Math.), Senior scientist of chemical energy problems laboratory.

Статья поступила в редакцию 17.10.2023; одобрена после рецензирования 24.10.2023; принята к публикации 31.10.2023.

The article was submitted 17.10.2023; approved after reviewing 24.10.2023; accepted for publication 31.10.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 29 – 33.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 29 – 33.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья

УДК: 629.7.014:623.746.4-519:629.7.017.1:621.315-047.36

## **Использование транспозиции проводов для идентификации района аварийной посадки беспилотного летательного аппарата, осуществляющего мониторинг ЛЭП 10 кВ**

**Вадим Алексеевич Чернышов<sup>1</sup>, Максим Олегович Пригодский<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>blackseam78@mail.ru, [https:// orcid.org/0000-0002-5955-5540](https://orcid.org/0000-0002-5955-5540)

<sup>2</sup>prigodskymaks@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Пригодский Максим Олегович, prigodskymaks@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена совершенствованию мониторинга технического состояния воздушных линий электропередачи напряжением 10 кВ с использованием беспилотных летательных аппаратов. Рассматривается новое инженерно-техническое решение, основанное на использовании транспозиции проводов для идентификации района аварийной посадки беспилотного летательного аппарата, осуществляющего мониторинг воздушной линии электропередачи 10 кВ и способствующее успешности его аварийного приземления, отыскания и возвращения в строй.

**Ключевые слова:** Воздушная линия электропередачи 10 кВ, электромагнитное поле, транспозиция проводов, мониторинг, беспилотный летательный аппарат, потеря управления, аварийная посадка.

**Для цитирования:** Чернышов В.А. Использование транспозиции проводов для идентификации района аварийной посадки беспилотного летательного аппарата, осуществляющего мониторинг ЛЭП 10 кВ // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 29 – 33.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions for their development.

## **Using wire transposition to identify the emergency landing area of an unmanned aerial vehicle monitoring 10 kV power lines**

**Vadim Alekseevich Chernyshov<sup>1</sup>, Maxim Olegovich Prigodsky<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>blackseam78@mail.ru, [https:// orcid.org/0000-0002-5955-5540](https://orcid.org/0000-0002-5955-5540)

<sup>2</sup>prigodskymaks@gmail.com

Corresponding author: Prigodsky Maxim Olegovich, prigodskymaks@gmail.com

**Annotation.** The article is devoted to improving the monitoring of the technical condition of 10 kV overhead power lines using unmanned aerial vehicles. A new engineering and technical solution is being considered, based on the use of wire transposition to identify the emergency landing area of an unmanned aerial vehicle that monitors a 10 kV overhead power line and contributes to the success of its emergency landing, search and return to service.

**Keywords:** 10 kV overhead power line, electromagnetic field, wire transposition, monitoring, unmanned aerial vehicle, loss of control, emergency landing.

**For citation:** Chernyshov V.A. Using wire transposition to identify the emergency landing area of an unmanned aerial vehicle monitoring 10 kV power lines // Energy and resource saving – XXI century. 2023. P. 29 – 33.

Учитывая тот факт, что практика применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в отечественной электроэнергетике только набирает обороты, имеющиеся данные о потерях БПЛА носят разрозненный характер и не позволяют объективно утверждать, что, на

сегодняшний день, проблема потери гражданских БПЛА является актуальной.

Однако стремительное развитие индустрии беспилотников, открывает перед ними все новые и новые функциональные возможности, обуславливающие для них все более широкое применение, при этом количество инцидентов, связанные с утерей БПЛА, вероятнее всего будет увеличиваться пропорционально активности и массовости их использования [1, 2].

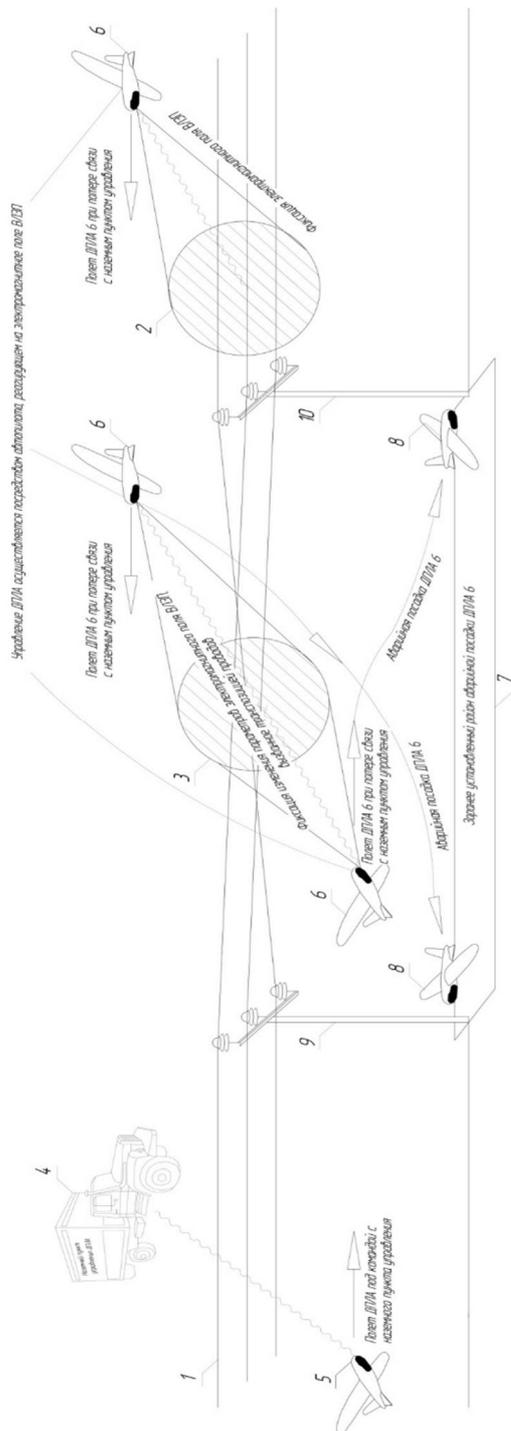
В настоящее время в ПАО «Россети», в рамках крупномасштабной программы «Цифровая трансформация» интеграция БПЛА в технологический процесс становится с каждым днем более заметной [3]. Беспилотники используются для мониторинга технического состояния воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) разного класса напряжения, в том числе и для ВЛЭП 10 кВ, проходящих по населенным пунктам, удаленным лесным районам и территориям сельскохозяйственного назначения [4].

Учитывая, тот факт, что данные летательные аппараты несут на своем борту дорогостоящее спецоборудование (спутниковые навигаторы, видеокамеры оптического диапазона, фотоаппараты оптического диапазона; тепловизоры, а также детекторы напряженности электромагнитного поля), вероятность потенциальной потери БПЛА должна быть сведена к минимуму [5]. Кафедра электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» активно работает в данном направлении и на сегодняшний день имеет в своем активе несколько схмотехнических решений, позволяющих в случае потери БПЛА связи с наземным пунктом управления (НПУ) использовать параметры электромагнитного поля (ЭМП) ВЛЭП 10 кВ для сопровождения его в заранее установленный район аварийной посадки (ЗУРАП) с измененными параметрами ЭМП [6-9]. Одно из них, позволяет реализовать режим аварийной посадки БПЛА в ЗУРАП, находящемся на участке ВЛЭП 10 кВ, имеющим транспозицию проводов [7].

Суть предполагаемого инженерно-технического решения поясняется чертежом (см. рисунок 1) на котором представлена принципиальная схема способа завершения полета ДПЛА в ЗУРАП при осуществлении им мониторинга состояния ВЛЭП 10 кВ и потере связи с наземным пунктом управления (НПУ). На рисунке представлены следующие элементы: ВЛЭП 1; ЭМП 2 с параметрами X1, формируемое ВЛЭП 1 до транспозиции проводов; ЭМП 3 с параметрами X2, формируемое ВЛЭП 1 после транспозиции проводов; НПУ 4; БПЛА 5, осуществляющий мониторинг состояния ВЛЭП 1 по команде с НПУ 4; БПЛА 6, потерявший связь с НПУ 4 и пилотируемый посредством автопилота, реагирующего на ЭМП 2 и ЭМП 3, формируемые ВЛЭП 1; ЗУРАП 7 БПЛА 6; БПЛА 8, осуществивший аварийную посадку в ЗУРАП 7; опоры 9 и 10 ВЛЭП 1, образующие пролет ВЛЭП 1 с транспозицией проводов, находящийся в центре ЗУРАП 7 ДПЛА 6 и разделяющий ВЛЭП 1 на участки, характеризующиеся отличием параметров ЭМП 2 и ЭМП 3.

Принцип работы предлагаемого инженерно-технического решения заключается в следующем. По всей длине ВЛЭП 1 предварительно организуется необходимое количество ЗУРАП 7, в центральной части которых между двух опор 9 и 10 формируют пролет с транспозицией проводов, разделяющий ВЛЭП 1 на участки, характеризующиеся различными параметрами ЭМП 2 и ЭМП 3. БПЛА 5 осуществляющий мониторинг состояния ВЛЭП 1 с установленной с НПУ 4 скоростью, при потере связи с НПУ 4, условно принимает статус БПЛА 6 и продолжает свое движение вдоль ВЛЭП 1 с той же скоростью, уже под управлением автопилота, чувствительные органы которого контролируют параметры ЭМП 2 (ЭМП 3) ВЛЭП 1. При подлете БПЛА 6 к любому из оказавшихся на его пути пролетов ВЛЭП 1, на котором происходит изменение параметров ЭМП 2 (ЭМП 3), его автопилот отрабатывает заранее установленную команду на приземление в ЗУРАП 7. После приземления в ЗУРАП 7, БПЛА 6, потерявший связь с НПУ 4 условно принимает статус приземлившегося БПЛА 8. При этом с НПУ 4 контролируют продолжительность полета БПЛА 6 с установленной скоростью до потери связи и вычисляют пройденное им расстояние вдоль трассы ВЛЭП 1 в штатном режиме, что позволяет идентифицировать первоочередной, на пути его дальнейшего следования, ЗУРАП 7, а также установить время аварийного

приземления БПЛА 8. Далее направляют в ЗУРАП 7 персонал НПУ 4 для оперативного возвращения в строй БПЛА 8.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема способа завершения полета ДПЛА в ЗУРАП при осуществлении им мониторинга состояния ВЛЭП 10 кВ и потере связи с НПУ**

Предлагаемый способ позволяет снизить риск утраты БПЛА 5 в случае потери связи с НПУ 4, а также оперативно и экономично идентифицировать место его аварийного приземления. Способ также позволяет предотвратить травматизм и материальный ущерб, связанные с неконтролируемым полетом и приземлением ДПЛА 5, что в значительной степени повышает эффективность его применения при осуществлении мониторинга состояния ВЛЭП 1, что в целом положительно скажется на надежности электроснабжения потребителей и эффективности функционирования электросетевой компании.

Однако, несмотря на то, что предлагаемое инженерно-техническое решение позволяет обойтись без существенных капитальных вложений и эксплуатационных затрат (за счет

использования существующей инфраструктуры ВЛЭП 10 кВ), оно имеет и некоторые недостатки, которые могут в дальнейшем ограничивать масштабность его применения. Это обусловлено тем, что место изменения взаимного расположения проводов отдельных фаз по длине ВЛЭП 10 кВ определяется на основании инженерных расчетов [10], которые не учитывают рельеф местности, особенности грунта, а также наличие вблизи трассы ВЛЭП 10 кВ населенных пунктов и агропромышленных предприятий. Вследствие чего, место транспозиции проводов не всегда может удовлетворять требованиям аварийной посадки БПЛА. Поэтому авторы данной публикации намерены продолжать научно-исследовательскую работу, направленную на отыскание новых способов, повышающих эффективность использования БПЛА при мониторинге ВЛЭП 10 кВ, в том числе способствующих обеспечению успешности аварийного приземления, отыскания и возвращения в строй БПЛА.

#### Список источников

1. Быков, А. И. К некоторым вопросам правового регулирования полетов беспилотных летательных аппаратов на территории российской федерации / А.И. Быков // Вестник ВГУ. Серия: Право. – 2018. № 4. – С. 194-199
2. Быков А.И. Риски, вызванные массовым использованием беспилотных летательных аппаратов, для уголовно-исполнительной системы // Вестник института: преступление, наказание, исправление. – 2018. № 2 (42). – С. 66 - 70.
3. Концепция цифровая трансформация 2030 [Электронный ресурс]. file:///C:/Users/pc/Desktop/Kontsepsiya\_Tsifrovaya\_transformatsiya\_2030.pdf (дата обращения: 13.11.2023).
4. Беляев, П.В. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при контроле и диагностике объектов энергетики / П. В. Беляев, А. П. Головский, Д. С. Садаев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. Том 7, № 2. – Омск: Издательство ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет». – С. 18-24
5. Косова А. Е., Кориков А. М. Применение видеочамер на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для задач автоматического определения координат БПЛА // Электронные средства и системы управления: материалы XII Междунар. науч. практ. конф. Томск, 2016. С. 32–34.
6. Чернышов, В.А. Способ управления беспилотным летательным аппаратом, осуществляющим мониторинг технического состояния ВЛ 10 кВ при потере радиосвязи с наземным пунктом управления / В.А. Чернышов, А.Е. Семенов, Е.А. Печегин // В.И. Вернадский: Устойчивое развитие регионов: материалы Международной научно-практической конференции. В 5 Т.Т.4 (Тамбов, 7-9 июня 2016 г.). Изд-во ФГБОУ ВО ТГТУ. 2016. С.247-251
7. Пат. 2785445 РФ, МПК G05D 1/10, B64C 39/02, G01R 29/08. Способ завершения полета дрона в установленном районе аварийной посадки при осуществлении мониторинга состояния воздушной линии электропередачи в случае потери связи с наземным пунктом управления / Качанов А. Н., Печегин, Е. А., Беспалов А. В.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ОГУ имени И.С. Тургенева". № 2021138020; заявл. 20.12.2021; опубл. 08.12.2022. – 8 с.
8. Пат. 2805304 РФ, МПК G05D 1/10, B64C 39/02, G01R 29/08. Способ обеспечения аварийной посадки беспилотного летательного аппарата в заданном районе при выполнении мониторинга воздушной линии электропередачи и потери связи с наземным пунктом управления / Качанов А. Н., Беликов Р.П., Беспалов А. В.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ОГУ имени И.С. Тургенева". № 2021138021; заявл. 20.12.2021; опубл. 20.06.2023. – 8 с.
9. Колубанов, И.В. Использование магнитного поля воздушной линии электропередачи напряжением 10 кВ для аварийного управления беспилотным летательным аппаратом / И.В. Колубанов, В.А. Чернышов, А.А. Гребенников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: Научно – технический журнал. – 2023. – №1(357). – Орел: Издательство ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева. – С. 66-71. – 186 с.
10. Закарюкин, В.П. Учет транспозиции проводов при моделировании электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Лэ Ван Тхао // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Научный

### References

1. Bykov, A.I. On some issues of legal regulation of flights of unmanned aerial vehicles on the territory of the Russian Federation / A.I. Bykov // Vestnik VSU. Series: Law. – 2018. No. 4. – P. 194-199
2. Bykov A.I. Risks caused by the massive use of unmanned aerial vehicles for the penal system // Bulletin of the Institute: crime, punishment, correction. – 2018. No. 2 (42). – P. 66 - 70.
3. Concept of digital transformation 2030 [Electronic resource]. file:///C:/Users/pc/Desktop/Kontseptsiya\_Tsifrovaya\_transformatsiya\_2030.pdf (access date: 13/10/2023).
4. Belyaev, P.V. Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in monitoring and diagnostics of energy facilities / P. V. Belyaev, A. P. Golovsky, D. S. Sadaev // Dynamics of systems, mechanisms and machines. – 2019. Volume 7, No. 2. – Omsk: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Omsk State Technical University”. – pp. 18-24
5. Kosova A. E., Korikov A. M. Application of video cameras on board unmanned aerial vehicles (UAVs) for the tasks of automatic determination of UAV coordinates // Electronic means and control systems: materials of the XII Intern. scientific pract. conf. Tomsk, 2016. pp. 32–34.
6. Chernyshov, V.A. A method for controlling an unmanned aerial vehicle that monitors the technical condition of a 10 kV overhead line in the event of loss of radio communication with a ground control point / V.A. Chernyshov, A.E. Semenov, E.A. Pechagin // V.I. Vernadsky: Sustainable development of regions: materials of the International scientific and practical conference. In 5 T.T.4 (Tambov, June 7-9, 2016). Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education TSTU. 2016. P.247-251
7. Pat. 2785445 RF, IPC G05D 1/10, B64C 39/02, G01R 29/08. A method for completing a drone flight in a designated emergency landing area when monitoring the state of an overhead power line in case of loss of communication with a ground control point / Kachanov A. N., Pechagin, E. A., Bepalov A. V.; patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "OSU named after I.S. Turgenev". No. 2021138020; application 12/20/2021; publ. 12/08/2022. – 8 s.
8. Pat. 2805304 RF, IPC G05D 1/10, B64C 39/02, G01R 29/08. A method for ensuring an emergency landing of an unmanned aerial vehicle in a given area when monitoring an overhead power line and loss of communication with a ground control point / Kachanov A. N., Belikov R. P., Bepalov A. V.; Patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "OSU named after I.S. Turgenev". No. 2021138021; application 12/20/2021; publ. 06/20/2023. – 8 s.
9. Kolubanov, I.V. Using the magnetic field of a 10 kV overhead power line for emergency control of an unmanned aerial vehicle / I.V. Kolubanov, V.A. Chernyshov, A.A. Grebennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology: Scientific and technical journal – 2023. – No. 1 (357). – Orel: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “OSU named after. I.S. Turgenev. – P. 66-71. – 186 p.
10. Zakaryukin, V.P. Taking into account the transposition of wires when modeling electromagnetic fields created by high-voltage power lines / V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, Le Van Thao // Information and mathematical technologies in science and management: Scientific peer-reviewed periodical journal. – 2016. – No. 2. – Irkutsk: Publishing house of the Federal State Budgetary Institution “ISEM SB RAS”. – pp. 71-79.

### Информация об авторах

В.А. Чернышов – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения.  
М.О Пригодский – студент бакалавриата.

### Information about the authors

V.A. Chernyshov – candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department.  
M.O. Prigodsky – undergraduate student.

Статья поступила в редакцию 11.11.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 11.11.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК 621.333

**Сравнение различных топологий электрических машин с поперечным потоком**

**Виктор Николаевич Антипов<sup>1</sup>, Андрей Дмитриевич Грозов<sup>2</sup>,  
Анна Владимировна Иванова<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> ФГБУН Институт химии силикатов РАН (ИХС РАН), Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> bht@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4110-0564>

<sup>2</sup> a\_grozov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2383-8300>

<sup>3</sup> iann57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1307-276X>

Автор, ответственный за переписку: Виктор Николаевич Антипов, bht@mail.ru

**Аннотация.** Конструкция электрических машин с поперечным потоком позволяет реализовать более высокие плотности крутящего момента по сравнению с конструкциями машин с продольным потоком. В то же время широкое промышленное применение машин с поперечным потоком ограничено их недостатками (сложностью производства, низким коэффициентом мощности, большими потоками рассеяния, высокой пульсацией крутящего момента), для устранения которых в последнее время предложены различные рациональные решения. В настоящей работе выполнен сравнительный анализ параметров синхронной машины с постоянными магнитами и поперечным потоком двух топологий, предназначенных для децентрализованной энергетики. Выбранные топологии имеют концентрацию магнитного потока, что более эффективно, чем топология с радиальными магнитами. В первой топологии предусмотрено намагничивание по длине магнита, длина магнита равна ширине обмотки, зубец статора расположен по радиусу ротора. Во второй топологии предусмотрено намагничивание по ширине магнита, длина магнита равна длине ротора, зубец статора расположен со сдвигом на полюсное деление. Для сравнительного анализа проведен электромагнитный расчет трехфазного синхронного генератора мощностью 5,0 кВт, напряжением 400 В, частотой вращения 150 мин<sup>-1</sup> для обеих топологий при широком изменении входных переменных. Сопоставление расчетных данных в диапазоне изменения диаметров 580-600 мм показало, что топологии имеют практически одинаковые числа витков обмотки, т.е. равный расход меди, и практически одинаковые коэффициенты магнитного потока в зазоре. Вторая топология проигрывает первой по расходу материалов магнитов и магнитопроводов. При внешнем диаметре 580 мм сравнение показывает преимущества первой топологии по всем параметрам: КПД выше на 2,3%, меньше масса магнитов в 2,05 раза, масса магнитопровода в 1,98 раза, масса меди на 14%.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, постоянные магниты, поперечный поток, топология, децентрализованная энергетика.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках Госзадания ИХС РАН (тема № 0081-2022-0007).

**Для цитирования:** Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Сравнение различных топологий электрических машин с поперечным потоком // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 34 - 41.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development  
Original article

**Comparison of transverse flux electric machines different topologies**

**Victor Nikolaevich Antipov<sup>1</sup>, Andrey Dmitrievich Grozov<sup>2</sup>, Anna Vladimirovna Ivanova<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences (ICHs RAS), Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> bht@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4110-0564>

<sup>2</sup> a\_grozov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2383-8300>

<sup>3</sup> iann57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1307-276X>

Corresponding author: Victor Nikolaevich Antipov, bht@mail.ru

**Abstract.** The design of transverse flux electric machines makes it possible to realize higher torque densities compared to the designs of machines with longitudinal flux. However, the widespread industrial use of cross-flux machines is limited by their disadvantages, for the elimination of which various rational solutions have recently been proposed. In this paper, a comparative analysis of the parameters of a synchronous machine with permanent magnets and a transverse flux of two topologies designed for decentralized energy is performed. The selected topologies have a magnetic flux concentration, which is more efficient than the topology with radial magnets. In the first topology, magnetization along the length of the magnet is provided, the length of the magnet is equal to the width of the winding, the stator tooth is located along the radius of the rotor. In the second topology, magnetization is provided along the width of the magnet, the length of the magnet is equal to the length of the rotor, the stator tooth is located with a shift by pole division. For a comparative analysis, an electromagnetic calculation of a three-phase synchronous generator with a power of 5.0 kW, a voltage of 400 V, a rotation speed of  $150 \text{ min}^{-1}$  for both topologies with a wide change in input variables was carried out. Comparison of the calculated data in the diameter range of 580-600 mm showed that the topologies have almost the same number of winding turns, i.e. equal copper consumption, and almost the same magnetic flux coefficients in the gap. The second topology is inferior to the first in terms of the consumption of magnets and magnetic cores. With an external diameter of 580 mm, the comparison shows the advantages of the first topology in all parameters: The efficiency is 2.3% higher, the mass of magnets is 2.05 times less, the mass of the magnetic circuit is 1.98 times, the mass of copper is 14%.

**Keywords:** synchronous generator, permanent magnets, transverse flux, topology, decentralized energy.

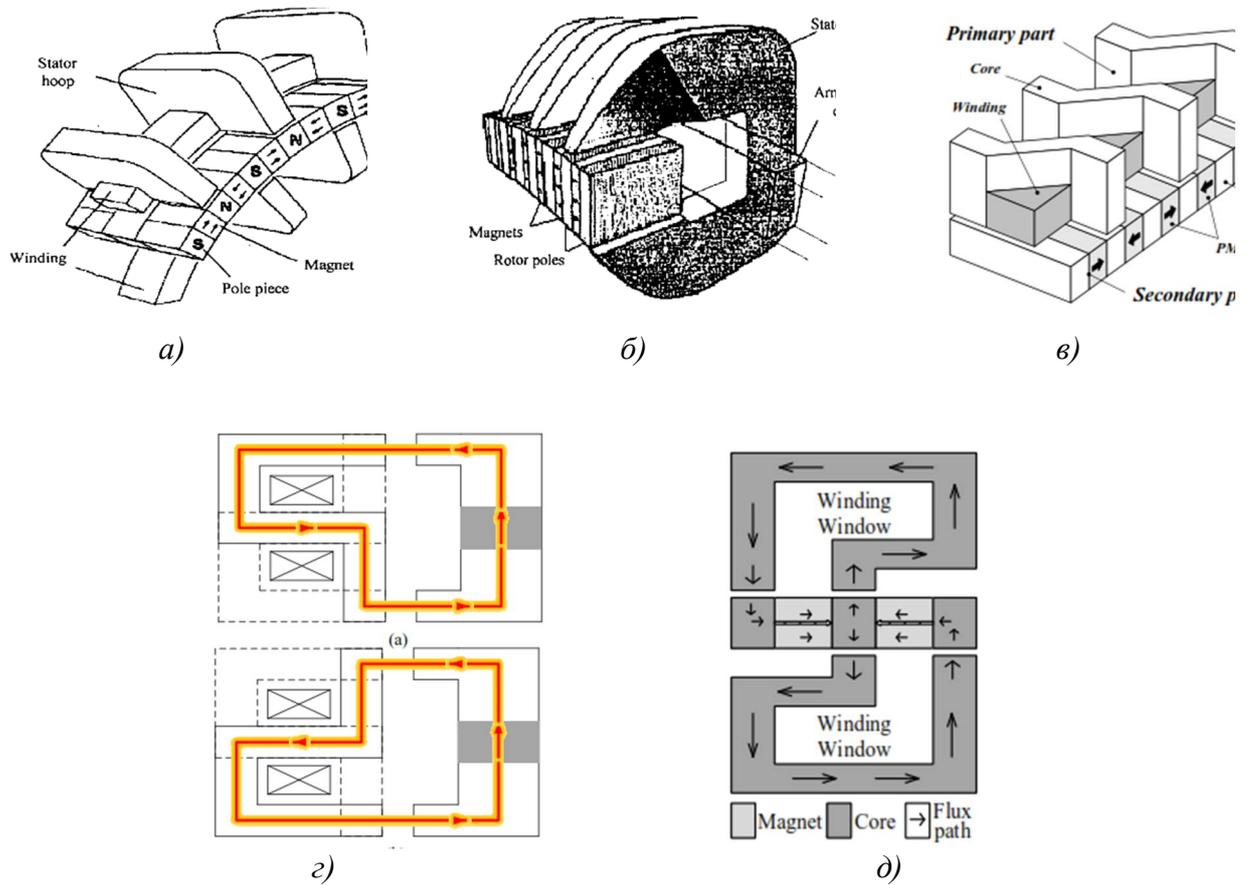
**Acknowledgments:** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project 0081-2022-0007).

**For citation:** Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Comparison of transverse flux electric machines different topologies // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 34 - 41.

Введение. Электрические машины с поперечным потоком предложены еще в 19 веке, но заметное развитие получили лишь через столетие. У машины с поперечным потоком направление магнитного потока перпендикулярно вращательному движению ротора и направлению тока, в связи с чем, в отличие от электрических машин с продольным потоком, пространства для размещения обмотки и для пути магнитного потока разделены, что позволяет реализовать более высокие плотности крутящего момента. Основной областью применения электрических машин с поперечным потоком является низкоскоростной электропривод, в частности, ветровые турбины и силовые установки транспортных средств. Промышленное применение машин с поперечным потоком ограничивают их недостатки – сложность производства, низкий коэффициент мощности, большие потоки рассеяния, высокая пульсация крутящего момента. Тем не менее, в последнее время предложены различные конструкции машин с поперечным потоком [1, 2], разработаны процедуры проектирования и анализа сложных 3D-геометрий, предложены рациональные решения и соотношения геометрических размеров.

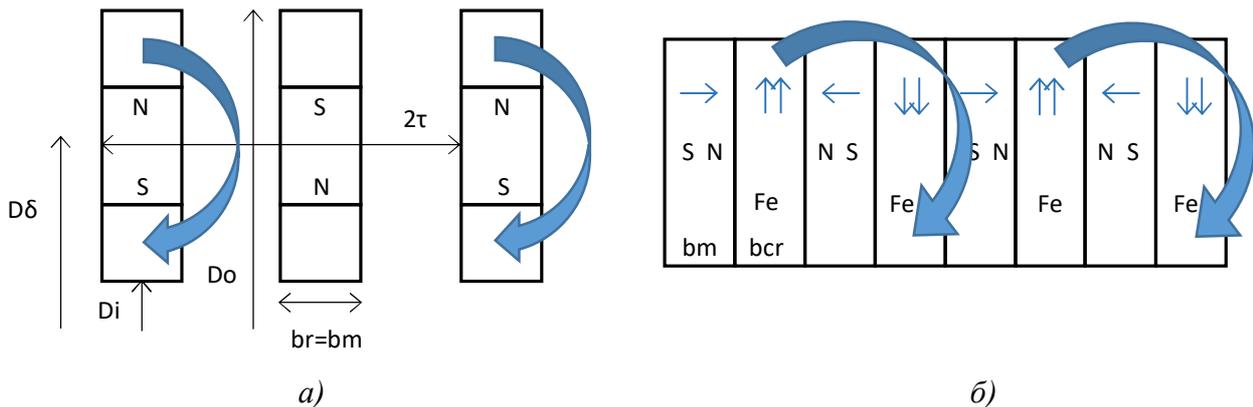
Целью настоящей работы является сравнительный анализ предложенных топологий синхронных электрических ветрогенераторов с поперечным потоком и выбор топологии, наиболее пригодной для децентрализованной ветроэнергетики.

Для анализа выбраны топологии, представленные на рисунке 1 [3-7]. Во всех указанных публикациях применяется топология с концентрацией магнитного потока, которая считается более эффективной, чем топология с радиальными магнитами. Расположение зубцов статора может быть двусторонним. Расположение магнитов может быть двояким: с намагничиванием по ширине магнита и размером равным длине ротора [3-4], с намагничиванием по длине магнита и размером равным ширине обмотки [6-7]. Зубец статора может располагаться по радиусу ротора либо со сдвигом на полюсное деление [3]. В [5] предложено иметь две обмотки, в которых индуктируются ЭДС от потоков четных и нечетных полюсов и которые соединены встречно. Это решение следует отметить как весьма прогрессивное. В [6-7] для уменьшения потоков рассеяния установлены дополнительные ортогональные магниты, однако эффективность такого решения невелика [8].



**Рисунок 1 – Различные топологии электрических машин с поперечным потоком:**  
 а), б) – [3], в) – [4], г) – [5], д) – [6-7].

Таким образом, для анализа следует выбрать два варианта. Топология 1 – намагничивание по длине магнита, длина магнита равна ширине обмотки. Зубец статора расположен по радиусу ротора. Топология 2 – намагничивание по ширине магнита, длина магнита равна длине ротора, зубец статора расположен со сдвигом на полюсное деление.



**Рисунок 2 – Топологии, выбранные для сравнения**  
 а) – топология 1, б) – топология 2.

Для этих вариантов магнитные потоки и индукции определяются через геометрические размеры (высоту, ширину и длину магнита  $h_m$ ,  $b_m$ ,  $l_m$ ; высоту, ширину и длину сердечника ротора  $h_{cr}$ ,  $b_{cr}$ ,  $l_{cr}$ ; высоту, ширину и длину сердечника статора  $h_{cs}$ ,  $b_{cs}$ ,  $l_{cs}$ ) следующим образом:

	Топология 1	Топология 2
Поток магнита	$\Phi_m = B_r h_m b_m$	$\Phi_m = B_r h_m l_m$
Поток на поверхности ротора	$\Phi_{r0} = B_{\delta 0} h_{cr} b_{cr}$	$\Phi_{r0} = B_{\delta 0} l_{cr} b_{cr}$
Поток в зазоре	$\Phi_{\delta} = B_{\delta} l_{cs} b_{cs}$	$\Phi_{\delta} = B_{\delta} l_{cs} b_{cs}$
Индукция на поверхности ротора	$B_{\delta 0} = B_r \frac{b_m}{b_{cr}}$	$B_{\delta 0} = B_r \frac{h_m}{b_{cr}}$
Индукция в зазоре	$B_{\delta} = B_{\delta 0} k_{\sigma}$	$B_{\delta} = B_{\delta 0} k_{\sigma}$

Индукция на поверхности ротора определяется из равенства потоков  $\Phi_m = \Phi_{r0}$ , причем для топологии 1  $h_m = h_{cr}$ , для топологии 2  $l_m = l_{cr}$ . Индукция в зазоре определяется через коэффициент рассеяния  $k_{\sigma} = \frac{\lambda_m}{\lambda_m + 2\lambda_{sm}}$  [9, 10]. Ранее было установлено [8], что для получения высокого коэффициента мощности отношение ширины магнита к полюсному делению должно быть равным 0,4 ( $\varepsilon = \frac{b_m}{\tau} = 0,4$ ). Величина  $\tau$  определяется выбором внешнего диаметра и числа пар полюсов.

	Топология 1	Топология 2
Внешний диаметр		$D_o$
Внутренний диаметр	$D_i = D_o - 2l_m - 4l_{cr}$	$D_i = D_o - 2l_m$
Расчетный диаметр ротора по зазору		$D_{\delta} = 0,5D_o (D_o - D_i)$
Полюсное деление		$\tau = \frac{\pi D_{\delta}}{2p}$

Необходимое число витков обмотки определяется через ЭДС для момента времени, когда ее мгновенное значение соответствует максимальному

$$N = \frac{E_{rms} \sqrt{2} - r_1 I}{2\pi f \Phi_{\delta}} = \frac{E_{rms}}{4,44 f \Phi_{\delta}},$$

а площадь обмотки равна  $S_w = \frac{I_n}{aj_{per} k_{fil}} = l_w h_w = l_w^2 k_h$ , где  $I_n$  – номинальный ток,  $j_{per}$  – допустимая плотность тока,  $N$  – число эффективных проводников, коэффициенты:  $k_{fil}$  – учитывающий заполнение паза,  $k_h = h_w / l_w$ .

Тогда размер обмотки  $l_w = \sqrt{\frac{I_n k_{iz} N}{aj_{per} k_{fil} k_h}}$ , который по топологии должен быть равным размеру магнита  $l_w = l_m$ , позволяет определить коэффициент  $k_h$ :

$$k_h = \frac{I_n N \left( \frac{B_r}{B_d} - 1 \right)^2}{aj_{per} k_{fil} k_h \delta^2 \mu_{pm}^2}.$$

Геометрические размеры магнитов и ферромагнитных частей определяются следующим образом:

	Топология 1	Топология 2
Ширина магнита		$b_m = \tau \varepsilon$
Длина магнита	$l_m = \frac{B_\delta}{B_r} 2\delta \mu_r$	$l_m = L_r$
Высота магнита	$h_m$ – варьируемый параметр для получения необходимой внешней характеристики	
Длина сечения ротора	$l_{cr} = b_{cr} = b_m$	$l_{cr} = b_{cr} = b_m$
Ширина сечения ротора	$b_{cr} = b_m$	$b_{cr} = \tau(1 - \varepsilon)$
Длина сечения статора	$l_{cs} = l_{cr}$	$l_{cs} = b_{cr}$
Ширина сечения статора		$b_{cs} = b_{cr}$
Высота статора		$H_{st} = l_{cs} + h_w + h_k = 1$
Длина статора	$L_{st} = L_r$	$L_{st} = 2l_{cs} + \sqrt{\tau^2 + (L_r - 2l_{cs})^2}$
Высота ротора		$H_r = h_m$
Длина ротора	$L_r = 2l_{cr} + l_m$	$L_r = l_m$

Для сравнительного анализа проведен электромагнитный расчет трехфазного синхронного генератора мощностью 5,0 кВт, напряжением 400 В, частотой вращения 150 мин<sup>-1</sup> для обеих выбранных топологий. Расчеты выполнены для одной фазы. Трехфазная машина получается путем сборки трех модулей, в которых магниты сдвинуты на 120 градусов.

В табл. 1 сопоставлены параметры двух топологий, выполненных на диаметре 640 мм при вариации длиной магнита в топологии 1 и вариации длиной сердечника статора в топологии 2. Данные табл. 1 и 2 получены при значении плотности тока 4,25 А/мм<sup>2</sup> ( $d=1,6$  мм<sup>2</sup>).

Сопоставление данных табл. 1 показывает, что для обеих топологий требуются практически одинаковые числа витков обмотки, т.е. равный расход меди, и практически одинаковые коэффициенты магнитного потока в зазоре. Топология 2 проигрывает топологии 1 по расходу материалов магнитов и магнитопроводов. Наилучшим вариантом для топологии 1 является вариант с длиной магнита 10 мм, а для топологии 2 – вариант с длиной сердечника статора 18 мм.

В табл. 2 приведены параметры этих топологий при изменении внешнего диаметра. Изменения масс магнитов и магнитопроводов, числа витков и КПД показаны на рисунке 3. В пределах изменения диаметров 580-600 мм они незначительны. Топология 1 по всем параметрам превосходит топологию 2. При внешнем диаметре 580 мм КПД выше на 2,3%, масса магнитов меньше в 2,05 раза, масса магнитопровода – в 1,98 раза, масса меди – на 14%.

Таблица 1 – Сравнение параметров двух топологий SGPM-TF-5-150-V1 при внешнем диаметре 640 мм

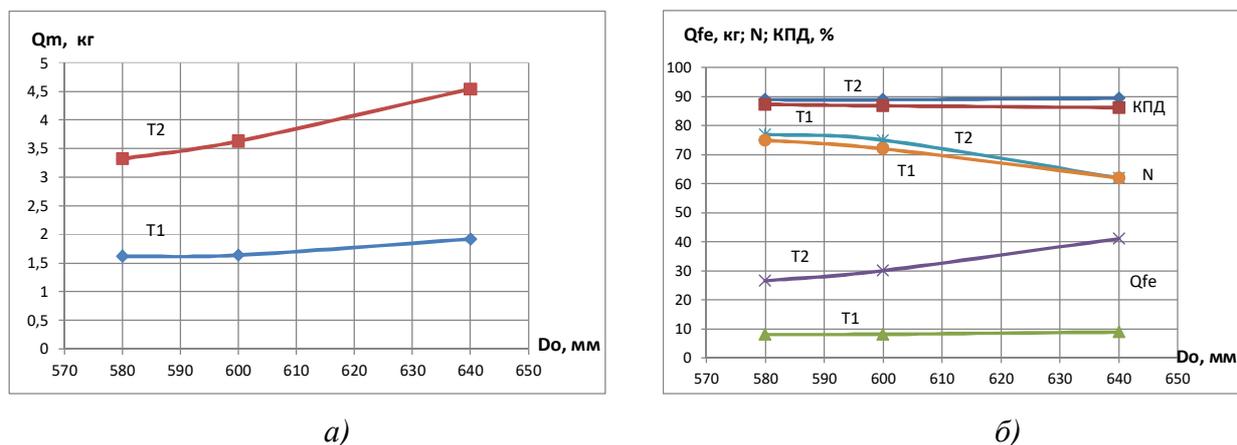
Параметры	Топология 1			Топология 2		
	E1	F1	G1	E2	F2	G2
$l_m$	10	8,0	12	45,0	45,0	45,0
$b_m$	20	18,6	18	18,7	18,7	18,7
$h_m$	32	28	35	18,0	18,0	18,0
$l_{cs}$	20	18,6	18	19,0	18,0	17,0
$b_{cs}$	20	18,6	18	28,0	28,0	28,0
$l_w$	10	8	12	7,0	9,0	11,0
$h_w$	18	24,8	16,8	28,6	22,4	18,6
$H_{st}$	43	48,4	39,8	78,6	72,4	68,6
$L_{st}$	50	45,2	48	85,3	103,7	103,7
$N$	58	62	61	62	62	62
КПД, %	89,5	89,3	88,9	86,2	86,8	87,3
$B_{\delta}$ , Т	1,107	1,208	1,758	0,778	0,821	0,870
$\sigma$ , о.е.	4,17	4,32	4,57	4,171	4,356	4,546
$U$ , о.е.	0,950	0,950	0,951	0,953	0,954	0,955
$I_k$ , о.е.	19,9	20,2	20,5	19,8	19,9	19,9
$Q_m$ , кг	1,92	1,25	2,27	4,54	4,54	4,54
$Q_{fes}$ , кг	11,98	11,31	9,26	33,98	33,48	30,78
$Q_{fer}$ , кг	7,99	6,04	7,08	7,09	7,09	7,086
$Q_{cu}$ , кг	2,10	2,07	2,04	2,09	2,09	2,09

\*все геометрические размеры в мм

Таблица 2 – Сравнение параметров двух топологий SGPM-TF-5-150-V1 при изменении внешнего диаметра

Параметры	Топология 1			Топология 2		
	E1	H1	I1	E2	H2	I2
$l_m$	10	10	10	45,0	36,0	34,0
$b_m$	20	17,1	16,9	18,7	17,7	17,2
$h_m$	32	32	32	18,0	19,0	19,0
$l_{cs}$	10	10	10	19,0	14,0	13,0
$b_{cs}$	20	17,1	16,9	28,0	26,6	25,7
$l_w$	10	10	10	7,0	8,0	8,0
$h_w$	20	25	25	28,6	30,3	30,3
$H_{st}$	35	40	40	78,6	71,3	69,3
$L_{st}$	30	30	30	85,3	95,6	92,3
$N$	62	75	77	62	72	75
КПД, %	0,894	0,889	0,889	86,2	86,8	87,3
$B_{\delta}$ , Т	2,103	2,008	2,001	0,778	0,967	1,028
$\sigma$ , о.е.	6,254	6,817	6,862	4,17	4,97	5,20
$U$ , о.е.	0,956	0,946	0,945	0,953	0,950	0,949
$I_k$ , о.е.	19,785	16,152	15,905	19,8	18,1	17,9
$Q_m$ , кг	1,92	1,64	1,62	4,54	3,63	3,32
$Q_{fes}$ , кг	4,99	4,80	4,75	33,98	24,41	21,38
$Q_{fer}$ , кг	3,99	3,41	3,37	7,09	5,67	5,19
$Q_{cu}$ , кг	2,11	2,09	2,05	2,09	2,28	2,31

\*все геометрические размеры в мм



**Рисунок 3 – Изменение параметров топологий T1 и T2 в зависимости от внешнего диаметра**

а) – масса магнитов; б) – КПД, число витков и масса магнитопровода.

**Закключение.** Для электрических машин с поперечным потоком на основе электромагнитных расчетов выполнено сравнение двух топологий: намагничивание по длине магнита, длина магнита равна ширине обмотки, зубец статора расположен по радиусу ротора (топология 1) и намагничивание по ширине магнита, длина магнита равна длине ротора, зубец статора расположен со сдвигом на полюсное деление (топология 2). Исследованы синхронные генераторы мощностью 5,0 кВт, напряжением 400 В, частотой вращения  $150 \text{ мин}^{-1}$  при широком изменении входных переменных.

Сравнение показывает преимущества топологии 1 по всем параметрам: при внешнем диаметре 580 мм, КПД выше на 2,3%, масса магнитов меньше в 2,05 раза, масса магнитопровода в 1,98 раза, масса меди на 14%.

#### Список источников

1. Soleimani E.J., Vahedi A. Review in Transverse Flux Permanent Magnet Generator Design // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. 2016. Vol. 12. No. 4. P. 257-269. DOI: 10.22068/IJEEE.12.4.257.
2. Ballestín-Bernad V., Artal-Sevil J.S., Domínguez-Navarro J.A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design // Energies. 2021. Vol. 14. 7173. DOI: 10.3390/en14217173.
3. Rang Y., Gu C., Li H. Analytical Design and Modeling of A Transverse Flux Permanent Magnet Machine // Proc. Power System Technology, 2002 (PowerCon 2002). Vol. 4. DOI:10.1109/ICPST.2002.1047165.
4. Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A. Design of a Lightweight Transverse Flux Permanent Magnet Machine for Direct-drive Wind Turbines // Proc. Industry Applications Society Annual Meeting. DOI:10.1109/08IAS.2008.71.
5. Ajamloo A.M., Nasiri-Zarandi R., Ghaheri A. Design and Optimization of a New TFPM Generator with Improved Torque Profile // Proc. 34th International Power System Conference (PSC2019). 2019. P. 106-112.
6. Husain T., Hasan I., Sozer Y. Design Considerations of a Transverse Flux Machine for Direct-Drive Wind Turbine Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. No. 4. P. 3604-3615. DOI: 10.1109/TIA.2018.2814979.
7. Hasan I., Husain T., Uddin M.W., Sozer Y., Husain I., Muljadi E. Analytical Modeling of a Novel Transverse Flux Machine for Direct Drive Wind Turbine Applications // Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2015. DOI:10.1109/ECCE.2015.7309965.
8. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Синхронная машина с поперечным потоком для децентрализованной ветроэнергетики // Сб. Энерго- и ресурсосбережение – XXI век : материалы XX международной научно-практической конференции. 2022. С. 54-62.
9. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

10. Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. 2-е изд. М.: Энергия, 1980.

### References

1. Soleimani E.J., Vahedi A. Review in Transverse Flux Permanent Magnet Generator Design // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. 2016. Vol. 12. No. 4. P. 257-269. DOI: 10.22068/IJEEE.12.4.257.
2. Ballestín-Bernad V., Artal-Sevil J.S., Domínguez-Navarro J.A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design // Energies. 2021. Vol. 14. 7173. DOI: 10.3390/en14217173.
3. Rang Y., Gu C., Li H. Analytical Design and Modeling of A Transverse Flux Permanent Magnet Machine // Proc. Power System Technology, 2002 (PowerCon 2002). Vol. 4. DOI:10.1109/ICPST.2002.1047165.
4. Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A. Design of a Lightweight Transverse Flux Permanent Magnet Machine for Direct-drive Wind Turbines // Proc. Industry Applications Society Annual Meeting. DOI:10.1109/08IAS.2008.71.
5. Ajamloo A.M., Nasiri-Zarandi R., Ghaheri A. Design and Optimization of a New TFPM Generator with Improved Torque Profile // Proc. 34th International Power System Conference (PSC2019). 2019. P. 106-112.
6. Husain T., Hasan I., Sozer Y. Design Considerations of a Transverse Flux Machine for Direct-Drive Wind Turbine Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. No. 4. P. 3604-3615. DOI: 10.1109/TIA.2018.2814979.
7. Hasan I., Husain T., Uddin M.W., Sozer Y., Husain I., Muljadi E. Analytical Modeling of a Novel Transverse Flux Machine for Direct Drive Wind Turbine Applications // Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2015. DOI:10.1109/ECCE.2015.7309965.
8. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Synchronous transverse flux machine for decentralized wind power // Proc. XX International Scientific and Practical conference "Energy and Resources saving XXI century". P. 54-62.
9. Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N. Permanent magnet electric generators. – Moscow: Energoatomizdat, 1988.
10. Al'tman A. B., Gerberg A. N., Gladyshev P. A. et al. Permanent Magnets: A Handbook / Pyatin, Yu.M. Ed., Moscow: Energiya, 1980.

### Информация об авторах

В.Н. Антипов – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем химической энергетики;  
А.Д. Грозов – научный сотрудник лаборатории проблем химической энергетики;  
А.В. Иванова – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем химической энергетики.

### Information about the authors

V.N. Antipov – Dr. of Sciences (Engineering), Leading scientist of Laboratory of chemical energy problems;  
A.D. Grozov – Scientist of chemical energy problems laboratory;  
A.V. Ivanova – PhD (Phys.-Math.), Senior scientist of chemical energy problems laboratory.

Статья поступила в редакцию 17.10.2023; одобрена после рецензирования 24.10.2023; принята к публикации 31.10.2023.

The article was submitted 17.10.2023; approved after reviewing 24.10.2023; accepted for publication 31.10.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 42 - 46.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 42 - 46.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК 620.92

**Анализ влияния на качество электрической энергии светодиодных светильников с  
драйверами управления низкого качества**

**Егор Сергеевич Андреев<sup>1</sup>, Леонид Владимирович Корбушов<sup>2</sup>,  
Татьяна Геннадьевна Королева<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>egorch23@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Егор Сергеевич Андреев, egorch23@yandex.ru

**Аннотация.** В статье проанализированы результаты исследований влияния осветительных приборов со светодиодными источниками света двух разных производителей на параметры качества электрической энергии.

**Ключевые слова:** светодиодные источники света, качество электрической энергии, драйвер, гармонические составляющие напряжения и тока.

**Для цитирования:** Андреев Е.С., Корбушов Л.В., Королева Т.Г. Анализ влияния на качество электрической энергии светодиодных светильников с дешёвыми драйверами управления // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 42 - 46.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development  
Original article

**Analysis of the impact on the quality of electrical energy of LED lamps with low-quality  
control drivers**

**Egor Sergeevich Andreev<sup>1</sup>, Leonid Vladimirovich Korbushov<sup>2</sup>,  
Tatiana Gennadievna Koroleva<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>egorch23@yandex.ru

Corresponding author: Andreev Egor Sergeevich, egorch23@yandex.ru

**Abstract:** The article analyzes the results of studies of the influence of lighting devices with LED light sources from two different manufacturers on the quality parameters of electrical energy.

**Key words:** LED light sources, electrical energy quality, driver, harmonic components of voltage and current.

**For citation:** Andreev E.S., Korbushov L.V., Koroleva T.G. analysis of the impact on the quality of electrical energy of led lamps with cheap control drivers // Energy and resource saving – XXI century. 2023. P. 42 - 46.

Введение. На нужды освещения зданий и учреждений приходится от 10 до 25 процентов потребляемой мощности [1]. В настоящее время массово происходит замена газоразрядных ламп на светодиодные. Это обосновано рядом преимуществ светодиодных осветительных приборов перед устройствами с газоразрядными лампами:

- экономичность;
- сохранение работоспособности в низких и высоких температурах (-55...+60 °С);
- высокий индекс цветопередачи;
- содержание токсичных компонентов сведено к минимуму.

Однако гармонические составляющие напряжения и тока, а также нелинейные характеристики драйверов осветительного оборудования, в большинстве случаев не учитываются при проектировании и модернизации системы электроснабжения, что приводит к наличию импульсных токов при коммутации светильников и уменьшению общего значения коэффициента мощности. Так светодиодные светильники с недорогими и низкокачественными блоками питания вызывают электромагнитные помехи, которые заглушают сигнал телефонной и радиосвязи.

К основным отрицательным чертам светодиодных источников света можно отнести:

- ускоренное высыхание конденсаторов и старение электропроводки, вследствие чего возникает необходимость принятия дополнительных мер по установке устройств для компенсации гармоник тока;

- импульсные помехи.

Значение токовых гармоник превышающее нормативное значение действующего ГОСТ 32144-2013, как правило приводит к перегрузке нулевого проводника (N) по причине суммирования третьей, шестой и девятой гармоник. [2,3]

Любая нелинейная нагрузка от импульсных источников питания вызывает генерацию нечётных высших гармоник из-за генерирования импульсов тока. [4] Известно, что гармонические составляющие токов возникают в сетях 220В и оказывают особое влияние на трехфазную сеть. Если в системе электроснабжения симметричная нагрузка на каждой фазе, то алгебраическая сумма токов в нулевом проводнике (N) равна нулю и угол сдвига фаз составляет 120 градусов. В трёхфазных сетях с нелинейной нагрузкой третья, шестая и девятая гармоники тока при совпадении фаз в нейтрали увеличивают ток в несколько раз, образуя нулевую последовательность [5].

Исследование присутствия гармонических составляющих напряжения и тока проводилось с помощью трехфазного анализатора, регистрирующий параметры качества электрической энергии PEL103. Экспериментальным методом были получены данные о генерировании гармоник напряжения и тока осветительными приборами PPO Jazzway 40W 4000K и E070 2.0 IP40 4000K фирмы VARTON мощностью 42 Вт.

Анализ каждой фазы щита освещения при коммутации светодиодных светильников проводился для следующих характеристик: напряжение фаз, фликер, изменение частоты питающей сети и др.

Так как в спектрах потребляемых лампами токов практически отсутствуют четные гармоники были получены и проанализированы графики  $n = 3, 5, 7$  и  $9$  высокочастотных гармонических составляющих тока и напряжения в процентах (рисунки 1 и 2).

Ниже приведены графики гармонических составляющих напряжения (рисунок 1) и гармонических составляющих тока (рисунок 2) при подключении в сеть осветительных установок со светодиодными (СД) источниками света.

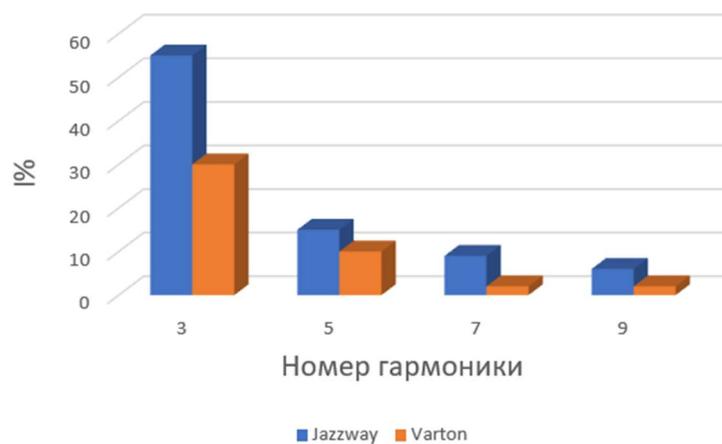
График на рисунке 1 наглядно показывает, небольшую разницу в 2% между третьей гармонической составляющей напряжения сети при использовании двух однотипных СД от разных производителей. Разница между гармоническими составляющими пятую и седьмую составляет менее 1%. Разница между девятой гармоникой тока и напряжения составляет более 1 %.

Анализ полученных результатов, показал, что разница между третьими гармоническими составляющими тока при включении в сеть СД согласно гистограмме, представленной на рисунке 2, составляет 25%. С увеличением порядкового номера гармоники – эта разница сокращается.

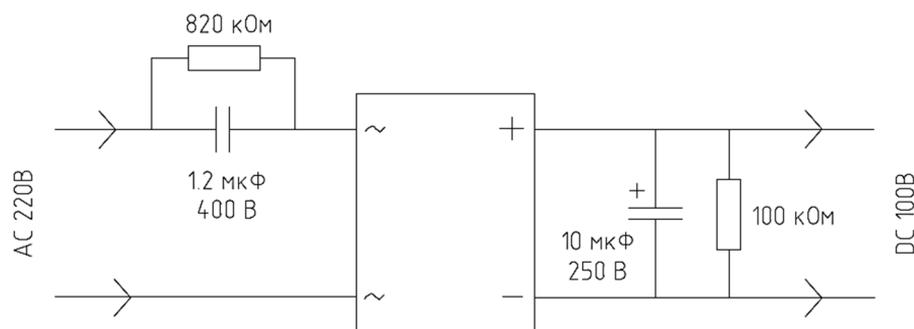
Данное распределение полученных значений объясняется разной схмотехникой систем управления осветительными приборами. Схемы управления светильниками фирмы Jazzway в которой отсутствует импульсный контроллер приведена на рисунке 3, а светильниками с импульсным драйвером фирмы Varton на рисунке 4.



**Рисунок 1 – Гистограммы гармонической составляющей напряжения в процентах**

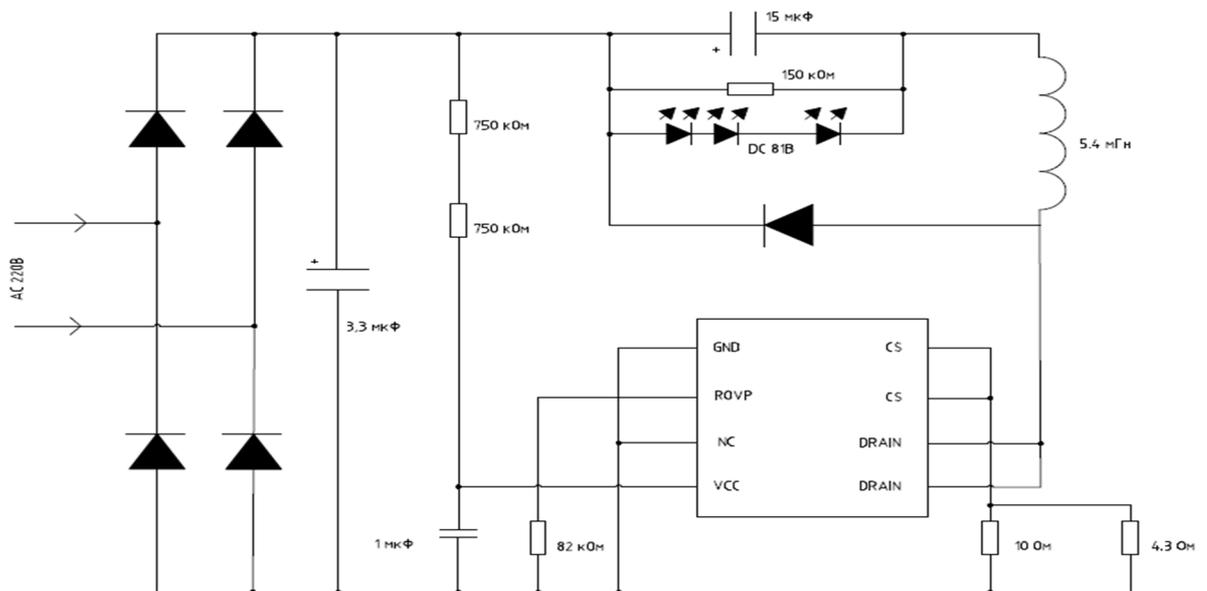


**Рисунок 2 – Гистограммы гармонической составляющей тока в процентах**

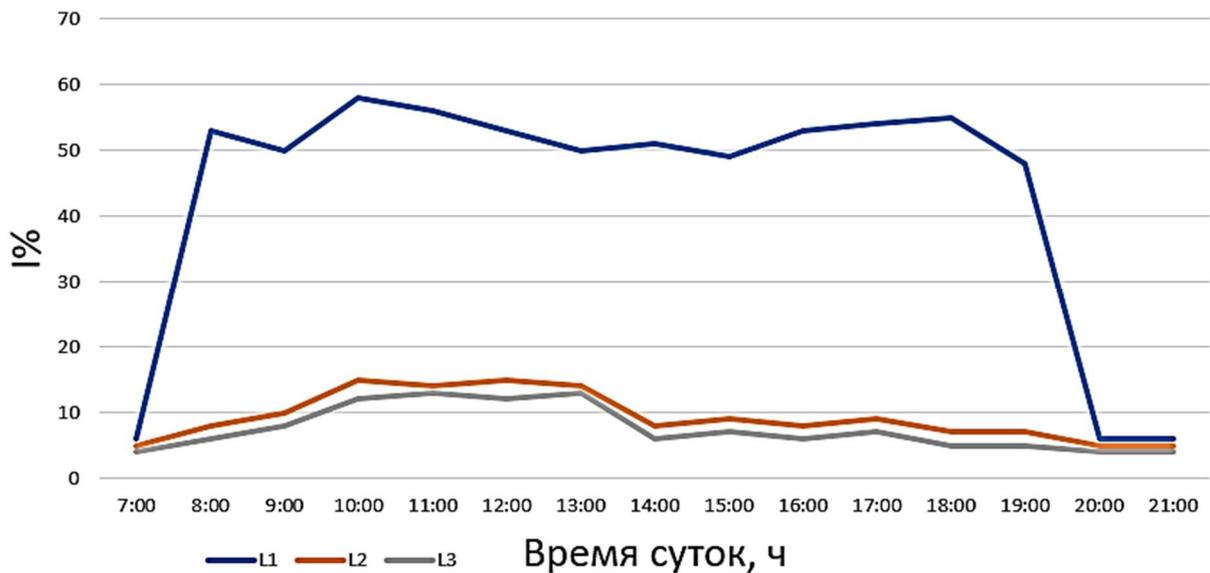


**Рисунок 3 – Схема управления (драйвера) светильником фирмы Jazzway**

Исследования качества электрической энергии проводились в сети питающей здание младшей школы города Озёры, Московская область. Вся осветительная нагрузка здания запитана от одной фазы (L1). Освещение школы выполнено светильниками РРО Jazzway 40W 4000K IP20. На основании полученных результатов построены графики изменения значений токовой гармонической составляющей в каждой фазе, представленные на рисунке 5.



**Рисунок 4 – Схема управления (драйвера) светильником фирмы Varton**



**Рисунок 5 – Динамика гармонической составляющей тока светодиодного светильника Jazzway в электрической сети здания школы**

Согласно анализу кривых рисунка 5, можно сделать вывод, что в начале рабочего дня (7:00) и до конца учебного процесса (18:00) гармоническая составляющая тока в заданном промежутке времени кратно возрастает. Гармоническая составляющая тока первой фазы (L1) на 25% выше, чем второй и третьей. Данное явление обусловлено отсутствием LC-фильтра в драйвере (плате управления) светодиодного светильника.

Таким образом, можно предположить, что вид осциллограммы токов (рис. 5), полученных при включении осветительных устройств, объясняется меньшей емкостью сглаживающего конденсатора на выходе диодного моста драйвера светильника компании Jazzway.

**Заключение.** Светодиодное осветительное оборудование с дешевыми драйверами, ухудшает качество электрической энергии, приводит к отклонению от нормативных значений параметров, указанных в государственном стандарте 32144-2013. Импульсные

источники питания и преобразователи приводят к искажению графиков амплитуды и среднеквадратического значения переменного напряжения, по причине потребления тока источником питания импульсным характером. Для решения данных проблем необходимо усовершенствование существующих на текущий момент времени методов проведения испытаний различного рода источников света светодиодного типа, и обязательное применение LC-фильтров импульсных помех.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Айзенберг, Ю. Б. Современные проблемы энергоэффективного освещения // Энергосбережение. – 2009. – № 1. – С. 42–48.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. Стандартинформ. 2014. 16 с.
3. Потапкин Н.Н., Вишневский С.А., Ашрятов А.А. Повышение энергоэффективности осветительных установок общественных помещений // Современные проблемы науки и образования. 2015. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/122-20831> (дата обращения: 01.07.2023)
4. Климов В. П., Москалев А. Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.tensi.ru/article01>. (дата обращения: 01.07.2023)
5. Кноринг Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения // Энергия Ленинград – 1976 – с. 180.

### **References**

1. Aizenberg, Yu. B. Modern problems of energy-efficient lighting // Energy saving. - 2009. – No. 1. – pp. 42-48.
2. GOST 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general-purpose power supply systems. M. Standartinform. 2014. 16 p.
3. Potapkin N.N., Vishnevsky S.A., Ashryatov A.A. Improving the energy efficiency of lighting installations of public premises // Modern problems of science and education. 2015. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/122-20831> (accessed: 01.07.2023)
4. Klimov V. P., Moskaev A.D. Problems of higher harmonics in modern power supply systems [Electronic resource] Access mode: <http://www.tensi.ru/article01> (accessed: 01.07.2023)
5. Knoring G.M. Reference book for the design of electric lighting // Energiya Leningrad – 1976 – p. 180.

### **Информация об авторах**

Л.В. Корбушов – магистрант.  
Е.С. Андреев – магистрант.  
Т.Г. Королева – кандидат технических наук, доцент.

### **Information about the authors**

L.V. Korbushov – undergraduate.  
E.S. Andreev – undergraduate.  
Koroleva T.G. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК 621.315.615.2

**Повышение энергоэффективности силовых трансформаторов путем исследования  
влияния адсорбционной очистки на тангенс угла диэлектрических потерь**

Глоткина Любовь Алексеевна<sup>1</sup>, Воркунов Олег Владимирович<sup>2</sup>,  
Гарифуллин Марсель Шарифьянович<sup>3</sup>, Слободина Юлия Николаевна<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», Казань, Россия,

<sup>1</sup>glotkina\_lyuba@mail.ru

<sup>2</sup>vorcunov\_oleg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5381-0128>

<sup>3</sup>g\_marsels@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6026-9923>

<sup>4</sup>yulya\_slobodina@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Воркунов Олег Владимирович, vorcunov\_oleg@mail.ru

**Аннотация:** Трансформаторное масло является, и будет продолжать оставаться в ближайшие годы основным видом жидкого диэлектрика для высоковольтного энергетического оборудования. При этом огромный парк трансформаторного оборудования в настоящее время продолжает использовать масла старого типа. Современная тенденция эксплуатации трансформаторных масел заключается не в замене, а в их регенерации. Одним из этапов регенерации является адсорбционная очистка. Адсорбционная очистка традиционно используется для регенерации окисленных масел. Однако в процессе эксплуатации маслonaполненного оборудования также имеются другие факторы, влияющие на трансформаторные масла. Одним из наиболее значимых являются разрядные процессы в оборудовании. В связи с этим актуально рассмотреть, насколько эффективно влияет адсорбционная очистка силикагелем на восстановление эксплуатационных свойств разных видов трансформаторных масел. Наиболее важной характеристикой трансформаторного масла является тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ). Предметом исследования в данной работе является зависимость  $\text{tg}\delta$  от наличия продуктов деградации трансформаторных масел различного характера, а также химического состава масел. Представляет интерес, как адсорбционная очистка силикагелем справляется с очищением масла от продуктов горения в результате воздействия разрядных процессов в сравнении с маслом, подвергнутому длительному термоокислению. В качестве адсорбционной очистки был использован силикагель марки КСКГ.

В данном исследовании проведены опыты по определению степени деградации трансформаторного масла от его характеристики ( $\text{tg}\delta$ ). Представлены результаты измерения  $\text{tg}\delta$  в зависимости от температуры четырех проб трансформаторного масла и определены их степени деградации.

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, степень деградации, тангенс угла диэлектрических потерь.

**Для цитирования:** Глоткина Л.А., Воркунов О.В., Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н. Повышение энергоэффективности силовых трансформаторов путем исследования влияния адсорбционной очистки на тангенс угла диэлектрических потерь // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 47 - 52.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development  
Original article

**Improving the energy efficiency of power transformers by studying the effect of adsorption  
purification on the tangent of the dielectric loss angle**

Glotkina Lyubov Alekseevna<sup>1</sup>, Vorkunov Oleg Vladimirovich<sup>2</sup>, Garifullin Marcel Sharifyanovich<sup>3</sup>, Slobodina Yulia Nikolaevna<sup>4</sup>

© Глоткина Л.А., Воркунов О.В., Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н., 2023

<sup>1,2,3,4</sup> KSPEU, Kazan, Russia,

<sup>1</sup>glotkina\_lyuba@mail.ru

<sup>2</sup>vorcunov\_oleg@mail.ru

<sup>3</sup>g\_marsels@mail.ru

<sup>4</sup>yulya\_slobodina@mail.ru

Corresponding author: Oleg Vorkunov, vorcunov\_oleg@mail.ru

**Abstract:** Transformer oil is, and will continue to be in the coming years, the main type of liquid dielectric for high-voltage power equipment. At the same time, a huge fleet of transformer equipment currently continues to use old-type oils. The modern tendency of transformer oils operation is not in replacement, but in their regeneration. One of the stages of regeneration is adsorption purification. Adsorption purification is traditionally used for regeneration of oxidized oils. However, there are also other factors that affect transformer oils during the operation of oil-filled equipment. One of the most significant is the discharge processes in the equipment. In this regard, it is relevant to consider how effectively the adsorption purification with silica gel affects the restoration of operational properties of different types of transformer oils. The most important characteristic of transformer oil is the tangent of dielectric loss angle ( $\text{tg}\delta$ ). The subject of study in this paper is the dependence of  $\text{tg}\delta$  on the presence of degradation products of transformer oils of different nature, as well as the chemical composition of oils. It is of interest how adsorptive purification with silica gel copes with purification of oil from combustion products as a result of exposure to discharge processes in comparison with oil subjected to prolonged thermal oxidation. KSKG grade silica gel was used as adsorptive purification.

In this study, experiments were conducted to determine the degree of degradation of transformer oil from its characteristic ( $\text{tg}\delta$ ). The results of measuring  $\text{tg}\delta$  as a function of temperature of four transformer oil samples are presented and their degrees of degradation are determined.

**Keywords:** transformer oil, degree of degradation, tangent of the dielectric loss angle.

**For citation:** Glotkina L.A., Vorkunov O.V., Garifullin M.Sh., Slobodina Yu.N. Increase of power transformers energy efficiency by studying the effect of adsorption cleaning on the tangent of dielectric loss angle// Energy and Resource Saving - XXI century. 2023. С. 47 - 52.

Трансформаторное масло играет одну из наиболее важных ролей в правильном функционировании трансформатора и служит эффективным охладителем и изоляцией. В соответствии с назначением, а также для длительной и безопасной работы маслонаполненного оборудования трансформаторное масло должно обладать следующим качеством - быть хорошим диэлектриком, то есть иметь высокое значение пробивного напряжения и низкое и стабильное значение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  [1].

Повышение тангенса угла диэлектрических потерь трансформаторного масла может привести к ухудшению всех изоляционных характеристик трансформатора [2]. Поэтому, при повышении диэлектрических потерь масла сверх нормируемого предела нужно принять меры к его снижению или заменить масло, так как идут быстрые деградиационные процессы. В результате старения трансформаторного масла происходит повышение  $\text{tg}\delta$ , обусловлено это растворением в них компонентов плохо запеченных лаков трансформатора, сопровождающимся, как правило, повышением кислотного числа, а также влиянием ароматических соединений и способностью масла образовывать осадок в процессе старения.

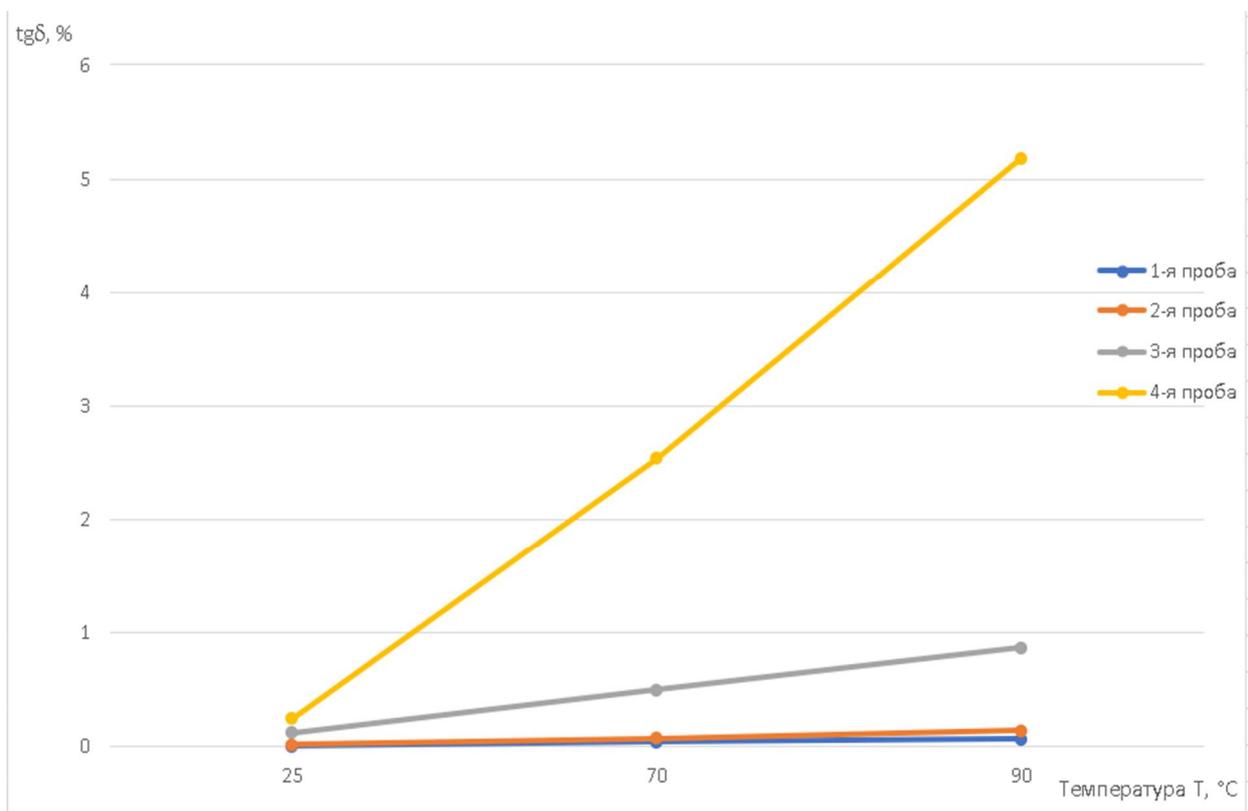
Для определения диэлектрических потерь трансформаторного масла для нескольких образцов с разной степенью деградации, была использована автоматизированная установка измерения диэлектрических потерь трансформаторного масла «Тангенс 3М» (рис. 1). Преимущество данного прибора заключается в максимально быстром и эффективном анализе масла [3].

Результат измерения  $\text{tg}\delta$  в зависимости от температуры для четырех проб трансформаторного масла представлен на рис. 2. Полученные значения измерений приведены в таблице 1.

Исходя из этих значений, пробы масел располагаются в порядке возрастания степени деградации: №1-№2-№3-№4. Из этого следует, что первая проба – наиболее свежая и незагрязненная, а четвёртая проба соответственно самая деградированная и необходима очистка. Как видно из графика пробы масел №3 и №4 подлежат немедленной замене, а другие пробы (№1, №2) могут далее эксплуатироваться в маслонаполненном оборудовании.



**Рисунок 1 – Установка «Тангенс 3М»**



**Рисунок 2 – График зависимости  $tg\delta$  от  $T$  для четырех проб масла**

**Таблица 1 – Значения измерений проб трансформаторного масла**

$tg\delta$ , %/ $T$ , °C	25	70	90
$tg\delta$ 1-й пробы	0,008	0,045	0,066
$tg\delta$ 2-й пробы	0,019	0,076	0,142
$tg\delta$ 3-й пробы	0,123	0,501	0,871
$tg\delta$ 4-й пробы	0,246	2,537	5,185

Для нахождения значений  $tg\delta$  разных видов трансформаторных масел в процессе влияния адсорбционной очистки на протяжении 120 ч. был использован прежний прибор «Тангенс 3М».

Проба №4 с предыдущего измерения и проба №5, масло отработавшее свой срок на заводе, оставленные на 120ч. при очистке силикагелем представлены для наглядности на рис. 3. Полученные значения измерений приведены в таблице 2.



**Рисунок 3 – Пробы масла с силикагелем**

*слева - №4 проба масла, полученная лабораторным методом, справа - №5 проба масла, отработавшее на заводе*

**Таблица 2 – Значения  $tg\delta$  ТМ при использовании силикагеля**

t, ч. после исп. силикагеля	$tg\delta$	
	№4 проба (лабораторное масло)	№5 проба (окисленное масло с завода)
0 ч. (до исп. силикагеля)	0,246	0,639
1 день (24 ч.)	0,079	0,406
2 день (48 ч.)	0,049	0,313
3 день (72 ч.)	0,037	0,261
4 день (96 ч.)	0,029	0,212
5 день (120 ч.)	0,025	0,184

Контроль степени деградации ТМ позволяет своевременно предпринимать меры по улучшению качества трансформаторного масла и, следовательно, увеличению срока службы ТМ и самого трансформатора.

#### **Список источников**

1. Определение характеристик трансформаторного масла спектральным методом / Д. М. Валиуллина, Ю. К. Ильясова, В. К. Козлов [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 1(49). – С. 66-74. – EDN ZPNNCZ.
2. Механизмы деградации трансформаторных масел / В. К. Козлов, Д. М. Валиуллина, О. А. Туранова, А. Н. Туранов // Электрические станции. – 2022. – № 2(1087). – С. 41-44. – EDN FCLUNX.
3. Определение степени старения трансформаторного масла по тангенсу угла диэлектрических потерь / В. К. Козлов, Д. М. Валиуллина // Наука и образование в условиях мировой нестабильности: проблемы, новые этапы развития: Материалы II международной научно-практической конференции,

Ростов-на-Дону, 30 апреля 2022 года. – г. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "Манускрипт", 2022. – С. 295-308. – EDN QRITLL.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614500 Российская Федерация. Программа определения параметров сигнала переходного процесса, регистрируемого в электрической сети: № 2022612595: заявл. 28.02.2022: опубл. 23.03.2022 / И. И. Иркагалиева, С. М. Тукаев, Р. Г. Хузяшев, И. Л. Кузьмин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». – EDN VWAYJO.

5. Wavelet analysis of transient signals caused by commutations in power lines / R. G. Khuziashev, I. L. Kuzmin, I. I. Irkagalieva, I. A. Minaev // Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022: 4, Moscow, 17–19 марта 2022 года. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731377. – EDN NEMHIL.

6. Богомолова, Т. В. К вопросу о создании оптимальной последней ступени мощных паровых турбин АЭС / Т. В. Богомолова, Г. А. Ахмадзаде // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 14-23. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-14-23. – EDN CRDKZK.

7. Биодизельное топливо. Часть III. Квантово-химическое исследование и моделирование процесса / С. В. Мазанов, Ф. М. Гумеров, А. И. Курдюков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 24-44. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-24-44. – EDN LMEYDB.

8. Сайтов, С. Р. Прогнозирование пиковых часов энергосбытовых компаний, входящих в реестр гарантирующих поставщиков АО "АТС" / С. Р. Сайтов, Б. Р. Карачурин, М. В. Сидоров // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 4(56). – С. 59-68. – EDN VWRWPG.

9. Куницкий, В. А. Исследование нестационарных режимов работы утилизационного теплообменного устройства на основе математического моделирования / В. А. Куницкий, С. В. Лукин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 4(56). – С. 69-79. – EDN QRWLNO.

10. Энергокомплекс для энергообеспечения энерготехнологических процессов / З. Ш. Юлдашев, Р. З. Юлдашаев, Л. С. Касобов [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 4(56). – С. 80-90. – EDN PEAGBO.

11. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования / К. Х. Гильфанов, Р. А. Шакиров, Р. Н. Гайнуллин, Ф. В. Коннов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 4(56). – С. 91-102. – EDN RKHVKW.

## References

1. Determination of transformer oil characteristics by spectral method / D. M. Valiullina, Yu. K. Ilyasova, V. K. Kozlov [et al.] // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. – 2021. – Т. 13. – № 1(49). – Pp. 66-74. – EDN ZPNNCZ.

2. Mechanisms of degradation of transformer oils / V. K. Kozlov, D. M. Valiullina, O. A. Turanova, A. N. Turanov // Electric stations. – 2022. – № 2(1087). – Pp. 41-44. – EDN FCLUNX.

3. Determination of the degree of aging of transformer oil by the tangent of the dielectric loss angle / V. K. Kozlov, D. M. Valiullina // Science and education in conditions of global instability: problems, new stages of development: Materials of the II International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 30, 2022. – Rostov-on-Don: Limited Liability Company "Manuscript", 2022. – pp. 295-308. – EDN QRITLL.

4. Certificate of state registration of the computer program No. 2022614500 Russian Federation. The program for determining the parameters of the signal of the transient process registered in the electrical network: No. 2022612595: application. 02/28/2022: publ. 03/23/2022 / I. I. Irkagalieva, S. M. Tukaev, R. G. Khuziashev, I. L. Kuzmin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University". – EDN VWAYJO.

5. Wavelet analysis of transient signals caused by commutations in power lines / R. G. Khuziashev, I. L. Kuzmin, I. I. Irkagalieva, I. A. Minaev // Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022: 4, Moscow, March 17-19, 2022. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731377. – EDN NEMHIL.

6. Bogomolova, T. V. On the issue of creating the optimal last stage of powerful steam turbines of nuclear power plants / T. V. Bogomolova, G. A. Akhmadzadeh // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – pp. 14-23. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-14-23. – EDN CRDKZK.

7. Biodiesel. Part III. Quantum-chemical research and modeling of the process / S. V. Mazanov, F. M. Gumerov, A. I. Kurdyukov [et al.] // Izvestia of higher educational institutions. Energy problems. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – pp. 24-44. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-24-44. – EDN LMEYDB.

8. Saitov, S. R. Forecasting peak hours of power supply companies included in the register of guaranteeing suppliers of JSC "ATS" / S. R. Saitov, B. R. Karachurin, M. V. Sidorov // Bulletin of the Kazan State Energy University. – 2022. – Vol. 14, No. 4(56). – pp. 59-68. – EDN VWRWPG.

9. Kunitsky, V. A. Investigation of non-stationary modes of operation of a utilization heat exchange device based on mathematical modeling / V. A. Kunitsky, S. V. Lukin // Bulletin of the Kazan State Energy University. – 2022. – Vol. 14, No. 4(56). – pp. 69-79. – EDN QRWLNO.

10. Power complex for power supply of energy technological processes / Z. Sh. Yuldashev, R. Z. Yuldashaev, L. S. Kasobov [et al.] // Bulletin of Kazan State Energy University. – 2022. – Vol. 14, No. 4(56). – pp. 80-90. – EDN PEAGBO.

11. A method of heat exchange intensification based on intelligent control of the operating characteristics of heat exchange equipment / K. H. Gilfanov, R. A. Shakirov, R. N. Gainullin, F. V. Konnov // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. – 2022. – Vol. 14, No. 4(56). – pp. 91-102. – EDN RKHVKW.

#### **Информация об авторах**

Л.А. Глоткина – бакалавр;

О.В. Воркунов – канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетические системы и сети;

М.Ш. Гарифуллин – док. техн. наук, профессор кафедры электроэнергетические системы и сети;

Ю.Н. Слободина – выпускник кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

#### **Information about the authors**

L.A. Glotkina – undergraduate;

O.V. Vorkunov – candidate of sciences in technology, docent of Electric power systems and networks department;

M.Sh. Garifullin – doctor of sciences in technology, professor of Electric power systems and networks department;

Yu.N. Slobodina – graduate of the Electric Power Systems and Networks Department of Kazan State Power Engineering University (KSEU).

Статья поступила в редакцию 31.10.2023; одобрена после рецензирования 06.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 31.10.2023; approved after reviewing 06.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК 004.353.254.5

**Обоснование внедрения иммерсионного охлаждения для светодиодной аппаратуры**

**Олег Борисович Гладков**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Орловский ГАУ Орёл, Россия,

<sup>1</sup>gladkoff.oleg2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5033-0185>

Автор, ответственный за переписку: Гладков Олег Борисович, gladkoff.oleg2010@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается одна из актуальных проблем эксплуатации светодиодной аппаратуры, касающаяся продления срока службы светодиодных источников света. Практическая целесообразность внедрения инновационной технологии иммерсионного охлаждения в работу светодиодных осветительных приборов обусловлена необходимостью автоматической регуляции оптимального температурного режима, установленных в них светодиодных источников света. Кроме того, обоснованием внедрения, является и необходимость снижения эксплуатационных затрат, а также капитальных вложений, характеризующих эффективность работы светодиодной осветительной сети. В качестве действующего агента, необходимого для реализации перечисленных задач выступает фторкетон, данное вещество обладает необходимыми электротехническими характеристиками и уникальными химическими свойствами, обуславливающими его массовое использование при производстве светодиодных осветительных приборов как промышленного, так и бытового назначения.

**Ключевые слова:** двухфазное жидкостное иммерсионное охлаждение, фторкетон, светодиодная аппаратура, срок службы, температурный режим, эффективный теплоотвод.

**Для цитирования:** Гладков О.Б. Обоснование внедрения иммерсионного охлаждения для светодиодной аппаратуры // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 53 - 56.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development  
Original article

**Justification of the introduction of immersion cooling for LED equipment**

**Oleg Borisovich Gladkov**

<sup>1</sup>FGBOU VO Orlovsky GAU Orel, Russia,

<sup>1</sup>gladkoff.oleg2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5033-0185>

The author responsible for the correspondence: Gladkov Oleg Borisovich, gladkoff.oleg2010@yandex.ru

**Annotation.** The article discusses one of the current problems in the operation of LED equipment, which concerns extending the service life of LED light sources. The practical feasibility of introducing innovative immersion cooling technology into the operation of LED lighting devices is due to the need for automatic regulation of the optimal temperature regime of the LED light sources installed in them. In addition, the justification for implementation is the need to reduce operating costs, as well as capital investments that characterize the efficiency of the LED lighting network. Fluoroketone is the active agent necessary for the implementation of these tasks; this substance has the necessary electrical characteristics and unique chemical properties, which determine its widespread use in the production of LED lighting devices for both industrial and household purposes.

**Keywords:** two-phase liquid immersion cooling, fluoroketone, LED equipment, service life, temperature conditions, effective heat removal.

**For citation:** Gladkov O.B. Justification of the introduction of immersion cooling for LED equipment // Energy and resource saving – XXI century. 2023. P. 53 - 56.

**Введение.** В настоящее время технология иммерсионного охлаждения приобретает всеобщее внедрение в охлаждение светодиодной аппаратуры, серверов, компьютеров и

устройств хранения данных. Разработки на эту тему велись давно, и сейчас ее востребованность неуклонно растет.

На кафедре «Электроснабжение» ФГБОУ ВО Орловский ГАУ к данному направлению также проявлен особый интерес. В рамках выполнения поисковых научно-исследовательских работ, автором данной публикации, на сегодняшний день получены результаты, объективно подтверждающие целесообразность использования технологии иммерсионного охлаждения для обеспечения оптимального температурного режима светодиодных источников света.

**Основная часть.** Иммерсионное охлаждение оборудования отличается своей работоспособностью, а один из главных их плюсов – высокая эффективность охлаждения. В зависимости от характеристик оборудования, могут использоваться различные жидкости и хладагенты, которые являются диэлектриками и не проводят электрический ток.

В качестве хладагента предполагается использование Noves® 1230, или фторкетон. Рассмотрим подробнее. Фторкетоны – это синтетические органические вещества, в молекуле которых все атомы водорода заменены на прочно связанные с углеродным скелетом атомы фтора, что в свою очередь делает вещество инертным с точки зрения взаимодействия с другими молекулами. Noves 1230 (ФК-5-1-12) (флуорокетон С-6) представляет собой бесцветную прозрачную жидкость со слабовыраженным запахом, которая тяжелее воды в 1,6 раз и не проводит электричество. Также является огнетушащим веществом. Его диэлектрическая проницаемость – 2,3 (за единицу в качестве эталона принят осушенный азот) [1].

Одно из главных достоинств ФК-5-1-12, которое продолжают использовать производители систем пожаротушения – это его практически нулевая токсичность. При этом Noves® 1230 и его преемники под брендами с приставкой \*1230 по-прежнему противопоставляются как другим видам хладонов (хладон 125, хладон 227 ea), так и ФК-5-1-12 других производителей. Фторкетон имеет более высокий порог безопасности для человека по сравнению с хладонами 125 и 227 ea. Уровень, не вызывающий воздействий (NOEL), составляет 10% при огнетушащей концентрации почти в 2 раза меньше. То есть условно человек сможет спокойно дышать в помещении, где произошло срабатывание системы пожаротушения на основе фторкетона и максимум, что ему грозит, это раздражение слизистой глаз. Этот показатель безопасности применим только к случаям ложных сработок системы. При пожаре главную опасность для человека представляют продукты горения. Даже самый «безопасный» газ при контакте с очагом разлагается на опасные ядовитые вещества. Согласно протоколу испытаний ФК-5-1-12 во ФГУП ВНИИЖГ Роспотребнадзора при проведении испытания на тестовом очаге возгорания «установлено, что время безопасной эвакуации не должно превышать 8 минут и будет зависеть от материалов отделки данного помещения».

Для эффективного тушения необходимо перевести фторкетон из жидкого состояния в газообразное. ФК-5-1-12 является ГОТВ комбинированного действия. Подавление пожара осуществляется за счет эффекта охлаждения (70%) и только потом за счет химической реакции ингибирования. В идеале система распыления фторкетона должна создавать облако тонкодисперсной смеси. При таком условии в районе очага возгорания ФК-5-1-12 будет резко переходить в газовую фазу, активно поглощать тепловую энергию огня и даст необходимый охлаждающий эффект, затем работает как ингибитор, прекратив реакцию горения [2].

Особую необходимость приобретает охлаждение светодиодной аппаратуры. Срок службы светодиода зависит от используемого полупроводникового материала, а также отношения тока светодиода к количеству выделяемого тепла. Вследствие постепенной эксплуатации световая отдача постепенно снижается.

При достижении 50% от начального значения, заявленный срок службы светодиода истекает. Срок службы светодиодов может варьироваться от нескольких десятков тысяч до 100 000 часов. Но, при изменении температурного режима, происходит сокращение срока службы светодиодной аппаратуры [3].

Управление температурным режимом является необходимым условием для светодиодных светильников, поскольку высокая температура отрицательно влияет на их производительность. Основная цель – это создание эффективного теплового тракта между светодиодами и теплоотводом при максимизации конвективной теплопередачи теплоотвода.

Перегрев материалов (пластиковые и пластмассовые детали), широко используемых в светотехнической аппаратуре может возникнуть вследствие ослабления контактного соединения источников света в цоколе лампы, патроне, ослабления контактного соединения проводов; окисления контактируемых поверхностей в местах подключения питающих проводов [4].

Повышение температуры вызывает сбои в системах светодиодного освещения. Исторически управление температурой не было конструктивным фактором для ламп накаливания, флуоресцентных или металлогалогенных ламп. Отработанная энергия, образующаяся в этих лампах, рассеивается в виде инфракрасной энергии в луче света и в виде тепла, что не требует дополнительного управления [5].

Светодиоды не излучают тепловую ИК-энергию в своем световом спектре, но вся избыточная энергия, полученная в результате электрооптического преобразования и преобразования длины волны, преобразуется в нерадиационную тепловую энергию, которая остается в полупроводниковых диодах. В связи с этим предполагается использование фторкетона для охлаждения светодиодной аппаратуры.

Фторкетон вводится в герметичный корпус светодиода, с целью регулирования температурного режима. Экспериментальные замеры температур проводились при помощи разработанного лабораторно-испытательного стенда, выполненного на микропроцессорной базе для трех вариантов корпусов светодиодных светильников – из пластика и из алюминия, внутри которых осуществлялось естественное воздушное охлаждение, а также для герметичного алюминиевого корпуса светильника, внутри которого осуществлялось жидкостное двухфазное иммерсионное охлаждение светодиодов [6]. Замеры температуры для каждого варианта корпуса и способа охлаждения производились при различных температурах окружающей среды – +20 °С, +30 °С, +40 °С и +45 °С.

Согласно экспериментальным замерам температур следует, что при максимальной температуре воздуха +45 °С, температура кристалла светодиода, находящегося в герметичном стальном корпусе при иммерсионной двухфазной системе жидкостного охлаждения не превышает +50 °С, при этом температура кристалла светодиода, находящегося в поликарбонатном корпусе с естественной системой воздушного охлаждения, достигает отметки +60 °С [7].

Согласно справочных данных, срок службы светодиода при иммерсионной системе двухфазного жидкостного охлаждения при температуре окружающей среды +45°С составляет более 110 тысяч часов при снижении светового потока на 50% или 55000 часов при 100 % световом потоке, заявленным производителем, а для светодиода при естественной воздушной системе охлаждения, находящимся в поликарбонатном корпусе, срок службы светодиода составляет 70 тысяч часов, при снижении светового потока на 50 % или 35000 часов при 100 % световом потоке, заявленным производителем.

Кроме того, фторкетон, переходя из жидкого состояния в газообразное, обеспечивает более равномерное распределение яркости свечения внутри рассеивателя герметичного светодиодного светильника, что в значительной степени снижает слепящий эффект и обеспечивает более качественный уровень освещенности рабочих поверхностей.

**Заключение.** Таким образом, срок службы светодиодов с двухфазным жидкостным иммерсионным охлаждением, находящимся в герметичном металлическом корпусе более чем на 60 % выше срока службы светодиодов с естественным воздушным охлаждением, размещенных в поликарбонатном корпусе.

В целом, окупаемость инвестиций в иммерсионное охлаждение составляет около 5-6 месяцев. После окупаемости доход относительно воздушного охлаждения увеличивается на 30 - 50%. Экономия электрической энергии на охлаждении составляет до 30%.

Предлагаемое инженерно-техническое решение об использовании фторкетона для повышения эффективности функционирования светодиодных источников света, может быть весьма полезным для проектировщиков и производителей светодиодных светильников, т.к. данное креативная идея обеспечит повышенное внимание к данной светотехнической продукции, а учитывая ее повышенную надежность, гарантирует стопроцентное конкурентное преимущество.

### Список источников

1. Сухая вода Novec® 1230 для защиты серверных и не только [Электронный ресурс] <https://habr.com/ru/companies/3mrussia/articles/200840/> (дата обращения 13.11.2023).
2. Фторкетон (ФК-5-1-12): маркетинговые мифы и реальность [Электронный ресурс] <https://zarya.one/blog/ftorketon-fk-5-1-12-marketingovye-mify-i-realnost/> (дата обращения 13.11.2023).
3. Лотар Н., Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов [Электронный ресурс] // Полупроводниковая светотехника. № 3. 2010. – С. 13. URL: <https://led-e.ru/led-cooling/ohlazhdenie-i-regulirovanie-temperaturnyh-rezhimov-svetodiodov/>.
4. Чернышов В.А., Гладков О.Б., Обеспечение пожаробезопасности светотехнической аппаратуры жилых и общественных помещений // Актуальные вопросы энергетики в АПК. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор О. А. Пустовая, редактор Е. С. Дубкова. Благовещенск, 2019. - С. 9-11.
5. Технологии терморегулирования для систем светодиодного освещения [Электронный ресурс] <https://m-focus.ru/termoregulirovanie-svetodiodnyh-svetilnikov> (дата обращения 13.11.2023).
6. Чернышов В.А., Гладков О.Б. Обеспечение эффективного теплоотвода в конструкциях светодиодной осветительной аппаратуры // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. Материалы XVII международной научно-практической конференции. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019. –С. 78-84.
7. Чернышов В.А., Гладков О.Б. Оценка эффективности теплоотвода проектируемой светодиодной осветительной аппаратуры с использованием микропроцессорной базы // Цифровая трансформация в энергетике. Материалы Всероссийской научной конференции (17\*18 декабря 2019 года, г. Тамбов). – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. - С. 130-134.

### References

1. Novec ® 1230 dry water for server protection and not only [Electronic resource] <https://habr.com/ru/companies/3mrussia/articles/200840/> (accessed 13.11.2023).
2. Fluorocetone (FC-5-1-12): marketing myths and reality [Electronic resource] <https://zarya.one/blog/ftorketon-fk-5-1-12-marketingovye-mify-i-realnost/> (accessed 13.11.2023).
3. 2. Lotar N., Cooling and regulation of temperature modes of LEDs [Electronic resource] // Semiconductor lighting engineering. No. 3. 2010. – P. 13. URL: <https://led-e.ru/led-cooling/ohlazhdenie-i-regulirovanie-temperaturnyh-rezhimov-svetodiodov/>.
4. 3. Chernyshov V.A., Gladkov O.B., Ensuring fire safety of lighting equipment of residential and public premises // Actual issues of energy in the agro-industrial complex. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Responsible editor O. A. Pustovaya, editor E. S. Dubkova. Blagoveshchensk, 2019. - pp. 9-11.
5. 4. Thermoregulation technologies for LED lighting systems [Electronic resource] <https://m-focus.ru/termoregulirovanie-svetodiodnyh-svetilnikov> (accessed 13.11.2023).
6. 5. Chernyshov V.A., Gladkov O.B. Ensuring effective heat removal in LED lighting equipment designs // Energy and resource saving - XXI century. Materials of the XVII International Scientific and practical conference. – The Eagle: OSU named after I.S. Turgenyev, 2019. –pp. 78-84.
7. 6. Chernyshov V.A., Gladkov O.B. Evaluation of the efficiency of the heat sink of the projected LED lighting equipment using a microprocessor base // Digital transformation in power engineering. Materials of the All-Russian Scientific Conference (December 17\*18, 2019, Tambov). – Tambov: Publishing Center of FGBOU VO "TSTU", 2020. - pp. 130-134.

### Информация об авторах

О.Б. Гладков – старший преподаватель.

### Information about the authors

O.B. Gladkov is a senior lecturer.

Статья поступила в редакцию 11.11.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 11.11.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 57 - 61.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 57 - 61.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК 674.047.3-047.58

**Алгоритм «Мотылькового пламени» для оптимизации топографии нейронной сети для  
диагностики силовых трансформаторов при помощи хроматографического анализа**

**Рахманкулов Шамиль Фаридович<sup>1</sup>, Гарифуллин Марсель Шарифьянович<sup>2</sup>,  
Галиев Ильгиз Фанзилевич<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия,  
<sup>1</sup>shamil74000@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8913-6551>  
<sup>2</sup>g\_marsels@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6026-9923>  
<sup>3</sup>galievi.f@list.ru,

Автор, ответственный за переписку: Рахманкулов Шамиль Фаридович, shamil74000@mail.ru

**Аннотация.** Технология диагностики неисправностей силовых трансформаторов является необходимым условием стабильной работы энергосистем. Одним из наиболее распространенных методов является диагностика неисправностей на основе хроматографического анализа растворенного газа (ХАРГ). Однако из-за недостатка информации о неисправностях традиционные методы диагностики неисправностей на основе ХАРГ не соответствуют с точки зрения точности и эффективности. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается новая модель диагностики неисправностей масляных трансформаторов, основанная на методах множественных соотношений, таких как треугольник Дюваля, и Метод Роджерса и вероятностной нейронной сети (ВНС), оптимизированной с помощью модифицированного алгоритма оптимизации мотылькового пламени (ОМП). Вероятностная нейронная сеть как линейная модель обладает хорошими потребительскими свойствами и часто используется в моделях классификации, однако ее классификационные характеристики сильно зависят от коэффициента сглаживания ( $\sigma$ ) скрытого слоя и не являются стабильными. В данной работе эта проблема решается с помощью ОМП для оптимизации коэффициента сглаживания, что позволяет эффективно повысить точность классификации и устойчивость ВНС.

**Ключевые слова:** Хроматографический анализ растворенных газов; Оптимизационные алгоритмы; Трансформаторное оборудование; энерго- и ресурсосберегающие технологии.

**Для цитирования:** Рахманкулов Шамиль Фаридович, Гарифуллин Марсель Шарифьянович, Галиев Ильгиз Фанзилевич Алгоритм «мотыльков, летящих на свет» для оптимизации топографии нейронной сети для диагностики силовых трансформаторов при помощи онлайн хроматографического анализа // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 57 - 61.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development  
Original article

**A "moths flying into the light" algorithm for optimizing neural network topography for  
power transformer diagnostics using chromatographic analysis**

**Rakhmankulov Shamil Faridovich<sup>1</sup>, Garifullin Marsel Sharifyanovich<sup>2</sup> Galiev Ilgiz  
Fanzilevich<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
<sup>1</sup>shamil74000@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8913-6551>  
<sup>2</sup>g\_marsels@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6026-9923>  
<sup>3</sup>galievi.f@list.ru <http://orcid.org/0000-0002-0595-1898>  
Corresponding author: Rakhmankulov Shamil Faridovich, shamil74000@mail.ru

© Рахманкулов Ш.Ф., Гарифуллин М.Ш., Галиев И.Ф. 2023

**Abstract.** Fault diagnosis technology for power transformers is a prerequisite for stable operation of power systems. One of the most common methods is fault diagnosis based on dissolved gas chromatographic analysis (DGA). However, due to the lack of fault information, the traditional HARG-based fault diagnosis methods are not adequate in terms of accuracy and efficiency. To solve this problem, this paper proposes a new fault diagnosis model for oil transformers based on multiple ratio methods such as Duval's triangle and Rogers Method and probabilistic neural network (PNN) optimized using a modified moth flame optimization algorithm (MFO). The probabilistic neural network as a linear model has good consumer properties and is often used in classification models, but its classification performance strongly depends on the smoothing coefficient ( $\sigma$ ) of the hidden layer and is not stable. In this paper, this problem is solved by using OMP to optimize the smoothing coefficient, which can effectively improve the classification accuracy and stability of VNNS.

**Keywords:** drying of billets of wooden supports; drying in electromagnetic field; electrotechnological installations for drying; energy- and resource-saving technologies.

**For citation:** Rakhmankulov Shamil Faridovich, Garifullin Marsel Sharifyanovich, Galiev Ilgiz Fanzilevich A "moths flying into the light" algorithm for optimizing neural network topography for power transformer diagnostics using online chromatographic analysis // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 57 - 61.

Введение. Хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ) продолжает оставаться одним из наиболее информативных инструментов раннего выявления дефектов в трансформаторном маслонаполненном электрооборудовании. Дальнейшее повышение эффективности ХАРГ предполагает широкое использование современных систем онлайн мониторинга и адекватной интерпретации результатов такого вида анализа. Для этого мы будем применять Вероятностную нейронную сеть с оптимизацией адаптированным алгоритмом «Мотылькового пламени».

Оптимизация мотылькового пламени (ОМП) — это естественный эвристический оптимизационный алгоритм. В ОМП есть две важные части: мотылек и пламя (источник пламени, условно «факел»). Положение одного мотылька соответствует решению задачи. «Пламя» хранит все оптимальные решения популяции мотыльков на данный момент. По сравнению с другими метаэвристическими алгоритмами ОМП обладает простотой структуры, хорошей устойчивостью и простотой реализации. Его можно свести к трем основным этапам. Первый этап — это случайная генерация позиций мотыльков в пространстве поиска решений: инициализация позиции каждого мотылька в популяции мотыльков реализована в ОМП следующим образом:

$$M_i = (ub_i - lb_i) * rand() + lb_i , \quad (1)$$

где две матрицы,  $ub$  и  $lb$  задают границы для переменных. Второй этап включает в себя адаптивное уменьшение числа условных «Факелов», т. е. источников пламени [1]. Уравнение, которое описывает данный этап, выглядит следующим образом:

$$f_{no} = round(N - l * \frac{N-1}{T}) , \quad (2)$$

где  $f_{no}$  — количество источников пламени (условных факелов),  $N$  - число популяций мотыльков,  $l$  - число текущих итераций,  $T$  - максимальное число итераций. Третий этап — это обновление информации о топологии, позиций. В стандартном ОМП используется механизм обновления по логарифмической спирали, который на каждой итерации обновляет список факелов на основе наилучшей позиции, что повышает удобство пространственного поиска. Механизм обновления по логарифмической спирали формулируется следующим образом:

$$M_i(l+1) = \begin{cases} \xi_{D_i} * e^{bt} * \cos(2\pi t) + F_i(l), & i \leq f_{no} \\ \xi_{D_i} * e^{bt} * \cos(2\pi t) + F_{f_{no}}(l), & i > f_{no} \end{cases} , \quad (3)$$

где  $b$  - константа для построения траектории логарифмической спирали; после упорядочивания позиций мотыльков в порядке возрастания их пригодности в  $l$ - $l$ -м

поколении первые  $f_{no}$  позиций мотыльков принимаются за список позиций источников пламени 1-го поколения, то есть  $F(l)$ , причем  $F_i(l)$ -ое пламя в списке; затем  $F_{fno}(l)$  обозначает позицию пламени, которое сходится наименьшим образом.  $D_i$  рассчитывается следующим образом:

$$D_i = \xi \begin{cases} |F_i - M_i|, i \leq f_{no} \\ |F_{fno} - M_i|, i > f_{no} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $t$  обозначает близость мотылька к месту расположения пламени, которая определяется следующим уравнением:

$$\xi = \frac{t^{a-1} * rand() + 1}{a - 1 + l * \frac{-1}{T}}. \quad (5)$$

В традиционном алгоритме "мотылек" для любого пламени приближается к логарифмической спиральной траектории, что позволяет расширить возможности локального поиска алгоритма, но при этом легко попасть в локальный оптимум. Чтобы ускорить сходимость и избежать попадания модели в локальный оптимум, мы вводим хаотический оператор после инициализации и используем для обновления положения параллельно-прямолинейную траекторию вместо традиционной логарифмической спирали [2]. Поскольку особи мотылька ищут источники огня относительно независимо, не имея большого количества информации, мы выбираем три лучшие относительно хорошие особи после адаптационного ранжирования для выполнения хаотической линейной комбинации с каждой особью в популяции мотыльков и усредняем их, чтобы получить обновленные позиции. По мере адаптивного уменьшения числа источников пламени, когда их число меньше числа мотыльков, для обновления положения используется традиционная логарифмическая спираль. В итоге обновляем уравнение (3) и получаем оптимизированную версию алгоритма:

$$M_i(l+1) = \xi \begin{cases} \frac{1}{3} \sum_{x=1}^3 M_x(l) - xt_n * 2 * t_n * M_x(l), i \leq f_{no} \\ \frac{1}{3} \sum_{x=1}^3 M_x(l) - xt_n * 2 * t_n * M_x(l), i > f_{no} \end{cases}. \quad (6)$$

Вероятностная нейронная сеть (ВНС) — это разновидность нейронной сети с простой структурой и широким применением. Она представляет собой нейронную сеть с радиальным базисом и функцией обратной связи, основанную на байесовской теории принятия решений. В силу ограничений самой ВНС коэффициент сглаживания  $\sigma$  оказывает большое влияние на вычислительный процесс входного слоя и выхода скрытого слоя. Если значение  $\sigma$  выбрано неправильно, то слишком большие или слишком малые значения могут привести к тому, что сеть будет сходиться слишком быстро или легко попадет в локальный оптимум, что приведет к резкому снижению точности классификации. Описанный выше ОМП имеет преимущества в возможности глобального поиска и гибкости по сравнению с другими традиционными алгоритмами оптимизации. Эффективность классификации ВНС может быть значительно улучшена за счет оптимизации ОМП  $\sigma$ . Итого сформировав наши цели по улучшению производительности ВНС, получаем комбинированный алгоритм, который состоит из следующих шагов. Первый шаг — это задать изначальную обучающую выборку  $X$  (вектор признаков на входе). Второй шаг — задаем вероятностную нейронную сеть путем случайного определения набора коэффициентов сглаживания. Третий шаг — задаем параметры алгоритма ОМП: размер популяции  $N$ , размерность  $d$ , максимальное число

итераций  $T$ , а также задаем функцию сходимости  $f(x)$ . Следует отметить, что в нашей модели в качестве значения сходимости задается средняя квадратичная ошибка, а соответствующая функция сходимости может быть выражена как:

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - O_i)^2, \quad (7)$$

где  $Y_i$  - фактическое значение после обучения сети, а  $O_i$  - теоретическое ожидаемое.

На четвертом этапе мы задаем положение коэффициента сглаживания случайным образом и записываем его в уравнение (1). Далее вычисляем пригодность каждого положения коэффициента сглаживания по уравнению (7) и записываем текущее оптимальное положение решения. На следующем этапе мы сортируем позиции в порядке возрастания в соответствии с величиной сходимости и выбираем лучшее решение в качестве позиции факела следующего поколения (если  $l = 1$ , то в качестве позиции оставляем текущий факел) [3]. Далее обновляем  $f_{no}$  по уравнению (2). Следующим шагом мы обновляем позиции коэффициентов сглаживания по уравнению (6). Если выполняется условие максимума итераций ( $l < T$ ), переходим к следующему шагу, в противном случае возвращаемся к шагу 5 и пересчитываем с новыми условиями (7). Оптимизированный коэффициент сглаживания  $\sigma$  вводится в ВНС для обучения с целью получения наилучшей ВНС-модели диагностики неисправностей. Далее для получения соответствующих данных вместо обучающих образцов в сеть подаются тестовые образцы. Итоговая схема взаимодействия всех описанных алгоритмов представлена на рисунке №1.

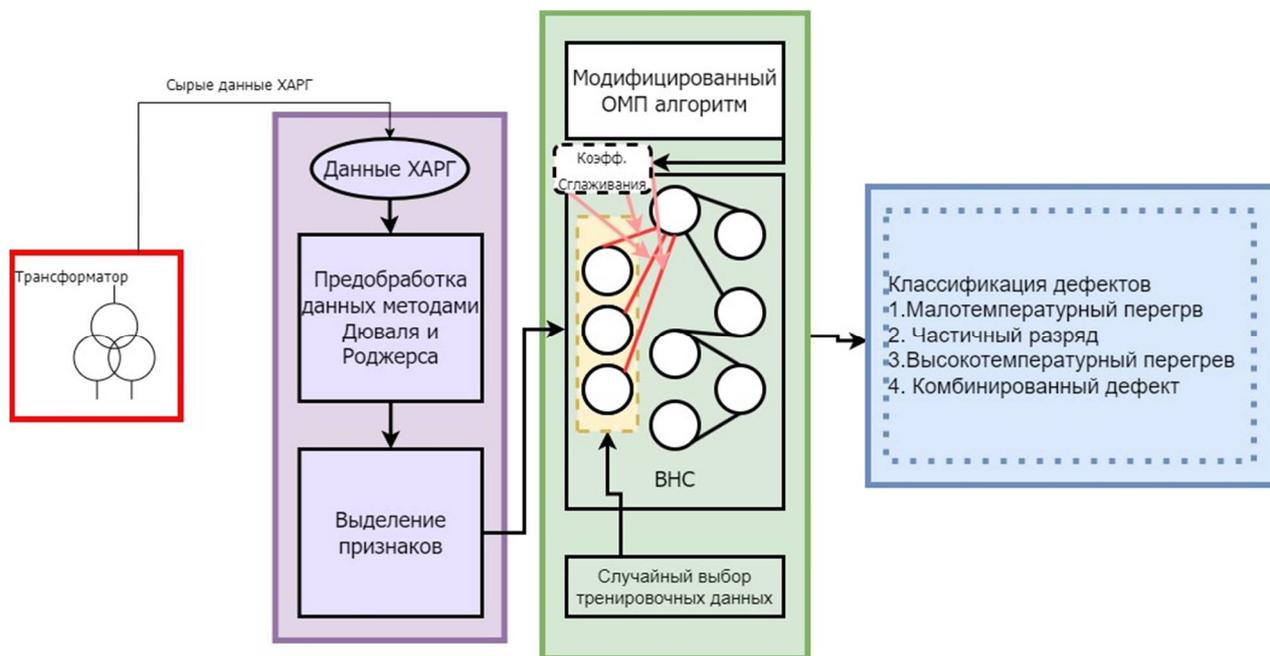


Рисунок 1 – Схема обработки и архитектуры используемой оптимизации

### Список источников

1. Sahoo, S.K., Saha, A.K., Ezugwu, A.E. et al. Moth Flame Optimization: Theory, Modifications, Hybridizations, and Applications. Arch Computat Methods Eng 30, 391–426 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09801-z>
2. Mirjalili S (2016) Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. Neural Comput Appl 27(4):1053–1073. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1920-1>
3. Sapre S, Mini S (2021) A differential moth flame optimization algorithm for mobile sink trajectory. Peer-to-Peer Netw Appl 14(1):44–57

### References

1. Sahoo, S.K., Saha, A.K., Ezugwu, A.E. et al. Moth Flame Optimization: Theory, Modifications, Hybridizations, and Applications. Arch Computat Methods Eng 30, 391–426 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09801-z>
2. Taflove A., Hagness S.C. Computational electrodynamics: the finitedifference time-domain, 2nd ed. Boston - London: Artech House, 2000.
3. Korenkov, D.A., Eremeyev, V.D. Statement of the problem of finding the optimum configuration of the working condenser for high frequency drying of wooden supports // Energy and Resources Saving - XXI Century: Proceedings of XIX International Scientific-Practical Conference (10 - November 12, 2021, Oryol). - Oryol: OGU named after I.S. Turgenyev, 2021. - P. 67-70.

### Информация об авторах

Ш.Ф. Рахманкулов – магистрант.

М.Ш. Гарифуллин – др. техн. наук, Профессор кафедры Электроэнергетические системы и сети.

И.Ф. Галиев – канд. техн. наук, доцент кафедры Электроэнергетические системы и сети.

### Information about the authors

S.F. Rakhmankulov – undergraduate.

M.S. Garifullin - Dr. Sci. (Engineering Sciences), Professor of the Department of Electrical Power Systems and Networks.

I.F. Galiev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Systems and Networks.

Статья поступила в редакцию 11.11.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 11.11.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК: 621.316.9

**Способ оперативного устранения перенапряжений при однофазном замыкании на  
землю в воздушной электрической сети 6-10 кВ с изолированной нейтралью**

**Алина Сергеевна Даровых<sup>1</sup>, Вадим Алексеевич Чернышов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>alinkadarovyh1@gmail.com

<sup>2</sup>blackseam78@mail.ru, [https:// orcid.org/0000-0002-5955-5540](https://orcid.org/0000-0002-5955-5540)

Автор, ответственный за переписку: Даровых Алина Сергеевна, alinkadarovyh1@gmail.com

**Аннотация.** Рассматриваются проблемы, связанные с возникновением однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ. Предлагается новый способ оперативного устранения перенапряжений при однофазовом замыкании на землю, позволяющий повысить надежность и безопасность электроснабжения потребителей.

**Ключевые слова:** воздушная электрическая сеть 6-10 кВ с изолируемой нейтралью; однофазовое замыкание на землю; электротравматизм; перенапряжение изоляции; двойное замыкание на землю, разделительный трансформатор, надежность и бесперебойность электроснабжения.

**Для цитирования:** Даровых А.С., Чернышов В.А. Способ автоматического устранения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрической сети с изолированной // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 62 – 65.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions for their development  
Original article

**A method for quickly eliminating overvoltages during a single-phase ground fault in a  
6-10 kV overhead electrical network with an isolated neutral**

**Alina Sergeevna Darovykh<sup>1</sup>, Vadim Alekseevich Chernyshov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>alinkadarovyh1@gmail.com

<sup>2</sup>blackseam78@mail.ru, [https:// orcid.org/0000-0002-5955-5540](https://orcid.org/0000-0002-5955-5540)

Corresponding author: Darovykh Alina Sergeevna, alinkadarovyh1@gmail.com

**Annotation.** The problems associated with the occurrence of single-phase ground faults in 6-10 kV networks are considered. A new method is proposed for prompt elimination of overvoltages during a single-phase ground fault, which makes it possible to increase the reliability and safety of power supply to consumers.

**Key words:** overhead electrical network 6-10 kV with insulated neutral; single-phase earth fault; electrical injuries; insulation overvoltage; double ground fault, isolation transformer, reliability and uninterrupted power supply.

**For citation:** Darovykh A.S., Chernyshov V.A. Method for automatic elimination of overvoltage during a single-phase ground fault in an insulated electrical network // Energy and resource saving - XXI century. 2023. P. 62 – 65.

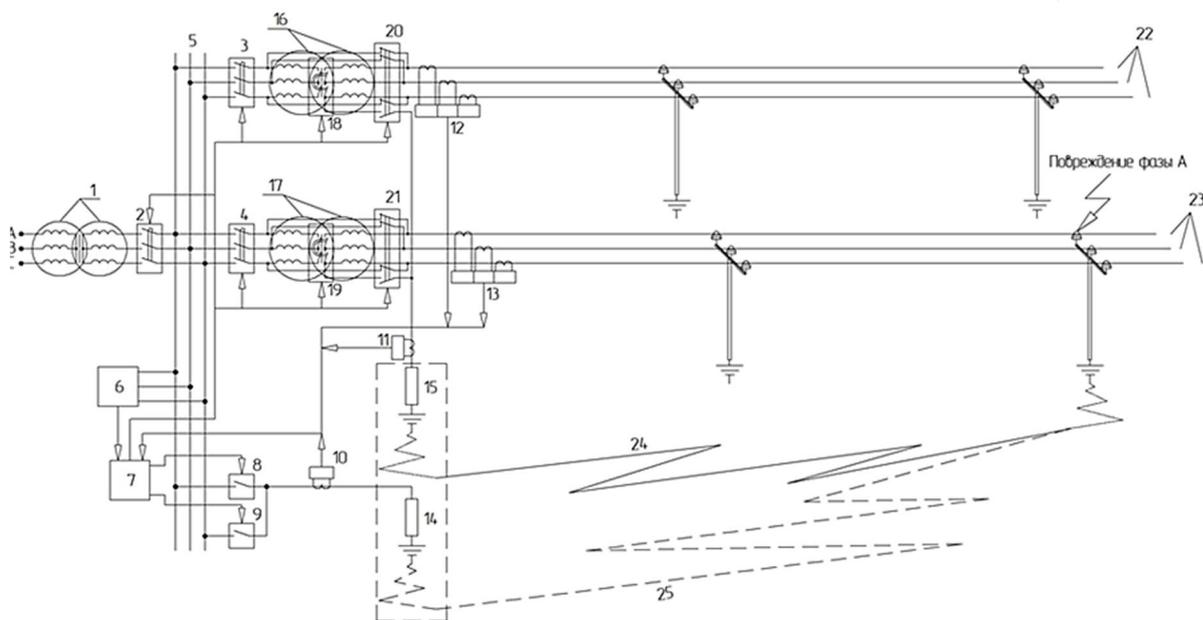
Протяженность воздушных электрических сетей напряжением 6-10 кВ с изолированной нейтралью в России на сегодняшний день составляет более одного миллиона километров. Львиная доля повреждений в этих сетях инициирована возникновением в них однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ) [1, 2], которые, в большинстве случаев, происходят по причине обрыва проводов и (или) пробоя линейных изоляторов. Изолированная нейтраль, при этом, дает возможность потребителям недолгое время работать в штатном режиме, т.к. уровень подаваемого им линейного напряжения при этом не изменяется.

Это обусловлено тем, что при возникновении ОЗНЗ в электрической связанной сети возникают опасные перенапряжения, которые, собственно и являются основной причиной возникновения более страшной аварии - двойного замыкания на землю (ДЗНЗ).

В настоящее время научно-технический прогресс ориентирован на разработку и внедрение на объектах электроэнергетики разнообразных цифровых телекоммуникационных технологий, а также микропроцессорных систем управления [3, 4]. Однако, в реальности, такие внедрения могут оказывать на воздушные электрические сети 6-10 кВ отрицательный эффект, заключающийся в их неготовности эффективно функционировать в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного или природного характера. Вместе с тем, известен способ определения ВЛЭП с ОЗНЗ в электрических сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью, заключающийся в регистрации напряжения нулевой последовательности на шинах низковольтного напряжения силового трансформатора, при появлении которого замыкают на землю одну из фаз шин низковольтного напряжения через активное сопротивление, и если в момент включения этой фазы через активное сопротивление не течет ток, то эту фазу отключают и замыкают на землю любую другую из двух оставшихся фаз, также через активное сопротивление. Одновременно с этим контролируют факт появления тока искусственного двойного замыкания на землю (ДЗНЗ) в одной из отходящих ВЛЭП 6-10 кВ, соответственно, при его наличии делают вывод о том, что в данной ВЛЭП 6-10 кВ имеется ОЗНЗ [5]. Принципиально важным недостатком известного способа является общеизвестный факт, что возникновение ОЗНЗ на одной из ВЛЭП электрически связанной сети 6-10 кВ приводит к повышению уровня напряжения неповрежденных фаз этой сети в  $\sqrt{3}$  раз относительно земли. А это, в свою очередь, не только ограничивает ресурс задействованных коммутационных аппаратов и линейной изоляции, но и как было уже отмечено выше, является причиной возникновения более опасного аварийного режима – ДЗНЗ, как в процессе определения ВЛЭП с ОЗНЗ, так и в дальнейшем, если ВЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ остается в работе, на время отыскания места повреждения. Данное обстоятельство в значительной степени снижает надежность и безопасность электроснабжения агропромышленных и гражданских потребителей. При этом, в случае отключения ВЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ оперативным персоналом или автоматикой (при возникновении ДЗНЗ), персонал оперативно-выездной бригады, зачастую испытывает трудности при отыскании места возникновения ОЗНЗ на ВЛЭП, что существенно увеличивает время перерыва в электроснабжении [5]. Кафедра электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» активно работает в данном направлении и на сегодняшний день имеет в своем активе несколько схмотехнических решений [6, 7], позволяющих не нарушать электроснабжение потребителей при возникновении в электрической сети 6-10 кВ однофазных повреждений изоляции, в течение всего периода времени, необходимого для его отыскания. При этом, одно из них позволяет исключить вероятность возникновения электротравматизма людей и животных в зоне его существования [6], за счет гальванического отделения ВЛЭП с ОЗНЗ от источника питания.

На рисунке 1 представлена схема устранения перенапряжения в электрической сети с изолированной нейтралью без отключения ВЛЭП с ОЗНЗ.

На схеме (см. рисунок 1) изображены: источник питания с фазами А, В и С, являющийся силовым трансформатором 1; автоматические выключатели 2 – 4; шины низковольтного напряжения 5; устройство неселективного контроля изоляции (УНКЗ) 6; блок 7 релейной защиты и автоматики (РЗиА); однофазные выключатели 8 и 9; датчики тока 10 – 13; низкоомный заземляющий резистор (НЗР) 14; высокоомный заземляющий резистор (ВЗР) 15; трансформаторы гальванической развязки (ТГР) 16 и 17; дистанционно управляемые коммутирующие аппараты 18 и 19 первой группы; дистанционно управляемые коммутирующие аппараты 20 и 21 второй группы; ВЛЭП 6-10 кВ 22 и 23. С помощью штриховой линии на схеме условно обозначены: путь 24 протекания тока ОЗНЗ при высокоомном резистивном заземлении нейтрали ТГР посредством ВЗР 15; путь 25 кратковременного протекания тока при искусственном ДЗНЗ через НЗР 14.



**Рисунок 1 – Схема устранения перенапряжения в электрической сети с изолированной нейтралью без отключения ВЛЭП с ОЗНЗ**

В случае появления ОЗНЗ на любой из ВЛЭП 6-10 кВ, блоком 7 РЗиА регистрируется появление напряжения нулевой последовательности, посредством УНКЗ 6, установленного на шинах 5 низковольтного напряжения 6-10 кВ. После чего блоком РЗиА формируется команда на включение на землю одной из двух фаз (ф. А или ф. С) шин 5 низковольтного напряжения, через НЗР 14, обеспечивающая прохождение тока искусственного ДЗНЗ в ВЛЭП 6-10 кВ, имеющей ОЗНЗ. При этом, согласно принятому схмотехническому решению, каждая из отходящих ВЛЭП 6-10 кВ 22-23, подключается к шинам 5 низковольтного напряжения через ТГР 16-17. Алгоритмом работы блока РЗиА обеспечивает возможность дистанционного синхронизированного коммутирования первичной и вторичной обмоток ТГР 16-17 по схеме «звезда», посредством коммутирующего аппарата первой группы, имеющего нормально разомкнутые контакты. При этом, блок РЗиА также обеспечивает пофазовое шунтирование выводов каждой из обмоток ТГР, посредством нормально замкнутых контактов коммутирующего аппарата второй группы, размыкающихся при прохождении тока ДЗНЗ в ВЛЭП 6-10 кВ, имеющей ОЗНЗ. Одновременно с реализацией кратковременного включения на землю одной из 2-х фаз шин 5 низковольтного напряжения 6-10 кВ, через НЗР 14, при помощи замыкающих контактов коммутирующего аппарата первой категории, производят синхронизированное коммутирование первичной и вторичной обмоток ТГР по схеме «звезда», а нормально разомкнутым контактом коммутирующего аппарата второй категории, обеспечивают включение на землю, через ВЗР 15 нейтрали вторичной обмотки ТГР, питающего ВЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ. После ликвидации на ВЛЭП ОЗНЗ блоком РЗиА формируются команда на возвращение контактов коммутирующих аппаратов первой и второй групп в первоначальное состояние, обеспечивающее присоединение восстановленной ВЛЭП 6-10 кВ к шинам (5) низковольтного напряжения в обход ТГР.

Предлагаемое схмотехническое решение повышает надежность работы электросетевого оборудования, а также обеспечивает высокую степень бесперебойности питания и электробезопасности потребителей. Это обеспечивается благодаря тому, что при появлении однофазного повреждения изоляции, на любой из ВЛЭП, входящих в состав электрически связанной сети 6-10 кВ, оперативно исключается возможность появления электроизоляционного перенапряжения, а отходящие к потребителям ВЛЭП, имеющие ОЗНЗ, не отделяются от источника электроснабжения, а продолжает надежно функционировать.

### Список источников

1. Евдокунин Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов // Электричество, 1998. С. 8-22.
2. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев // М.: Энергия, 1971. – 152 с.
3. Барабанов, Ю.А. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики распределительных сетей / Ю.А. Барабанов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. – 172 с.
4. Шукуров Р.Ш. Применение современных информационных технологий в управлении качеством электроэнергии / Р.Ш. Шукуров, Т.В. Чернавина // Форум молодых ученых 11 (39) 2019. Издательский центр "ИУСЭР". – г. Саратов. – С. 477-480
5. Васильев В.Г., Чернышов В.А. Патент РФ № 2294585, МПК H02H3/16. Способ определения линии с замыканием на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью. Заявл. 31.10.2005; Оpubл. 27.02.2007.
6. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / Г.М. Шалыт, А. И. Айзенфельд, А.С. Малый. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 207 с.
7. Качанов А.Н., Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Даровых А.С. Заявка на изобретение № 2022133610 от 20.12.2022 . Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтралью», заявитель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева».
8. Качанов А.Н., Чернышов В.А., Даровых А.С., Лукьянов Г.В. Патент РФ № 2798464. МПК H02H 9/08. Способ автоматического устранения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью. заявитель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева». Заявл. 20.12.2022; Оpubл. 23.06.2023.

### References

1. Evdokunin G.A. Choice of neutral grounding method in 6-10 kV networks / G.A. Evdokunin, S.V. Gudilin, A.A. Korepanov // Electricity, 1998. pp. 8-22.
2. Likhachev F.A. Ground faults in networks with isolated neutral and compensation of capacitive currents / F.A. Likhachev // М.: Energia, 1971. – 152 p.
3. Barabanov, Yu.A. Microprocessor devices for relay protection and automation of distribution networks / Yu.A. Barabanov. – Vologda: Infra-Engineering, 2015. – 172 p.
4. Shukurov R.Sh. Application of modern information technologies in power quality management / R.Sh. Shukurov, T.V. Chernavina // Forum of young scientists 11 (39) 2019. Publishing center "IUSER". – Saratov. – pp. 477-480
5. Vasiliev V.G., Chernyshov V.A. RF patent No. 2294585, IPC H02H3/16. A method for determining a line with a ground fault in electrical networks with an isolated neutral. Application 10/31/2005; Publ. 02/27/2007.
6. Shalyt, G.M. Determination of locations of damage to power lines based on emergency mode parameters / G.M. Shalyt, A.I. Aizenfeld, A.S. Small. – 2nd ed., revised. and additional – М.: Energoatomizdat, 1983. – 207 p.
7. Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Lukyanov G.V., Darovykh A.S. Application for invention No. 2022133610 dated December 20, 2022. Method for converting a spaced double ground fault into a single-phase fault in networks with an isolated neutral", applicant FSBEI HE "OGU named after. I.S. Turgenev."
8. Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Darovykh A.S., Lukyanov G.V. RF Patent No. 2798464. IPC H02H 9/08. A method for automatically eliminating overvoltage during a single-phase ground fault in an electrical network with an isolated neutral. applicant FSBEI HE "OGU named after. I.S. Turgenev." Application 12/20/2022; Publ. 06/23/2023.

### Информация об авторах

А.С. Даровых – магистрант

В.А. Чернышов – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения.

### Information about the authors

A.S. Darovykh – undergraduate.

V.A. Chernyshov – candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department.

Статья поступила в редакцию 11.11.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 11.11.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 66 – 70.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 66 – 70.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК 004

### Концепция управления спросом на электроэнергию в рамках цифровой трансформации энергосбытовых компаний

Юрий Николаевич Юрьев<sup>1</sup>, Евгений Андреевич Миронов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ООО «Орловский энергосбыт», г. Орёл, Россия,  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,  
<sup>1</sup>secretary@interra-o-orel.ru  
<sup>2</sup>gen996@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Евгений Андреевич Миронов, gen996@mail.ru

**Аннотация.** Произведен анализ цифровой трансформации и тенденций развития энергосбытовых компаний в условиях текущей нормативно-правовой базы Российской Федерации. Рассмотрена роль агрегаторов спроса в концепции управления спросом на электроэнергию. Отмечены преимущества управления спросом как эффективного средства для выравнивания общего графика потребления в энергосистеме и сокращения затрат на электроснабжение у потребителей.

**Ключевые слова:** цифровая трансформация, децентрализованная энергетика, энергосбытовая отрасль, управление спросом, агрегатор спроса, просьюмер.

**Для цитирования:** Юрьев Ю.Н., Миронов Е.А. Концепция управления спросом на электроэнергию в рамках цифровой трансформации энергосбытовых компаний // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 66 – 70.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions for their development  
Original article

### The demand response concept as part of the digital transformation of energy supply companies

Yuri Nikolaevich Yuryev<sup>1</sup>, Evgeniy Andreevich Mironov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Orlovsky Energosbyt LLC, Orel, Russia  
<sup>2</sup>FSBEI HE "OGU named after I.S. Turgenev", Orel, Russia,  
<sup>1</sup>secretary@interra-o-orel.ru  
<sup>2</sup>gen996@mail.ru

Corresponding author: Evgeniy Andreevich Mironov, gen996@mail.ru

**Abstract.** An analysis of digital transformation and development trends of energy supply companies was carried out in the context of the current regulatory framework of the Russian Federation. The role of demand aggregators in the concept of electricity demand management is considered. The advantages of demand management are noted as an effective means for leveling the overall consumption schedule in the energy system and reducing electricity supply costs for consumers.

**Keywords:** digital transformation, decentralized energy, energy sales industry, demand response, demand response aggregator, prosumer.

**For citation:** Yuryev Yu.N., Mironov E.A. The demand response concept as part of the digital transformation of energy supply companies // Energy and resource saving - XXI century. 2023. P. 66 – 70.

Введение. Одним из основных мировых трендов XXI века является внедрение цифровизации во все сферы жизни. Данный тезис активно обсуждается и поддерживается на уровне руководства страны и основных электроэнергетических компаний [1, 2, 3, 4, 5].

В текущих условиях действующего законодательства Российской Федерации, энергосбытовые компании и гарантирующие поставщики являются гарантами стабильного снабжения электроэнергией широких слоев населения, а также промышленных предприятий. Эффективность и результативность работы энергосбытовых компаний должна достигаться четкой организацией расчетов с потребителями, внедрением современных цифровых систем и сервисов для взаимодействия, что напрямую обеспечивает приток средств генерирующим компаниям и сетевым организациям и является одним из важнейших залогов успешного функционирования электроэнергетической отрасли в целом.

В сфере энергетики, продолжительное время, доминировала так называемая концепция «трех Д» или 3D:

- Decarbonization (декарбонизация) – вытеснение из энергетического баланса ископаемых видов топлива. К реализации декарбонизации можно отнести широкое использование и развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), повышение энергоэффективности работы оборудования и производственных процессов;

- Decentralization (децентрализация) – масштабное развитие распределенных источников энергии, появлении просьюмеров. К процессам децентрализации можно отнести появление микрогридов или микросетей и внедрение технологии блокчейна;

- Digitalization (цифровизация) – повсеместное применение цифровых управляемых устройств, подключенных к информационным сетям, например, применение интеллектуальных приборов учета и управления энергоресурсами.

В настоящее время наблюдается переход от концепции 3D к концепции 3С:

- Co-sufficiency (Со-обеспечение) – получение рассеянной энергии из окружающей среды в близости от потребителя, её сочетание с традиционной энергетикой;

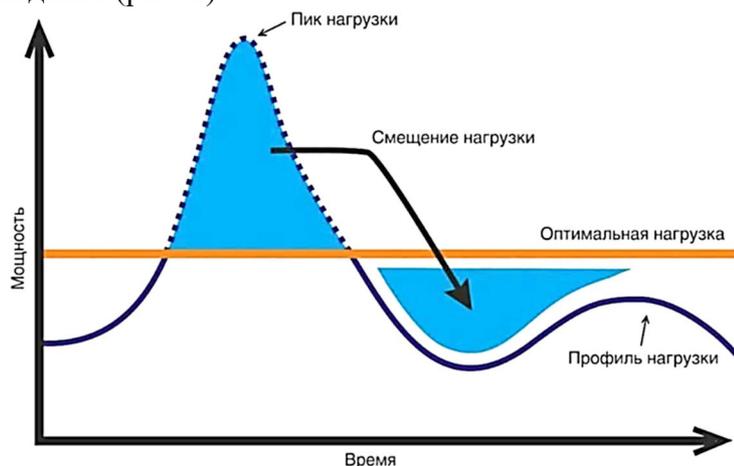
- Co-assembly (Со-организация) – гибкая интеграция и распределенное роботизированное управление источниками энергии и гибкости, а также инфраструктурой;

- Co-development (Со-развитие) – конструирование и настройка экономических отношений, обеспечивающая расширенное воспроизводство энергетики с учетом социальных и природных ограничений.

Цифровизация и внедрение децентрализованных энергосистем может рассматриваться как угроза существующей традиционной иерархической энергосистеме. При этом, масштабная и глобальная цифровизация открывает огромные возможности и сможет внести принципиальные изменения для преодоления барьеров, с которыми в настоящее время сталкивается энергетический сектор. В концепции децентрализованной энергетики, помимо крупных генерирующих электростанций, генерация появляется еще и у отдельных небольших потребителей, так называемых просьюмеров, которые имеют малую распределенную генерацию, зачастую основанную на возобновляемых источниках, и накопители электроэнергии. Цифровая трансформация предполагает преобразование и перестройку всей модели компании при помощи цифровых решений для целей выхода на новые рынки и создания новых цепочек продаж, которые генерируют дополнительную прибыль. Стоит отметить, что энергосбытовые компании уже начали процесс цифровой трансформации, которая в основном заключается в установке интеллектуальных приборов учета, модернизации текущих биллинговых систем, систем взаимодействия с потребителями, а также во внедрении личных кабинетов и порталов самообслуживания.

Первым шагом по стимулированию потребителей к участию в повышении энергоэффективности и выравниванию графиков нагрузки было внедрение дифференцированных по времени суток тарифов. Следующим шагом должно стать расширение внедрения концепции по управлению спросом (Demand Response, DR) или «ценозависимого снижения потребления» на розничном рынке электроэнергии, суть

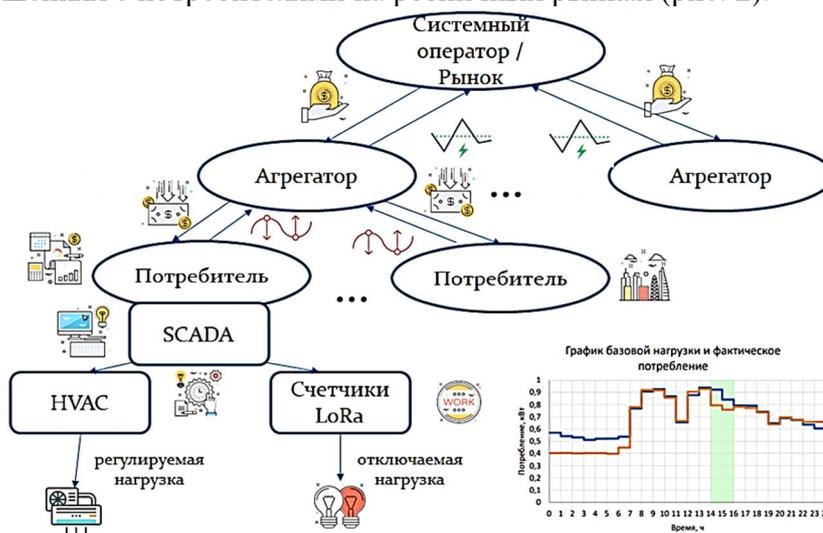
которого заключается в снижении нагрузки потребителями в часы, задаваемые Системным оператором, за вознаграждение (рис. 1).



**Рисунок 1 – Суть концепции управления спросом**

Основные цели концепции управления спросом на электроэнергию – уменьшение пиковой нагрузки в энергосистеме, необходимое как для снижения цен на рынке электроэнергии, так и для предотвращения избыточного капиталоемкого строительства электростанций и электрических сетей, оптимизация управления энергосистемой и интеграция возобновляемых источников энергии [6]. Управление спросом может способствовать максимизации эффекта от внедрения на стороне потребителя таких инновационных цифровых технологий, как интернет вещей, умный дом, системы энергоменеджмента зданий [7], хотя для потенциального участия в управлении спросом установка дополнительного оборудования на стороне потребителя не требуется.

Участвовать в данном механизме может любой потребитель с достаточно предсказуемым графиком нагрузки при наличии почасового прибора учета. Таким образом, выгоду получают как потребители, участвующие в данной программе, так и энергосистема за счет уменьшения спотовых цен оптового рынка вследствие снижения спроса на электрическую энергию в пиковые часы. При этом взаимодействие Системного оператора с конечными потребителями осуществляется через компании-агрегаторы управления спросом, в роли которых зачастую выступают энергосбытовые компании и гарантирующие поставщики, обладающие профессиональными компетенциями как в работе оптового рынка, так и во взаимоотношениях с потребителями на розничных рынках (рис. 2).



**Рисунок 2 – Схема взаимодействия в концепции управления спросом**

В настоящее время в России развивается ряд цифровых сервисов, которые упрощают взаимодействие между участниками в рамках концепции управления спросом согласно

Постановлению Правительства Российской Федерации № 287 от 20.03.2019 г. В 2023 году был принят Федеральный закон № 516-ФЗ от 02.11.2023 г. вносящий изменения в законодательство об электроэнергетике, направленные на создание правовой основы для функционирования системы управления спросом на электрическую энергию. В частности, закрепляется новый правовой статус «агрегатора управления спросом на электрическую энергию» и вводится обязательность раскрытия информации о совокупном экономическом эффекте от оказания услуг по управлению режимом потребления.

В Орловской области действует проект по управлению спросом на электроэнергию. В качестве Агрегатора спроса в регионе выступает ООО «Орловский энергосбыт» [8]. Благодаря участию в данном проекте у предприятий есть возможность не только снизить расходы на электроэнергию, но и получить дополнительный доход путём перераспределения и оптимизации собственной нагрузки электроэнергии. При этом от потребителя для участия в проекте достаточно только наличия почасового учёта и возможности дистанционно передавать почасовые данные.

Механизм взаимодействия с Агрегатором спроса на электроэнергию:

1. необходимо определить объём возможного снижения потребления электроэнергии исходя из особенностей технологических процессов предприятия (без ограничений);
2. выбрать период снижения нагрузки (2 или 4 часа).
3. заключить договор на оказание услуг по изменению нагрузки электроэнергии с ООО «Орловский энергосбыт».
4. следовать командам Системного оператора по снижению собственного потребления электроэнергии и зарабатывать на изменении нагрузки.

Команды по снижению нагрузки будут осуществляться в рабочие дни в плановые часы пиковой нагрузки (рис.3), утвержденные АО «СО ЕЭС», не более 5 раз в месяц. Агрегатор осуществляет выплаты участникам проекта по итогам месяца по факту выполненной ими нагрузки.

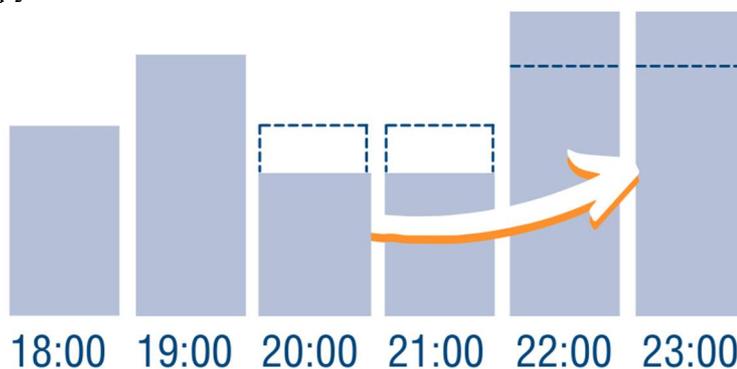


Рисунок 3 – Пример изменения нагрузки в пиковые часы

Закключение. Таким образом, в современных реалиях функционирования энергосбытовых компаний, регламентированного нормативно-правовыми актами действующего законодательства Российской Федерации, расширение практики применения такого сервиса как Управление спросом сможет обеспечить выравнивание общего графика потребления в энергосистеме, сокращение затрат на электроснабжение у потребителей, экономию по топливу, капиталовложениям и эксплуатационным затратам за счет снижения вводов нового генерирующего оборудования. Дальнейшая поддержка эффективных и инновационных концепций, участие в пилотных проектах, расширение области применения и широкого транслирования опыта их использования позволит сохранять лидирующие позиции на конкурентном розничном рынке электроэнергии, а также являться одним из примеров результативного и успешного функционирования в процессе цифровой трансформации электроэнергетической отрасли в целом.

### Список источников

1. Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017-2030 годы» от 09.05.2017 № 203
2. Указ Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года» от 07.05.2018 № 204
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Цифровая экономика РФ» от 28.07.2017 № 1632р
4. Концепция ПАО «Россети» «Цифровая трансформация 2030» (протокол заседания Совета директоров ПАО «Россети» от 21.12.2018 №336);
5. Дорожная карта по реализации концепции «Цифровая трансформация 2030» (приказ ПАО «Россети» от 20.03.2019 №56).
6. Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе Единой энергетической системы России. Агрегаторы управления спросом на электроэнергию. Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr\\_agregator\\_concept.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_concept.pdf)
7. «Demand Response» на Российском рынке: барьеры и перспективы. VYGON Consulting, Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://www.so-ups.ru/uploads/media/vygon\\_consulting\\_dr\\_v0.3.1\\_2018.pdf](https://www.so-ups.ru/uploads/media/vygon_consulting_dr_v0.3.1_2018.pdf)
8. Агрегатор управления спросом на электроэнергию // ООО «Орловский энергосбыт» URL: <https://interra-orel.ru/services-legal/agregator-upravleniya-sprosom-na-elektroenergiyu/>

### References

1. Decree of the President of the Russian Federation “On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017-2030” dated 05/09/2017 No. 203
2. Decree of the President of the Russian Federation “On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period until 2024” dated 05/07/2018 No. 204
3. Order of the Government of the Russian Federation “Digital Economy of the Russian Federation” dated 28/07/2017 No. 1632r
4. Concept of PJSC Rosseti “Digital Transformation 2030” (minutes of the meeting of the Board of Directors of PJSC Rosseti dated 21/12/2018 No. 336);
5. Roadmap for the implementation of the concept “Digital Transformation 2030” (Order of PJSC Rosseti dated 20/03/2019 No. 56).
6. The concept of functioning of aggregators of distributed energy resources as part of the Unified Energy System of Russia. Electricity demand management aggregators. System operator of the Unified Energy System [Electronic resource] / Access mode: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr\\_agregator\\_concept.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_concept.pdf)
7. “Demand Response” on the Russian market: barriers and prospects. VYGON Consulting, System operator of the Unified Energy System [Electronic resource] / Access mode: [https://www.so-ups.ru/uploads/media/vygon\\_consulting\\_dr\\_v0.3.1\\_2018.pdf](https://www.so-ups.ru/uploads/media/vygon_consulting_dr_v0.3.1_2018.pdf)
8. Electricity demand management aggregator // Oryol Energy Sales LLC URL: <https://interra-orel.ru/services-legal/agregator-upravleniya-sprosom-na-elektroenergiyu/>

### Информация об авторах

Ю.Н. Юрьев – генеральный директор

Е.А. Миронов – магистр, инспектор технического контроля, ассистент кафедры электрооборудования и энергосбережения

### Information about the authors

Yu.N. Yuryev – General Director

E.A. Mironov – master’s degree, technical control inspector, assistant at the Department of Electrical Equipment and Energy Saving

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 13.11.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

### СЕКЦИЯ 3. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

**Никольский Олег Константинович**, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электротехника и автоматизированный электропривод» и быта» ФГБОУ ВО «АлтГТУ имени Ползунова И.И.», г. Барнаул.

---

Научная статья  
УДК 72.025.5

#### **Поиск новых схемотехнических и конструкционных решений, направленных на повышение эффективности функционирования водонапорной башни Рожновского**

**Чернышов Вадим Алексеевич<sup>1</sup>, Бирюков Сергей Владимирович<sup>2</sup>,  
Лёвин Иван Сергеевич<sup>3</sup>, Слизин Иван Андреевич<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>blackseam78@mail.ru, [https:// orcid.org/0000-0002-5955-5540](https://orcid.org/0000-0002-5955-5540)

<sup>2</sup>sergey.baranow2017@gmail.com

<sup>3</sup>ivan-de03@mail.ru

<sup>4</sup>slizin003@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Бирюков Сергей Владимирович, sergey.baranow2017@gmail.com

***Аннотация.*** В статье обосновывается необходимость отыскания новых способов, направленных на совершенствование систем артезианского водоснабжения. Рассматривается несколько инженерно-технических решений, которые в перспективе могли бы существенным образом повысить эффективность функционирования физически и морально изношенных водонапорных башен Рожновского.

***Ключевые слова:*** водоснабжение, артезианская скважина, водонапорная башня Рожновского, источник бесперебойного питания, двухпроводная система электропитания, моноблок инвертор-двигатель, обратная связь по звуковому давлению.

***Для цитирования:*** Чернышов В.А., Бирюков С.В. Поиск новых схемотехнических и конструкционных решений, направленных на повышение эффективности функционирования водонапорной башни Рожновского // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 71 - 75.

Energy and resource conservation in the agro-industrial complex

#### **Search for new circuit and structural solutions aimed at improving the efficiency of the Rozhnovsky water tower**

**Chernyshov Vadim Alekseevich<sup>1</sup>, Biryukov Sergey Vladimirovich<sup>2</sup>, Lyovin Ivan Sergeevich<sup>3</sup>,  
Slizin Ivan Andreevich<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>blackseam78@mail.ru, [https:// orcid.org/0000-0002-5955-5540](https://orcid.org/0000-0002-5955-5540)

<sup>2</sup>sergey.baranow2017@gmail.com

<sup>3</sup>ivan-de03@mail.ru

<sup>4</sup>slizin003@mail.ru

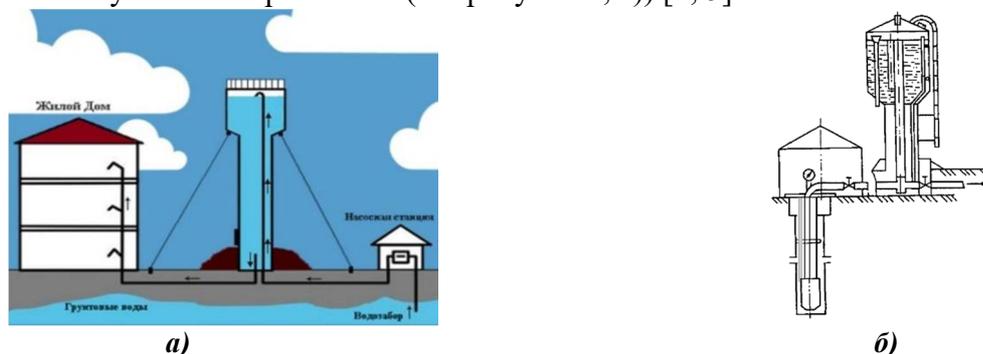
Corresponding author: Biryukov Sergey Vladimirovich, sergey.baranow2017@gmail.com

**Annotation.** The article substantiates the need to find new methods aimed at improving artesian water supply systems. Several engineering and technical solutions are being considered that in the future could significantly increase the efficiency of the functioning of Rozhnovsky's physically and morally worn-out water towers.

**Keywords:** water supply, artesian well, Rozhnovsky water tower, uninterruptible power supply, two-wire power supply system, monoblock inverter-motor, feedback on sound pressure.

**For citation:** Chernyshov V.A. Search for new circuit and structural solutions aimed at improving the efficiency of the Rozhnovsky Water Tower // Energy and Resource conservation – XXI century. 2023. P. 71 - 75.

Водоснабжение является одним из стратегически важных основ обеспечения жизнедеятельности современного общества, наряду с электроснабжением, газоснабжением, телекоммуникационным обеспечением и др. [1]. От надежности и бесперебойности водоснабжения во многом зависит качество жизни населения, а также эффективность функционирования объектов агропромышленного комплекса. Как известно, перебои в водоснабжении могут стать не только причиной социальных потрясений, но и могут привести к возникновению аварийных ситуаций, влекущих за собой серьезные финансовые последствия. Таким образом, к действующим системам централизованного водоснабжения предъявляются высокие требования, регламентируемые различными нормативно-техническими документами [2-4], неукоснительное выполнение которых контролируется на государственном уровне. Тем не менее, процесс длительной эксплуатации объектов водонапорного хозяйства неизбежно сопровождается физическим и моральным износом, как отдельных узлов и агрегатов, так и схмотехнических решений в целом. Вместе с тем, перед научным сообществом открываются все новые возможности, позволяющие энтузиастам технического творчества повышать надежность и бесперебойность функционирования действующих систем водоснабжения, за счет разработки и внедрения новых инженерно-технических решений, основанных на современных достижениях научно-технического прогресса. Так, одним из широко применяющихся способов водоснабжения, в настоящее время, является подъем воды из артезианской скважины в водонапорный бак, из которого вода самотёком поступает к потребителю (см. рисунок 1, а)) [1, 5].



**Рисунок 1 – Специфика функционирования водонапорной башни Рожновского**

Для этого используются погружной центробежный насос, который вместе с трехфазным асинхронным электродвигателем, заключенным в водонепроницаемый кожух, опускается на тросе (вместе с водопроводом) в скважину, на глубину залегания водоносного слоя (см. рисунок 1 б)). Работой насоса управляет автоматика, включающая и выключающая его в зависимости от уровня воды в водонапорном баке [6].

Анализ рассмотренного схмотехнического решения показал, что с учетом возрастающих и ужесточающихся требований, предъявляемых к современным системам водоснабжения, данный способ не может в полной мере обеспечивать надежность, бесперебойность и энергоэффективность доставки воды до потребителей, так как:

- при исчезновении питающего напряжения, водозабор полностью прекращается, а исчезновение одной из фаз питающего напряжения, при работающем электронасосе приводит к преждевременному выходу его из строя [7];

- при работе электронасоса не контролируется уровень воды над водоносным пластом в скважине, в результате чего не исключается режим сухой работы электронасоса, приводящий

к преждевременному выходу его из строя;

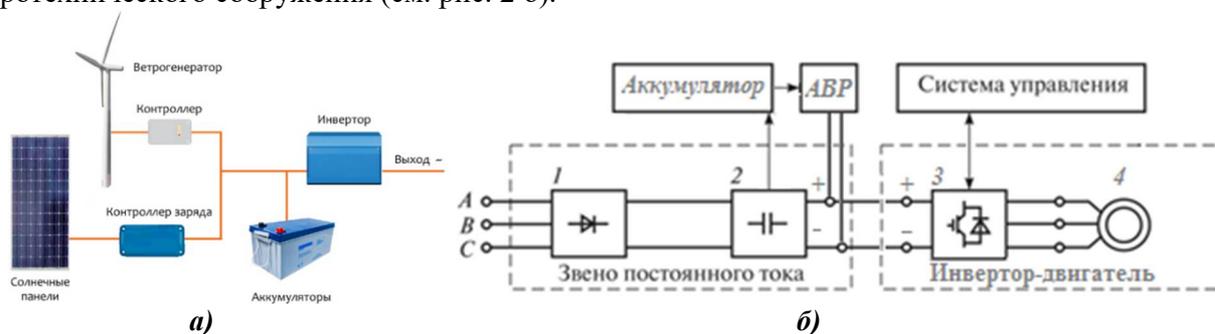
- для электропитания и подвески электронасосного агрегата используются трехжильный кабель и стальной трос, сечение которых зависит от мощности электродвигателя, а длина от глубины залегания водоносного слоя, что зачастую приводит к потерям электрической энергии, а также перерасходу электротехнических и конструкционных материалов.

С учетом вышеизложенного, в основе использования традиционной системы подъема воды из артезианской скважины в водонапорный бак, предложенной в 1936 году советским инженером А.А. Рожновским и массово используемой в настоящее время, лежат неэффективные конструктивные и схмотехнические решения, требующие пересмотра.

На кафедре электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» на постоянной основе проводятся поисковые НИР, направленные на повышение энергетической эффективности электротехнических комплексов и систем [8], в том числе и объектов водоснабжения. Результатами этой работы является разработка новых инженерно-технических решений, технико-экономически целесообразных для практического внедрения на физически и морально изношенных артезианских водозаборных пунктах.

Как известно электроснабжение в сельской местности осуществляется по воздушным электрическим сетям 10 кВ, работающих с изолированным режимом нейтрали. Статистика аварийности данных сетей указывает на то, что основными видами повреждений в них являются обрывы проводов и пробой изоляторов, которые зачастую приводят к потере одной из фаз на потребительских подстанциях или полному их обесточиванию, а это в свою очередь нарушает работу питающихся от них водозаборных сооружений [9].

Авторы данной публикации полагают, что для обеспечения надежной работы артезианского водозаборного сооружения с водонапорным баком, его целесообразно было бы оборудовать системой бесперебойного питания (см. рис. 2 а)), выполненной на базе электрохимического накопителя электрической энергии (аккумулятора), заряжаемого электрической сетью, а также от солнечной батареи или ветрогенератора, которые можно было бы расположить на вершине водонапорной башни [10]. Данный источник постоянного напряжения, установленный во вспомогательном помещении гидротехнического сооружения, можно использовать для резервного питания инвертора, размещающегося в одном корпусе, вместе с электродвигателем насосного агрегата. Это позволит не только обеспечить возможность автономного режима работы электронасосного агрегата при отказе внешней системы электроснабжения, но и повысит надежность функционирования принятого схмотехнического решения за счет сокращения количества питающих электронасос цепей, а также за счет обеспечения оптимального теплового режима транзисторных ключей инвертора. В нормальном режиме (при питании от электросети 0,4 кВ), питание инвертора 3 будет осуществляться от трехфазного выпрямителя 1,2 являющегося звеном постоянного тока штатного преобразователя частоты, который должен быть вынесен в отдельный блок, располагающийся во вспомогательном помещении гидротехнического сооружения (см. рис. 2 б)).



**Рисунок 2 – Структурная схема электропитания электронасосного агрегата постоянным током**

Электропитание (+) инвертора 3, находящегося вместе с электродвигателем 4 насоса на дне скважины от источников постоянного напряжения, расположенных на поверхности скважины целесообразно выполнить с использованием одножильного самонесущего проводом марки СИП-3, выполняющего по совместительству и роль троса. Электропитание (-) инвертора 3

при этом будет обеспечивать водопродная труба, оснащённая обратным клапаном, исключающим обратный отток воды.

Для исключения сухого хода электронасоса, возникающего при дефиците воды в артезианской скважине, предлагается интегрировать в систему частотного управления электроприводом насосного агрегата обратную связь по акустическому шуму, формируемому электронасосом, изменяющую производительность электронасоса в зависимости от уровня воды в шахте (см. рис. 3 а)) [11, 12].

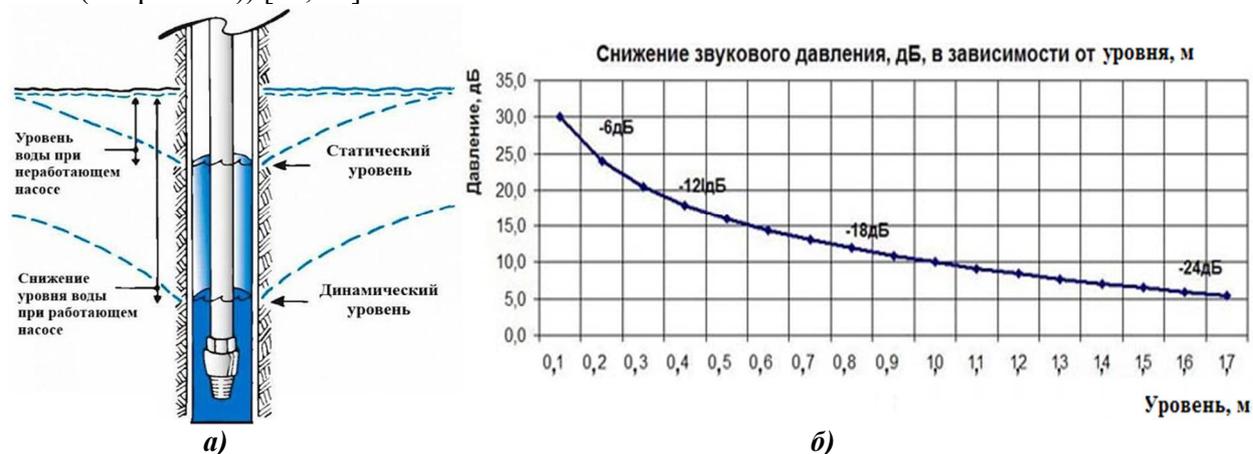


Рисунок 3 – Зависимость акустического шума от изменения уровня воды в скважине

Принцип работы данной системы автоматического регулирования основывается на том, что в случае усиления акустического шума (см. рис. 3 б)), возникающего при увеличении области контактирования корпуса работающего электронасосного агрегата с атмосферой скважины, формируется сигнал на понижение частоты питающего напряжения, обеспечивающее соответствующее замедление частоты вращения лопастей насосного агрегата, вплоть до их полной остановки, исключающей возможность сухого хода.

Конечно же, каждое из предлагаемых инженерно-технических решений требует проведения дополнительных углубленных исследований на предмет их дальнейшего соответствия параметрам окружающей среды, характеру технологического процесса, а также требованиям надежности и безопасности. Однако уже сейчас можно предположить, что в перспективе, их внедрение может существенным образом повысить эффективность функционирования вновь строящихся и реконструируемых объектов артезианского водоснабжения, не требуя при этом серьезных капитальных вложений и эксплуатационных затрат. А это, в свою очередь, обеспечит высокое качество социальной и производственной инфраструктуры сельского и городского пространства.

#### Список источников

1. Инженерные сети, оборудование зданий и сооружений: Учебник/ Е.Н. Бухаркин, В.М. Овсянников, К.С. Орлов и др.; Под ред. Ю.П. Соснина. - М.: Высшая школа, 2001. - 415 с.
2. ГОСТ 25151-82. Водоснабжение. Термины и определения
3. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение Наружные сети и сооружения
4. СанПиН 2.1.4.544-96 Требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения.
5. Чернов, А.В. Основы гидравлики и теплотехники [Текст] / А.В. Чернов, Н.К. Бессеребренников, В.С. Силецкий. - М.: Энергия, 1976. - 416 с.
6. Славин, Р. М. Техника в сельском хозяйстве [Текст] / Р. М. Славин, А. П. Гришин. - Вып. 11: Автоматизация электронасосных установок. - 1987. - С. 33.
7. Беликов, Р.П. Моечные аппараты высокого давления как средство обеспечения пищевой безопасности / Р.П. Беликов, И.Н. Фомин, В.А. Чернышов. – Контроль качества продукции: Ежемесячный международный научно-практический журнал. – 2022. – №7. – ООО «РИА «Стандарты и качество». – С.54-56. – 63 с.
8. Горшенин, В.П. Методика определения расхода и температуры, вырабатываемой горячей воды при расчете тепловой схемы водогрейной котельной / В.П. Горшенин, А.Н. Качанов, В.А. Чернышов // Промышленная энергетика: Ежемесячный производственно-технический журнал. – 2021. – №5. – Москва: Издательство НТФ «Энергопрогресс». – С.28-33. – 60 с.

9. Чернышов, В.А. Обоснование целесообразности применения систем временного электроснабжения по однопроводным воздушным линиям электропередачи 10 кВ в условиях чрезвычайных ситуаций / В.А. Чернышов, Р.А. Головин // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век: материалы XX международной научно-практической конференции, Орёл, 14–16 ноября 2022 года. – С. 81-84. – 162 с.

10. Петренко, Ю.Н. Использование солнечной энергии для питания бытовых потребителей / Ю.Н. Петренко, А.М. Трещ // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. — 2013. — № 1. — С. 40-46.

11. Гришин, А.П. Автоматизация и производство [Текст] / А.П. Гришин. -Вып. 10: Защита и управление при эксплуатации погружных электронасосов. Автоматическое управление при работе на башню. - 1996. - С. 6

12. Березин, С.Е. Насосные станции с погружным насосами. Расчет и конструирование. – М.: ОАО Издательство «Стройиздат», 2008. – 160 с.: ил.

### References

1. Engineering networks, equipment of buildings and structures: Textbook / E.N. Bukharkin, V.M. Ovsyannikov, K.S. Orlov and others; Ed. Yu.P. Pine. - M.: Higher School, 2001. - 415 p.

2. GOST 25151-82. Water supply. Terms and Definitions

3. SNiP 2.04.02-84. Water supply External networks and structures

4. SanPiN 2.1.4.544-96 Requirements for water quality of non-centralized water supply.

5. Chernov, A.B. Fundamentals of hydraulics and heat engineering [Text] / A.B. Chernov, N.K. Besserebrenikov, B.S. Siletsky. - M.: Energy, 1976. - 416 p.

6. Slavin, R. M. Technology in agriculture [Text] / R. M. Slavin, A. P. Grishin. - Vol. 11: Automation of electric pumping installations. - 1987. -S. 33.

7. Belikov, R.P. High-pressure washing machines as a means of ensuring food safety / R.P. Belikov, I.N. Fomin, V.A. Chernyshov. – Product quality control: Monthly international scientific and practical journal. – 2022. – No. 7. – RIA Standards and Quality LLC. – P.54-56. – 63 s.

8. Gorshenin, V.P. Methodology for determining the flow rate and temperature of hot water produced when calculating the thermal circuit of a hot water boiler house / V.P. Gorshenin, A.N. Kachanov, V.A. Chernyshov // Industrial energy: Monthly production and technical magazine. – 2021. – No. 5. – Moscow: Publishing house NTF “EnergoProgress”. – P.28-33. – 60 s.

9. Chernyshov, V.A. Justification of the feasibility of using temporary power supply systems via single-wire overhead power lines of 10 kV in emergency situations / V.A. Chernyshov, R.A. Golovin // Energy and resource saving - XXI century: materials of the XX international scientific and practical conference, Orel, November 14–16, 2022. – pp. 81-84. – 162 s.

10. Petrenko, Yu.N. Using solar energy to power household consumers / Yu.N. Petrenko, A.M. Tresch // News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. Energy. - 2013. - No. 1. - P. 40-46.

11. Grishin, A.P. Automation and production [Text] / A.P. Grishin. -Vol. 10: Protection and control during operation of submersible electric pumps. Automatic control when working on the tower. - 1996. - P. 6

12. Berezin, S.E. Pumping stations with submersible pumps. Calculation and design. – М.: OJSC Publishing House “Stroyizdat”, 2008. – 160 p.: ill.

### Информация об авторах

В.А. Чернышов – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения.

С.В. Бирюков – студент бакалавриата;

И.С. Лёвин – студент бакалавриата;

И.А. Слизин – студент бакалавриата.

### Information about the authors

V.A. Chernyshov – candidate of sciences in technology, docent of Electric equipment and energy saving department.

S.V. Biryukov – undergraduate student;

I.S. Lyovin - undergraduate student;

I.A. Slitheen – undergraduate student.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 08.11.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 76 - 81.  
Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 76 - 81.

Энергоэффективность систем электроснабжения промышленности и направления их  
развития

Научная статья  
УДК 621.311.24

**Применение ветро-солнечной электростанции в осенне-зимний период для частного  
домостроения Орловской области**

**Михаил Сергеевич Походных**

ОГУ имени И.С. Тургенева  
Орёл, Россия  
pohodnih16@gmail.com

*Аннотация.* В статье рассмотрена возможность применение ветро-солнечной электростанции в осенне-зимний период для энергоснабжения частного домостроения Орловской области. Приведены результаты анализа эффективности генерации от ветрогенераторов и солнечных батарей одинаковой мощности по отношению к потребляемой электроэнергии.

*Ключевые слова:* ветро-солнечная электростанция; возобновляемые источники энергии; альтернативная энергетика.

*Для цитирования:* Походных М.С. Применение ветро-солнечной электростанции в осенне-зимний период для частного домостроения орловской области // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 71 – 76.

Energy efficiency of industrial power supply systems and directions of their development  
Original article

**The use of wind and solar power plants in the autumn–winter period for private housing  
construction in the Oryol region**

**Mikhail Sergeevich Pokhodnykh**

OSU named after I.S. Turgenev  
Orel, Russia  
pohodnih16@gmail.com

*Abstract.* The article considers the possibility of using a wind – solar power plant in the autumn - winter period for the power supply of private housing construction in the Orel region. The results of the analysis of the efficiency of generation from wind turbines and solar panels of the same power in relation to the consumed electricity are presented.

*Keyword:* wind and solar power plant; renewable energy sources; alternative energy.

*For citation:* Pokhodnykh M.S. The use of wind and solar power plants in the autumn-winter period for private housing construction in the Oryol region // Energy and resource conservation – XXI century. 2023. P. 76 - 81.

Введение. Для автономных солнечных электростанций (СЭС), применимых в Орловской области, основной проблемой в осенне-зимний период является уменьшение продолжительности солнечной инсоляции и возрастание потребления электроэнергии [2]. Это приводит к глубокому разряду аккумуляторных батарей (АКБ). Летом использование АКБ минимально, а в осенне-зимний период они длительное время могут находиться без подзарядки, что пагубно влияет на их срок службы, вплоть до выхода из строя [1]. Для предотвращения разрушения аккумуляторов было рассмотрено возможное применение ветро-солнечной электростанции для энергоснабжения в осенне-зимний период [5].

Анализ. Обойтись без накопления энергии невозможно в связи с отсутствием солнечной генерации ночью. При анализе энергопотребления частного домостроения можно сказать, что существуют два основных максимума с 12:00 до 14:00 (дневное) и с 17:00 до 19:00 (вечернее время) (рисунок 1).

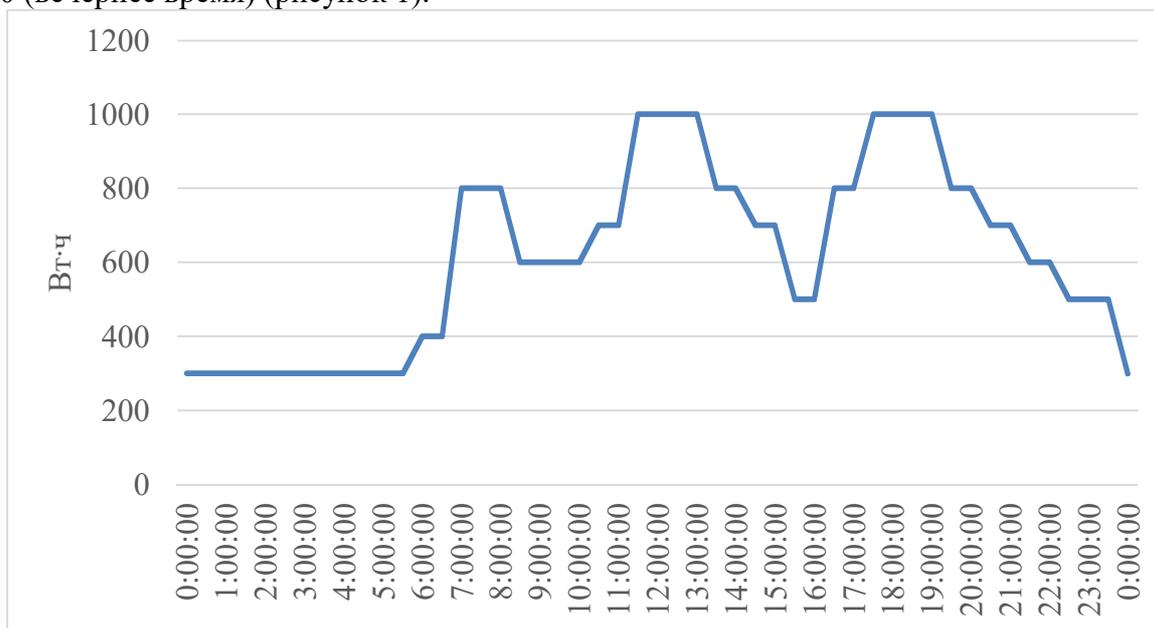


Рисунок 1 – Суточный график потребления энергии частного домостроения в осенне-зимний период

Если в дневное время солнечной энергии, в большинстве случаев, хватает на полное, или частичное обеспечение электроэнергией без применения, или частичного применения накопленной энергии с АКБ, так как самая большая часть инсоляции приходится на 12 часов дня, то при вечернем пике потребления, особенно в осенний период, приходится прибегать к использованию накопленной за день энергии с АКБ, что показано на рисунке 2 [9].

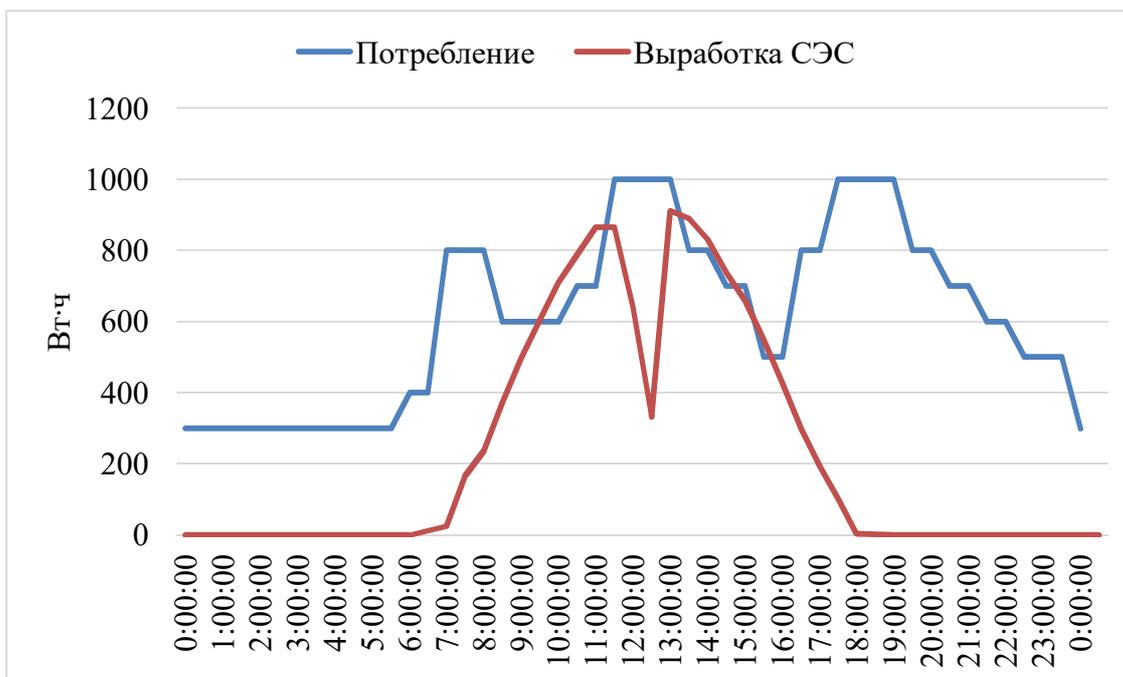
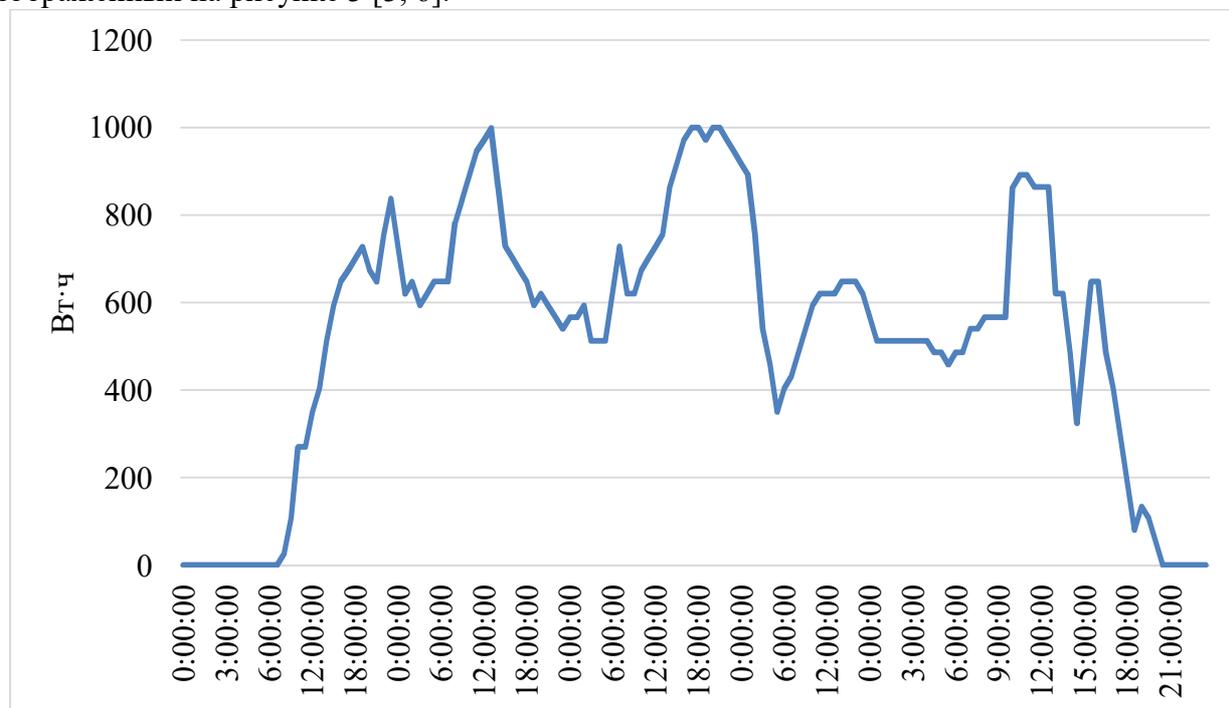


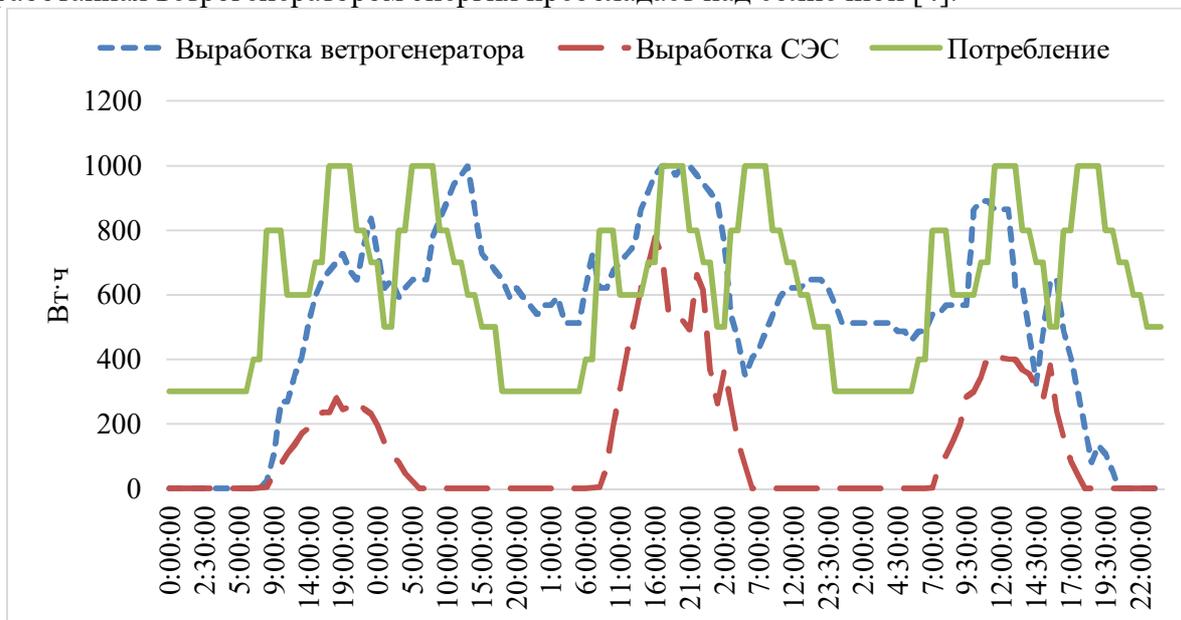
Рисунок 2 – Суточный график потребления энергии частного домостроения и выработки СЭС в осенне-зимний период (03.10.2023)

По метеонаблюдениям в Орловской области в этот период года сила ветра возрастает. Применение в дополнении к солнечным батареям ветрогенератора может восполнить нехватку энергии [10]. На основании имеющихся данных с действующей метеостанции города Орла был построен график выработки электроэнергии 3-х ветрогенераторов общей установленной мощностью 1500 Вт в период с 7 октября по 9 октября 2023 года, изображенный на рисунке 3 [3, 6].



**Рисунок 3 – Выработка электроэнергии 3-х ветрогенераторов общей мощностью 1500 Вт в период с 07.10.2023 г. по 09.10.2023 г.**

При одинаковой мощности солнечных батарей в 1500 Вт, на рисунке 4 видно, что выработанная ветрогенератором энергия преобладает над солнечной [4].



**Рисунок 4 - График потребления энергии частного домостроения, выработки СЭС и ветрогенератора в осенне-зимний период с 07.10.2023 г. по 09.10.2023 г.**

На рисунке 5 приведена схема ветро-солнечной электростанции [7].

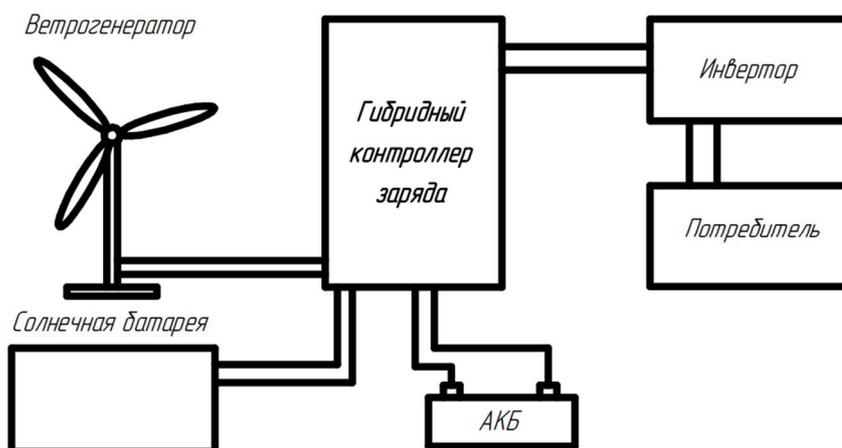


Рисунок 5 – Схема ветро-солнечной электростанции

В состав комбинированной электростанции входит солнечная батарея (СБ), ветрогенератор, аккумуляторная батарея, гибридный контроллер заряда, который следит за работой СБ, ветрогенератора и зарядом АКБ, а также инвертор для преобразования постоянного напряжения в переменное 220 В частотой 50 Гц. При ветровой или солнечной активности происходит электропитание нагрузки и зарядка аккумуляторов, если ветер и солнце отсутствуют (ночью, во время штиля), то нагрузка питается от АКБ [8].

Сравним эффективность генерации от ветрогенераторов и солнечных батарей одинаковой мощности по отношению к потребляемой электроэнергии. Она определяется как коэффициент прямого использования (КПИ):

$$\text{КПИ}_{\text{вет}} = \frac{W_{\text{В.В.}}}{W_{\text{П}}} \quad 1)$$

$$\text{КПИ}_{\text{солн}} = \frac{W_{\text{В.С.}}}{W_{\text{П}}} \quad 2)$$

где  $\text{КПИ}_{\text{вет}}$  - коэффициент прямого использования ветрогенерации;  
 $\text{КПИ}_{\text{солн}}$  - коэффициент прямого использования солнечной генерации;

$W_{\text{В.В.}}$  – энергия выработанная ветрогенератором, Вт;

$W_{\text{В.С.}}$  – энергия выработанная СБ, Вт;

$W_{\text{П}}$  – энергия потребленная, Вт.

Получившиеся значения отражены на рисунке 6.

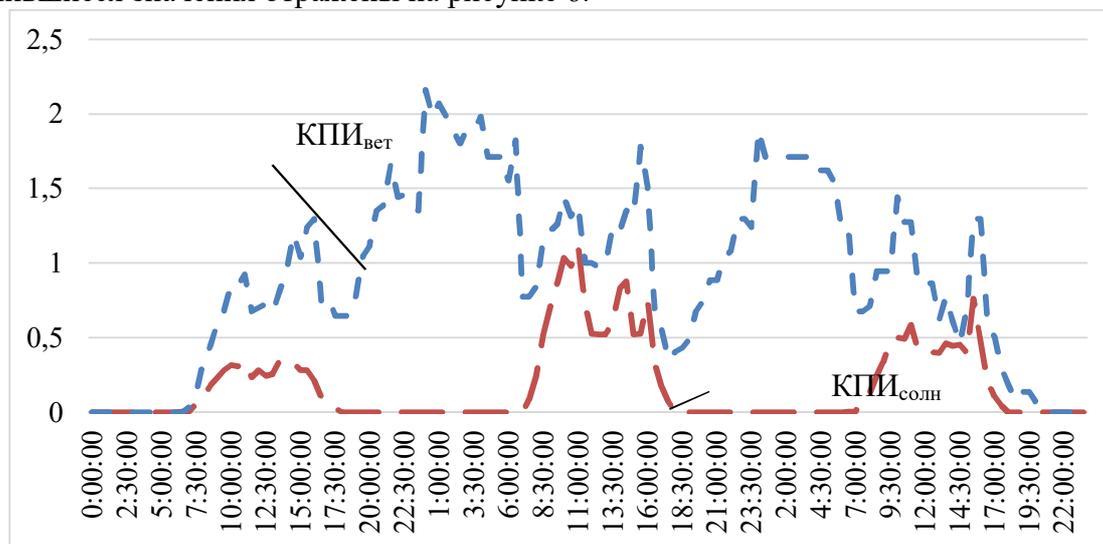
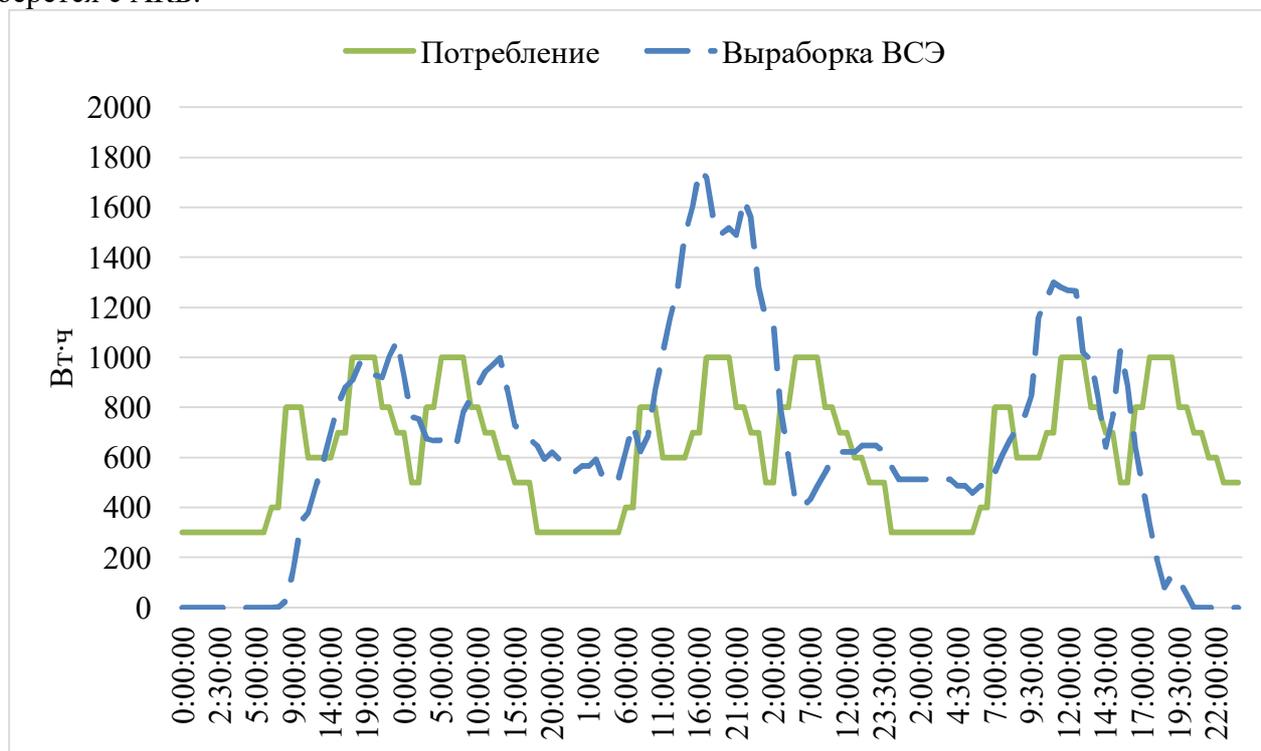


Рисунок 6 - График коэффициентов прямого использования солнечной и ветрогенерации с 07.10.2023 г. по 09.10.2023 г.

На графике (рисунок 6) видно, что  $KPI_{вет}$  за выбранный период превосходит  $KPI_{солн}$ , что говорит о преимуществе ветровой энергии за выбранный период.

При  $KPI > 1$  происходит заряд аккумуляторов, а при  $KPI < 1$  часть или вся энергия берётся с АКБ.



*Рисунок 7 - График потребления энергии частного домостроения и выработка энергии ветро-солнечной электростанции период с 07.10.2023 г. по 09.10.2023 г.*

На графике (рисунок 7) показано, что выработка энергии ветро-солнечной электростанции в определенные периоды перекрывает потребление, что позволяет зарядить аккумуляторы и в дальнейшем использовать эту энергию. Таким образом, возможна полная автономия от городской сети.

Закключение. На основании всего вышеизложенного можно сделать вывод, что применение ветро-солнечной электростанции для частного домостроения в Орловской области является возможным.

#### Список источников

1. Вайнел, Джордж Вуд. Аккумуляторные батареи [Текст] / Перевод с англ. инж. П. И. Устинова. - 4-е изд. - Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1960. - 480 с. : ил.; 21 см.
2. Парашук, Д. Ю. Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии: препринт / Д. Ю. Парашук; МГУ. - М.: УНЦ ДО НИИЯФ МГУ, 2009. - 20 с.
3. Сайт [Электронный ресурс]: RealMeteo, Сбор данных о погоде осуществляется сертифицированными цифровыми метеостанциями в режиме реального времени / Режим доступа: <https://realmeteo.ru/orel/1/history>. (Дата обращения 20.10.2023)
4. Кашкаров А. П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. – М.: ДМК Пресс, 2011 – 144 с.
5. О., А. Суржикова und Б. В. Лукутин Возобновляемые источники энергии / О. А. Суржикова und Б. В. Лукутин. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2022. - 80 с.
6. Ветро-солнечный генератор и его характеристики Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, И.Б. Самородов и др. // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2019, № 6. С. 201-214.
7. Новокрещенов О.В. Отмахов Г.С., Хуаде М.Ю. Комбинированные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии Политематический сетевой электронный научный журнал

Кубанского государственного аграрного университета. 2017. №№ 132. С. 786-797. DOI 10.21515/1990-4665-132-063

8. Новая элементная база возобновляемых источников электроэнергии: моногр. / О.В. Григораш, Ю. Попов, Е.В. Воробьев и др. Краснодар: КубГАУ, 2018. 202 с.

9. Григораш О.В. Кривошей А.А. Смык В.В. Автономные гибридные электростанции // Политемати ческий сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 124. С. 1441-1452. DOI: 10.21515/1990-4665-124-005

10. Ветро-солнечная система автономного электроснабжения / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев, А.А. Лысаков и др. // Сельский механизатор. 2018. № 4. С. 28-29.

#### References

1. Weinel, George Wood. Rechargeable batteries [Text] / Translated from English by eng. P. I. Ustinov. - 4th ed. - Moscow ; Leningrad : Gosenergoizdat, 1960. - 480 p. : ill.; 21 cm.

2. Parashchuk, D. Yu. Modern photovoltaic and photochemical methods of solar energy conversion: preprint / D. Yu. Parashchuk; MSU. - M.: UNC TO NIIYAF MSU, 2009. - 20 p.

3. Website [Electronic resource]: RealMeteo, Weather data collection is carried out by certified digital weather stations in real time / Access mode: <https://realmeteo.ru/orel/1/history>. (Accessed 20.10.2023)

4. Kashkarov A. P. Wind generators, solar panels and other useful structures. – Moscow: DMK Press, 2011 – 144 p.

5. O., A. Surzhikova und B. V. Lukutin Renewable energy sources / O. A. Surzhikova und B. V. Lukutin. - M.: LAP Lambert Academic Publishing, 2022. - 80 p.

6. Wind-solar generator and its characteristics Ya.M. Kashin, L.E. Kopelevich, I.B. Samorodov, etc. // Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU". 2019, No. 6. pp. 201-214.

7. Novokreschenov O.V. Otmakhov G.S., Khuade M.Yu. Combined power supply systems based on renewable energy sources Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2017. No. 132. pp. 786-797. DOI 10.21515/1990-4665-132-063

8. The new element base of renewable energy sources: monogr. / O.V. Grigorash, Yu. Popov, E.V. Vorobyev, etc. Krasnodar: KubGAU, 2018. 202 p.

9. Grigorash O.V. Krivoshei A.A. Smyk V.V. Autonomous hybrid power plants // Political network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2016. No. 124. pp. 1441-1452. DOI: 10.21515/1990-4665-124-005

10. Wind-solar system of autonomous power supply / G.V. Nikitenko, E.V. Konoplev, A.A. Lysakov, etc. // Rural mechanizer. 2018. No. 4. pp. 28-29.

#### Информация об авторах

М.С. Походных – магистрант.

#### Information about the authors

M. S. Pokhodnykh – undergraduate.

Статья поступила в редакцию 12.11.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 12.11.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

### Аналитический метод расчета заиления водохранилищ ГЭС

Анвар Соидкулович Кодиров<sup>1</sup>, Георгий Николаевич Петров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центр инновационного развития науки и новых технологий Национальной Академии наук Таджикистан, Душанбе, Таджикистан,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>dr.kodirov@gmail.ru

<sup>2</sup>geomar@bk.ru

Автор, ответственный за переписку: Георгий Николаевич Петров, geomar@bk.ru

**Аннотация.** В статье предложен расчетно-графический метод расчета динамики объема водохранилища, объем которого уменьшается за счет заиления речными наносами.

**Ключевые слова:** водохранилище, заиление, испарение, морфометрические характеристики, наполнение, приток воды, режим работы, сработка, холостые сбросы.

**Для цитирования:** Кодиров А. С., Петров Г. Н. Аналитический метод расчета заиления водохранилищ // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023 С. 82 – 86.

### Analytical method for calculating siltation of hydroelectric power station reservoirs

Anvar Soidkulovich Kodirov<sup>1</sup>, Georgy Nikolaevich Petrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Innovative Development of Science and New Technologies of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan,

<sup>2</sup>Oryol state university of I.S. Turgenev, Orel, Russia,

<sup>1</sup>dr.kodirov@gmail.ru

<sup>2</sup>geomar@bk.ru

Corresponding author: Georgy Nikolaevich Petrov, geomar@bk.ru

**Annotation:** The article proposes a computational and graphical method for calculating the dynamics of the volume of a reservoir, the volume of which decreases due to siltation by river sediments.

**Key words:** reservoir, siltation, evaporation, morphometric characteristics, filling, water inflow, operating mode, discharge, idle discharges.

**For citation:** Kodirov A. S., Petrov G. N. Analytical method for calculating siltation of hydroelectric power station reservoirs // Energy and resource saving - XXI century. 2023 P. 82 – 86.

Сегодня более 90 % электроэнергии в Таджикистане вырабатывается на крупных ГЭС, регулирование стока которых осуществляется водохранилищами, объем которых постоянно уменьшается за счет заиления.

Величину этого заиления и, соответственно полезный объем водохранилища, необходимый для обеспечения эффективной работы ГЭС, обычно определяют прямыми батиграфическими замерами, требующими сложного дорогостоящего оборудования и больших затрат труда и времени.

В то же время техническими службами ГЭС осуществляется непрерывный оперативный мониторинг его параметров, который позволяет определить полезный объем водохранилища и его морфометрические характеристики расчетным путем.

Для этого, выбрав какую-либо базовую точку: ( $W_0$ ;  $H_0$ ), остальные точки кривой зависимости уровня воды в водохранилище от его объема:  $H = f(W)$  можно получить непосредственно по уравнениям:

$$W(H_{i+1}) = W(H_i) + W_{акк.},$$

$$\Delta H = H_{i+1} - H_i.$$

где:

$$W_{акк.} = f(\Delta H) = \{Q_{пр.} - (Q_{ств.} + Q_{х. сб.} + Q_{исп.})\} \times t$$

$Q_{ств.}$  - расход воды через турбины ГЭС  
 $Q_{х. сб.}$  - холостые сбросы через гидроузел  
 $Q_{пр.}$  - приток воды к водохранилищу  
 $t$  – время.

В качестве примера такие расчеты были выполнены для водохранилища Нурекской ГЭС на рю Вахш, для которого в качестве базовой для дальнейших расчетов была принята точка:

$$W_0 = 10.5 \text{ км}^3; H_0 = 910 \text{ м.}$$

соответствующая проектному состоянию водохранилища.

Испарение при этом рассчитывалось по зависимости:

$$Q_{исп.}(t) = k \times S(t),$$

где

$$k = Q_{иск.} / S$$

$S$  – площадь водохранилища.

Значения коэффициентов  $k$  при этом приняты по прямым натурным наблюдениям, проводившимся на водохранилищах Таджикистана в течение достаточно длительного периода. Они приведены в таблице 1.

Площадь водохранилища Нурека определялась по зависимости:

$$S(H) = 0,39408 \times H - 267,86306, \text{ км}^2$$

На рисунках 1 и 2 приведены рассчитанные вышеописанным способом кривые  $H = f(W)$  Нурекского водохранилища для 2003 и 2004 года. Эти расчеты проводились как для ежесуточных, так и для среднемесячных данных. Они практически идентичны и имеют высокую точность – значение коэффициента детерминации -  $R^2$  для них находится в диапазоне  $0,997 \div 0,998$  при максимально возможном значении 1.

Таблица 1 - Опытные значения коэффициентов  $k$

Месяц	Янв.	Февр.	март	Апр.	май	июнь	июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
<b>k</b>	0,0037	0,0067	0,0157	0,0314	0,0513	0,0736	0,0813	0,0782	0,0554	0,0283	0,0143	0,0066

Учитывая аналогичность режимов работы водохранилища и практическую идентичность аналитических кривых объемов водохранилища в 2003 и 2004 годах, на рис 3 приведена их общая осредненная кривая. Там же показана проектная кривая объемов Нурекского водохранилища. Они практически повторяют друг друга – общий полезный объем водохранилища для них один и тот же, небольшое заилиние, порядка 5% аналитическая кривая показывает только на средних отметках, а к отметке 840 м. полезный проектный объем водохранилища практически полностью восстанавливается.

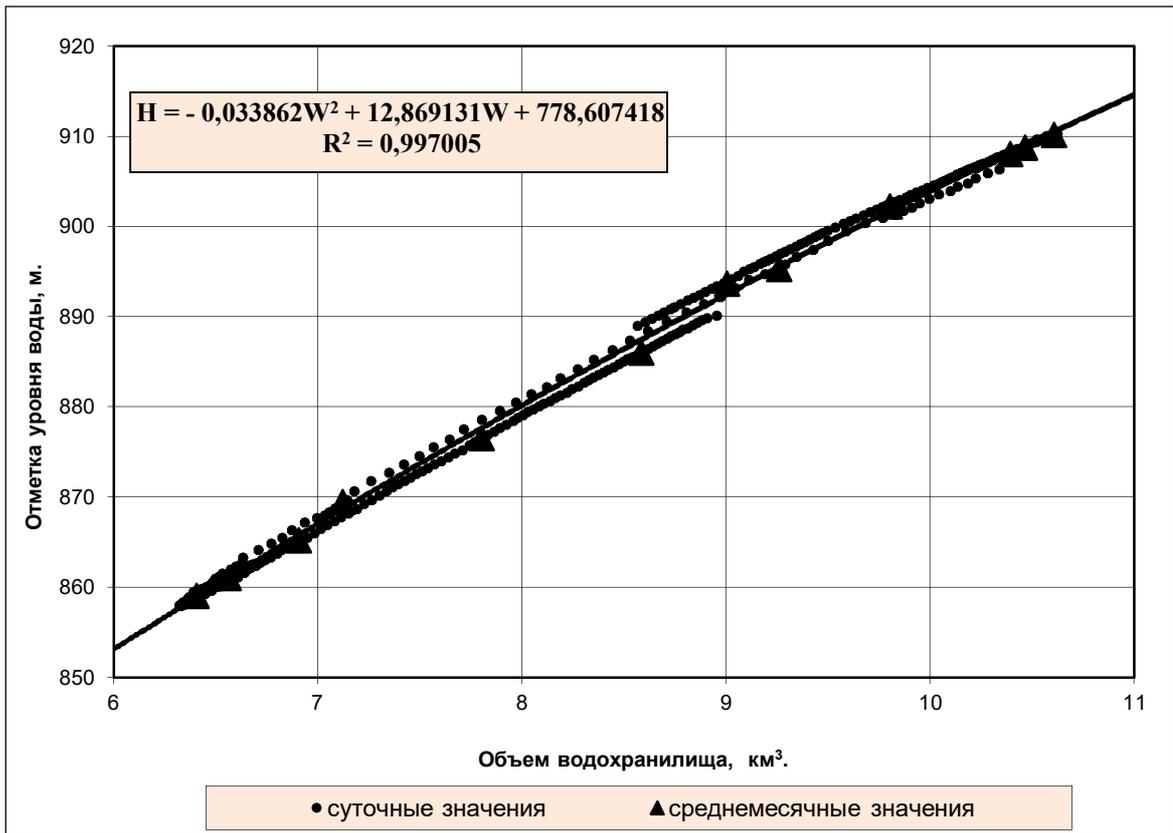


Рисунок 1 - Нурекская ГЭС. Зависимость  $H = f(W)$ . 2003 г.

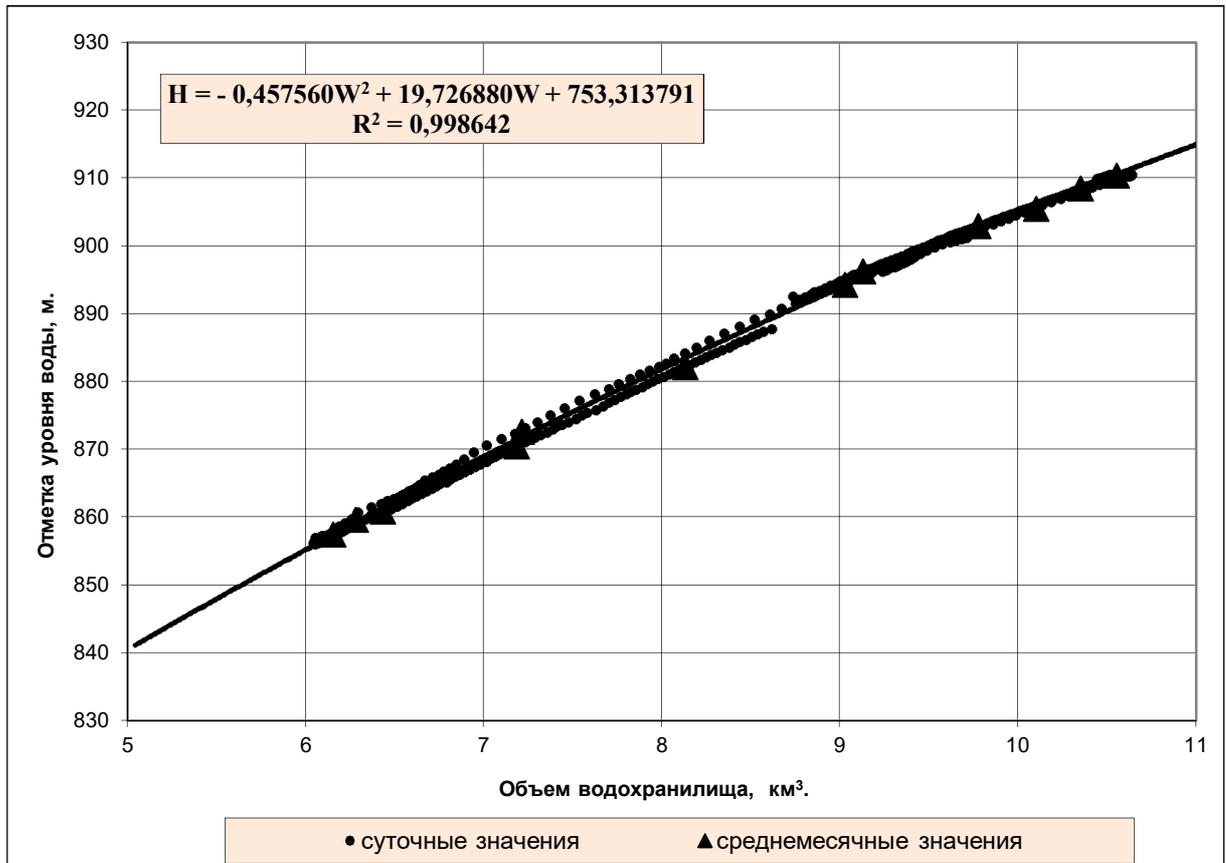


Рисунок 2 – Нурекская ГЭС. Зависимость  $H = f(W)$ . 2004 г.

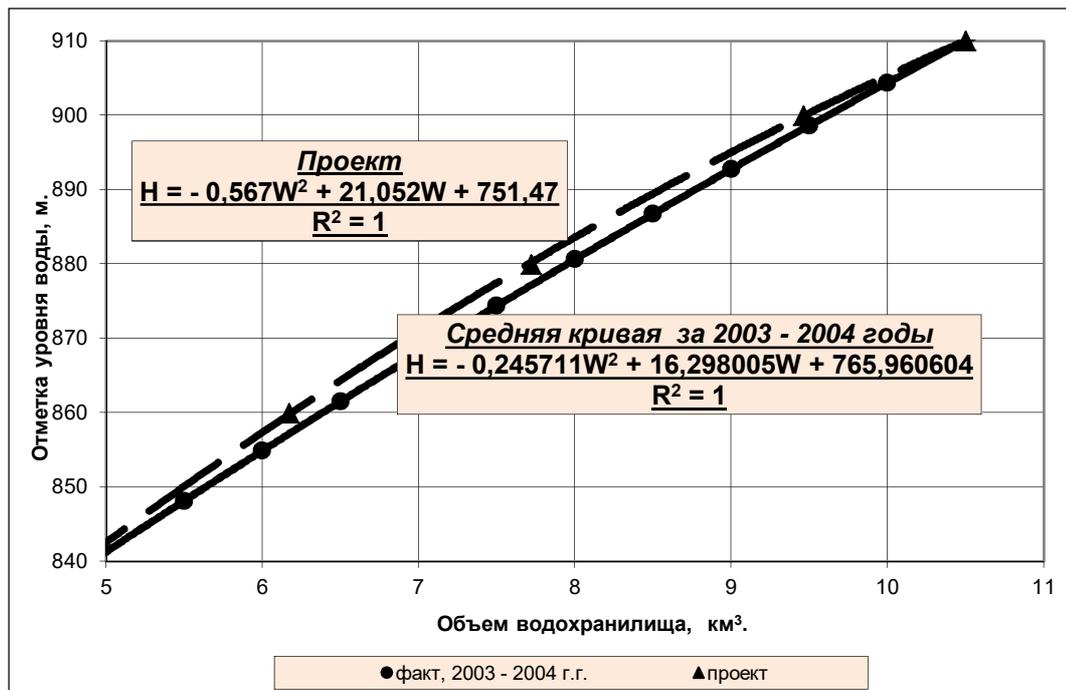


Рисунок 3 – Осредненная зависимость  $H = f(W)$

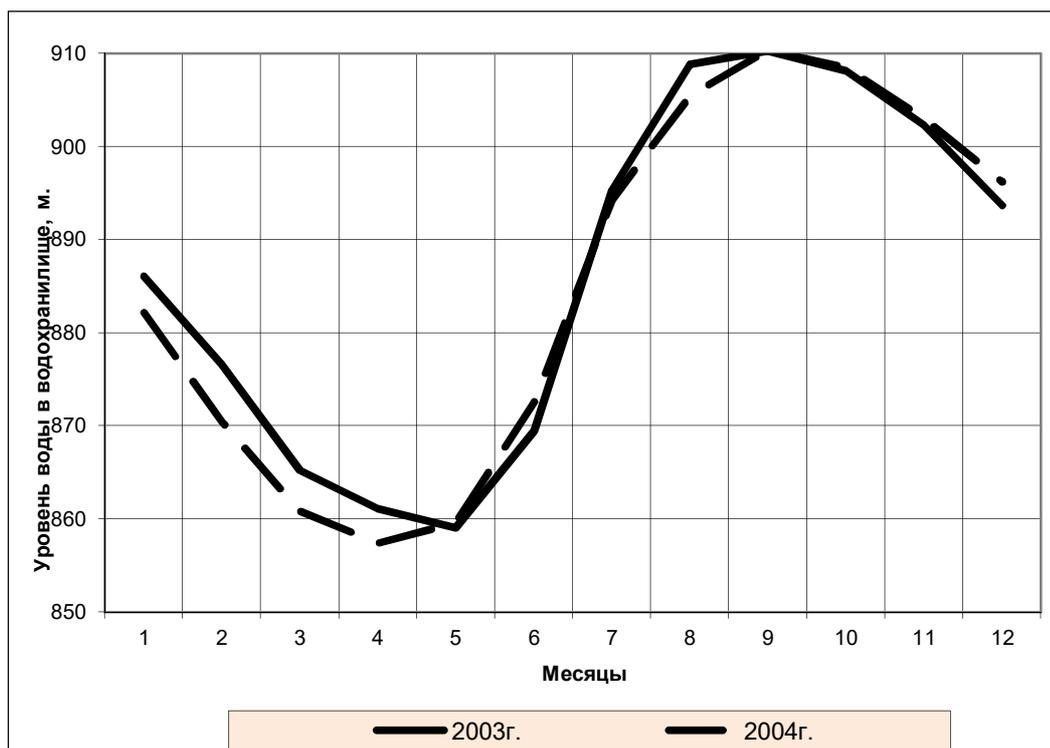


Рисунок 4 - Режим работы Нурекского водохранилища

На рис. 4 показаны соответствующие этим годам режимы работы Нурекского водохранилища: сработка – наполнение. Они показывают, что эти режимы практически не отличаются друг от друга.

#### Выводы

Предлагаемый метод расчета заиливания водохранилища по параметрам, ежесуточно контролируемым техническими службами гидроузла, позволяет с высокой точностью отслеживать уменьшение его полезного объема, что в свою очередь обеспечивает повышение эффективности его эксплуатации.

### Список источников

1. Бабкин В.И., Вуглинский В.С. Водный баланс речных бассейнов. - JL: Гидрометеиздат, 1982. 192 с.
2. Барышников Н. Б. Руководство к лабораторным работам по динамике русловых потоков и русловым процессам. Ленинград Гидрометеиздат 1991. 224 с.
3. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
4. Вуглинский В.С., Пугач С.П., Резник Э.А. Система гидрологических наблюдений: проблемы получения данных, их обобщения и обеспечение потребителей. Государственный водный кадастр. - В сб. «Пленарные документы» VI Всероссийского гидрологического съезда. - М.: Метеоагентство Росгидромета, 2008. С. 27-37.
5. Гвелесиани Л.Г., Шмьцель Н.П. Заиление водохранилищ гидроэлектростанций. М.\* "Энергия", 1968. 86 с.
6. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока авторы: Г.В. Железняков, Т.А. Неговская, Е.Е. Овчаров, 1984. 431с.
7. Михневич, Э. И. Расчет водохранилища сезонного регулирования: пособие для студентов специальности 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» / Э. И. Михневич. – Минск: БНТУ, 2021. 55 с.
8. Петров Г. Н. Расчет заиления водохранилищ. Курс повышения квалификации: Водно-энергетические ресурсы и их использование. Доклад- презентация. YouTube канал «Land and Water CA». 28 июня 2021 г. DOI: 10.13140/RG.2.2.18965.04328 [https://www.youtube.com/playlist?list=PLR7jBCjSbC\\_QjubnGmoVu1A7Qi23eQkQE](https://www.youtube.com/playlist?list=PLR7jBCjSbC_QjubnGmoVu1A7Qi23eQkQE)
9. Практикум по гидрологии, гидрометрии и регулированию стока / Овчаров Е.Е. и др. 1988. 223 с.

### References

1. Babkin V.I., Vuglinsky V.S. Water balance of river basins. - JL: Gidrometeoizdat, 1982. 192 p.
2. Baryshnikov N. B. Manual for laboratory work on the dynamics of channel flows and channel processes. Leningrad Gidrometeoizdat 1991. 224 p.
3. Vuglinsky V.S. Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR. - L.: Gidrometeoizdat, 1991. 223 p.
4. Vuglinsky V.S., Pugach S.P., Reznik E.A. System of hydrological observations: problems of obtaining data, their generalization and provision of consumers. State water cadastre. - On Sat. "Plenary documents" of the VI All-Russian Hydrological Congress. - M.: Meteorological Agency of Roshydromet, 2008, p. 27-37.
5. Gvelesiani L.G., Shmtsels N.P. Siltation of hydroelectric power reservoirs. M. "Energy", 1968, 86 p.
6. Hydrology, hydrometry and flow regulation authors: G.V. Zheleznyakov, T.A. Negovskaya, E.E. Ovcharov, 1984. 431 p.
7. Mikhnevich, E. I. Calculation of a reservoir for seasonal regulation: a manual for students of specialty 1-70 04 03 "Water supply, water disposal and protection of water resources". Minsk: BNTU, 2021. 55 p.
8. Petrov G. N. Calculation of siltation of reservoirs. Advanced training course: Water and energy resources and their use. Report-presentation. YouTube channel "Land and Water CA". June 28, 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.18965.04328 [https://www.youtube.com/playlist?list=PLR7jBCjSbC\\_QjubnGmoVu1A7Qi23eQkQE](https://www.youtube.com/playlist?list=PLR7jBCjSbC_QjubnGmoVu1A7Qi23eQkQE)
9. Workshop on hydrology, hydrometry and flow regulation / Ovcharov E.E. et al. 1988. 223 p.

### Информация об авторах

А. С. Кодиров – директор Центра инновационного развития науки и новых технологий;  
Г. Н. Петров – д-р. техн. наук, профессор кафедры электрооборудования и энергосбережения;

### Information about the authors

A. S. Kodirov – director of the Center for Innovative Development of Science and New Technologies;  
G. N. Petrov – dr. tech. Sciences, professor of Electric equipment and energy saving department.

Статья поступила в редакцию 08.10.2023; одобрена после рецензирования 15.10.2023; принята к публикации 22.10.2023.

The article was submitted 08.10.2023; approved after reviewing 15.10.2023; accepted for publication 22.10.2023.

Научная статья  
УДК 674.047.3-047.58

### Сравнительный анализ деградации светодиодных источников света с применением программы DIALux

Леонид Владимирович Корбушов<sup>1</sup>, Егор Сергеевич Андреев<sup>2</sup>,  
Татьяна Геннадьевна Королева<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,  
<sup>1</sup>leo1121111@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Леонид Владимирович Корбушов, leo1121111@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье представлен сравнительный анализ деградации светодиодных источников света с использованием программы DIALux. Исследование охватывает результаты анализа деградации светодиодных источников света, особенно в условиях эксплуатации, при которых не соблюдается необходимый температурный режим. Приведены результаты анализа деградации светодиодных источников света в ходе их эксплуатации и несоблюдении температурного режима.

**Ключевые слова:** светодиодные источники света; деградация светодиодов; производительность световых систем; энерго- и ресурсосберегающие технологии.

**Для цитирования:** Андреев Е.С., Корбушов Л.В., Королева Т.Г. Сравнительный анализ деградации светодиодных источников света с применением программы DIALux // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 87 – 90.

Energy and resource saving in the agro-industrial complex

Original article

### Comparative analysis of degradation of LED light sources using the DIALux program

Leonid Vladimirovich Korbushov<sup>1</sup>, Egor Sergeevich Andreev<sup>2</sup>,  
Tatiana Gennadievna Koroleva<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia  
<sup>1</sup> leo1121111@mail.ru

Corresponding author: Leonid Vladimirovich Korbushov, leo1121111@mail.ru

**Abstract.** This article presents a comparative analysis of the degradation of LED light sources using the DIALux program. The study covers the results of the analysis of degradation of LED light sources, especially in operating conditions in which the required temperature regime is not observed. The results of the analysis of degradation of LED light sources during their operation and non-compliance with the temperature regime are presented.

**Keywords:** LED light sources; degradation of LEDs; performance of lighting systems; energy- and resource-saving technologies.

**For citation:** Andreev E.S., Korbushov L.V., Koroleva T.G. Comparative analysis of degradation of LED light sources using the DIALux program // Energy and resource saving – XXI century. 2023. P. 87 – 90.

Введение. В мире современного освещения, выбор и оценка источников света являются ключевыми аспектами проектирования и создания комфортных и эффективных осветительных систем.

Массовое использование светодиодных источников света в жилищно-бытовом секторе, различных отраслях промышленности, а также для уличного освещения связано с повышением энергоэффективности и их соответствующей экономности. Для внедрения данных источников света создаются законы и нормативные документы [1]. Многие производители указывают довольно большой срок службы таких источников света, кто-то 100000 часов, кто-то 50000, кто-то 10000. На практике данные показатели отличаются и зависят от многих факторов. На данный момент неизвестны истинные показатели срока службы и надежности. Данный факт усложняет расчеты экономической составляющей при внедрении светодиодных источников света. А при проектировании освещения, как правило, не учитывают деградацию светильников.

Одной из главных причин снижения показателя срока службы является температурный режим светодиода, так при повышении температуры до 110 С, срок службы светодиода снижается в два раза [2]. Для обеспечения нормального температурного режима требуются радиаторы и теплоотводящий блок.

Также показатели электрической энергии влияют на срок службы, при превышении номинальной силы тока, указанной в документации, и эксплуатации светодиодов при рабочей температуре выше или ниже допустимых значений происходит повреждение кристаллической решетки. Снижается мощность излучения кристалла. Поврежденные области продолжают генерировать тепло, но света не излучают. Электрический ток перестает проходить через участки кристалла, излучающие свет. Затем вследствие увеличения разности потенциалов на выводах светодиода уменьшается его мощность. Есть и другие факторы влияющие на работу светодиодных светильников.

В данной статье рассмотрено снижение освещенности на примере парка культуры и отдыха г. Ливны при несоблюдении теплового режима, а также при деградации светильников в ходе долгой эксплуатации.

Расчеты освещенности были выполнены с использованием программы DIALux. При проектировании освещенности парка были выбраны консольные светодиодные светильники VARTON V1-S1-70660-40L30-6604050 (срок службы 50000 часов) для освещения тропинок и дорог и прожекторные светильники JAZZWAY PFL-C3 50W (срок службы 30000 часов) для освещения сцен парка.

Нормы освещенности указаны в СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» для уличного освещения, а именно в таблице 26 «Классификация и нормируемые показатели для пешеходных пространств» [3]. В этой таблице указаны показатели 6 лк и минимальные показатели в 2 лк, на практике выбирают освещенность в 10-15 лк.

Показатели средней освещенности рассчитываемых поверхностей без учета деградации показаны на рисунке 1.



Рисунок 1 – Средняя освещенность рассчитываемых поверхностей

В [4] говорится, что после истечения срока службы световой поток светодиода снижается на 50 %. Произведем расчет освещенности после 3 лет эксплуатации. Световой поток светильников марки VARTON изменится с 5600 лм до 4128 лм, а марки JAZZWAY с 4250 лм до 2388 лм. Полученные результаты показаны на рисунке 2.



*Рисунок 2 – Средняя освещенность рассчитываемых поверхностей после 3 лет эксплуатации*

В результате несоблюдения температурного режима работы при эксплуатации уличных осветительных установок сокращается срок жизни светодиодов в два раза. Это наглядно видно на графике изменения освещенности, построенном за тот же период и представленном на рисунке 3.



*Рисунок 2 – Средняя освещенность рассчитываемых поверхностей после 3 лет эксплуатации и снижении срока службы в два раза*

**Заключение.** Анализируя полученные данные можно сделать выводы, что, не учитывая деградацию светодиодов можно получить снижение освещенности поверхностей практически в 2 раза за 3 года эксплуатации. Важно отметить, что в данном исследовании не учитывались другие факторы, такие как изменения параметров электроэнергии, циклы включения, деградация материалов самих светильников, которые также влияют на срок

службы осветительных установок. Для получения максимального срока службы светодиодных светильников необходимо применять ряд мероприятий по их обслуживанию.

#### **Список источников**

1. Внедрение энергосберегающих светодиодных систем освещения в государственных и частных сетях России // Полупроводниковая светотехника. 2009. № 2 [Электронный ресурс]: [http://www.led-e.ru/articles/ledapplication/2009\\_2\\_46.php](http://www.led-e.ru/articles/ledapplication/2009_2_46.php).

2. Снижение светового потока LED светильника [Электронный ресурс]: <https://diode-system.com/snizhenie-svetovogo-potoka-svetilnika.html> (дата обращения: 20.10.2023).

3. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* [Электронный ресурс] – Режим доступа – <https://vincci.ru/upload/docs/СП%2052.13330.2011.pdf> (дата обращения: 19.10.2023).

4. Какой срок службы LED светодиодов [Электронный ресурс]: <https://fosgroup.ru/articles/kakoy-srok-sluzhby-led-svetodiodov/> (дата обращения: 20.10.2023).

#### **References**

1. Introduction of energy-saving LED lighting systems in public and private networks of Russia // Semiconductor lighting engineering. 2009. No. 2 [Electronic resource]: [http://www.led-e.ru/articles/ledapplication/2009\\_2\\_46.php](http://www.led-e.ru/articles/ledapplication/2009_2_46.php).

2. Reduction of the luminous flux of the LED lamp [Electronic resource]: <https://diode-system.com/snizhenie-svetovogo-potoka-svetilnika.html> (accessed: 20.10.2023)

3. SP 52.13330.2011 "Natural and artificial lighting" Updated edition of SNiP 23-05-95\* [Electronic resource] – Access mode – <https://vincci.ru/upload/docs/СП%2052.13330.2011.pdf> (accessed: 19.10.2023).

4. What is the service life of LED LEDs [Electronic resource]: <https://fosgroup.ru/articles/kakoy-srok-sluzhby-led-svetodiodov/> (accessed: 20.10.2023).

#### **Информация об авторах**

Л.В. Корбушов – магистрант;

Е.С. Андреев – магистрант;

Т.Г. Королева – кандидат технических наук, доцент.

#### **Information about the authors**

L.V. Korbushov – undergraduate;

E.S. Andreev – undergraduate;

Koroleva T.G. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 15.11.2023.

The article was submitted 10.11.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 15.11.2023.

#### СЕКЦИЯ 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Руководитель:

**Поляков Роман Николаевич**, д-р. техн. наук, доцент, зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники  
ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

Научная статья  
УДК 621-833

#### Энергетические характеристики гидродинамических подшипников приводов ветрогенераторов

**Юрий Николаевич Казаков<sup>1</sup>, Нгуен Тхай Ха<sup>1</sup>, Лю Ифань<sup>1</sup>,  
Марахин Никита Алексеевич<sup>1</sup>, Леонид Алексеевич Савин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>KazakYurii@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9655-4520>

Автор, ответственный за переписку: Юрий Николаевич Казаков, KazakYurii@yandex.ru

**Аннотация.** Сделан анализ мировых тенденций развития ветровой энергетики и влияния различных факторов на энергетические характеристики ветрогенераторов. Рассмотрены условия работы и принципы расчета характеристик опор жидкостного трения осей сателлитов планетарных мультипликаторов. Представлены результаты расчета моментов трения, грузоподъемности и потерь мощности в высоконагруженных гидродинамических подшипниках в зависимости от геометрических, теплофизических и кинематических параметров.

**Ключевые слова:** ветрогенераторы, приводы вращения, планетарные мультипликаторы, гидродинамические подшипники, грузоподъемность, момент трения, потери мощности, энергетические характеристики, моделирование.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00789, <https://rscf.ru/project/22-19-00789/>.

**Для цитирования:** Казаков Ю.Н., Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Марахин Н.А., Савин Л.А. Энергетические характеристики гидродинамических подшипников приводов ветрогенераторов // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 91 – 97.

Intelligent technologies in power engineering

Original article

#### Energy characteristics of hydrodynamic fluid film bearings of wind generator drives

**Yuri Nikolaevich Kazakov<sup>1</sup>, Nguen Thai Ha<sup>1</sup>, Liu Yifan<sup>1</sup>, Marakhin Nikita Alekseevich<sup>1</sup>,  
Leonid Alekseevich Savin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>KazakYurii@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9655-4520>

Corresponding author: Yuri Nikolaevich Kazakov, KazakYurii@yandex.ru

**Abstract.** An analysis of global trends in the development of wind energy and the influence of various factors on the energy characteristics of wind generators is made. The operating conditions and principles for calculating the characteristics of the fluid friction bearings of the satellite axes of planetary multipliers are considered. The results of calculation of friction moments, load capacity and power losses in highly loaded hydrodynamic bearings depending on geometric, thermophysical and kinematic parameters are presented.

**Keywords:** wind generators, rotation drives, planetary multipliers, hydrodynamic bearings, load capacity, friction torque, power losses, energy characteristics, modeling.

**For citation:** Kazakov Yu.N., Nguen Thai Ha, Liu Ifan, Marakhin N.A., Savin L.A. Energy characteristics of hydrodynamic fluid film bearings of wind generator drives // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 91 – 97.

## Введение

Ветровая энергетика находится в тренде современного технологического развития и основывается на совершенствовании технологий создания эффективных электрических генераторов, изделий машиностроения и силовой электроники. Общее количество производимой в мире электрической энергии [1] составляет в настоящее время более полутора тысяч тераватт-часов (около 5,5 % электроэнергии), и наблюдается рост суммарной мощности ветрогенераторов [1] (рисунок 1). Энергия ветра практически неисчерпаема и является более экологически чистой в сравнении с распространенными в настоящее время ископаемыми видами топлива, однако сооружение ветровых электростанций сопряжено с объективными трудностями технического и экономического характера. Во многом это связано с непостоянством ветровых потоков, что создаёт проблемы с надёжностью производства электроэнергии при увеличении ее доли в общем объеме [2-3]. В настоящее время идет проектирование и создание ветровых генераторов мощностью более 15 МВт, что требует разработки конструктивных элементов с высокими показателями надежности, ресурса и эксплуатационных характеристик. Во многом это связано с трудностью проведения ремонтных работ, учитывая вес установок сотни тонн и высоту мачт более 100 метров. Можно констатировать достижение определенного предела совершенствования отдельных компонентов ветрогенераторов, в частности, энергетической эффективности винтов с точки зрения использования ветровой нагрузки [4-5]. Но и в этом направлении идет поиск перспективных технических решений на основе новых композитных материалов, управляемых механизмов корректировки шага и поворота винтов. Продолжается конкурентная борьба технических решений с прямым приводом вращения (многополюсные конструкции с постоянными магнитами) и генераторов с мультипликаторным приводом, в которых распространение получили двухступенчатые планетарные передачи с ведущим водилом [6-7] (рисунок 2).



Рисунок 1 – Рост вырабатываемой мощности ветроэнергетики

Конкурентоспособность объектов ветроэнергетики во многом определяется энергетической эффективностью изделий. В России применение ветрогенераторов во многом затруднено необходимостью использования дорогостоящих инверторов, аккумуляторов и

дизель-генераторов. Рост цен на природный газ позволяет снизить стоимость производимой ветром электроэнергии в сравнении с тепловыми станциями. Но при этом продолжается поиск технических решений отдельных элементов с высокими значениями коэффициентов полезного действия. В значительной мере это относится к роторным системам привода вращения.

### Энергетические характеристики опор роторов ветрогенераторов

В конструкциях приводов мощных ветрогенераторов для обеспечения длительного ресурса целесообразно применять подшипники скольжения с жидкостной смазкой в качестве опор осей сателлитов 1-й и 2-й ступени (рисунок 2). В связи с технической сложностью подачи смазочного материала с высоким давлением в зону трения вследствие планетарного движения зубчатых колес и опорных элементов целесообразно использовать гидродинамические подшипники (ГДП).

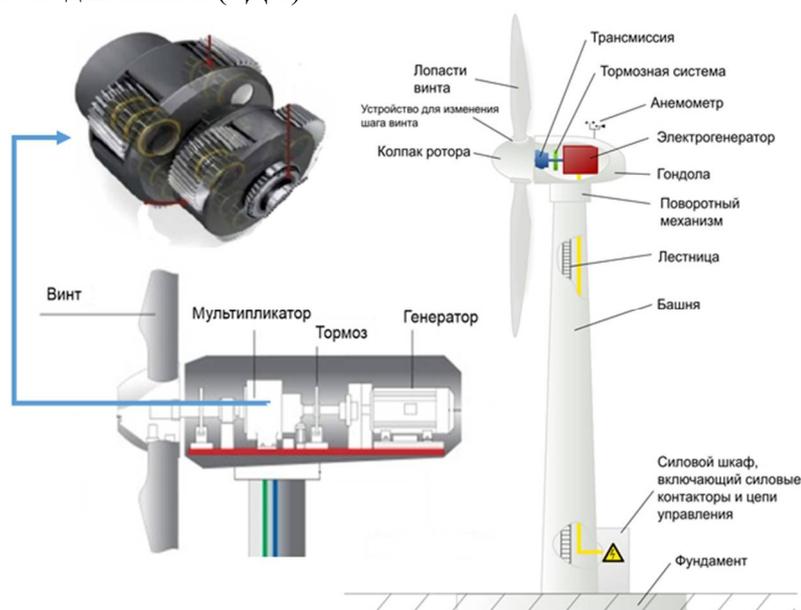


Рисунок 2 – Общий вид и устройство ветрогенератора

Решение этой задачи связано с необходимостью обеспечения надежной работы подшипников в режимах жидкостной и граничной смазки при больших нагрузках и невысоких частотах вращения сателлитов. Одним из важных вопросов при проектировании является расчет энергетических характеристик ГДП, значения которых в основном определяются трением в смазочном слое. В данной работе расчет этих характеристик проводился на базе математической модели гидродинамического подшипника жидкостного трения, схема подшипника, а также развертка смазочного слоя в цилиндрических координатах изображены на рисунке 3.

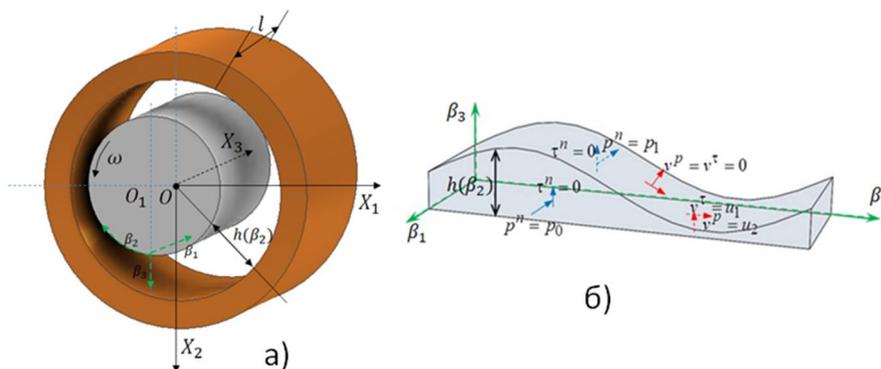


Рисунок 3 – Схема подшипника и развертка смазочного слоя в цилиндрических координатах

Модель подшипника в соответствие с рисунком 4 включает в себя следующие параметры.  $R(z) = r(z) + h_0$  – радиус подшипника, где  $r(z)$  радиус внутренней неподвижной оси,  $h_0$  – средний радиальный зазор.  $l$  – ширина подшипника. Втулка вращается с постоянной частотой  $n$  и совершает поперечные колебания. Жидкость подается в смазочный слой через дроссели под давлением  $p_0$ . Основные уравнения, описывающие движение среды удобнее представить в цилиндрических координатах  $\beta_i$ , где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  соответственно радиальная, угловая и осевая координаты. Цилиндрические координаты характеризуются коэффициентами Ламе  $H_1 = H_3 = 1, H_2 = \beta_1$ .

Модель гидродинамического подшипника жидкостного трения разработана на базе численного решения модифицированного уравнения Рейнольдса в цилиндрических координатах:

$$h^3 \frac{\partial}{\partial \beta_1} \left( \beta_1 \frac{\partial p}{\partial \beta_1} \right) + \frac{1}{\beta_1} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \beta_2} \right) = 6\mu u_1 h - 6\mu u_2 \frac{\partial h}{\partial \beta_2} - 12\mu u_3 \beta_1, \quad (1)$$

где  $u_1 = const, u_2 = \omega \left( r_0 + \frac{\beta_1 - \beta_1^-}{l_3} (r_1 - r_0) \right) + V_1 \cos \left( \frac{\beta_1^- \beta_2}{r_0} \right) - V_2 \sin \left( \frac{\beta_1^- \beta_2}{r_0} \right), u_3 = V_1 \sin \left( \frac{\beta_1^- \beta_2}{r_0} \right) + V_2 \cos \left( \frac{\beta_1^- \beta_2}{r_0} \right)$ , в свою очередь  $V_1$  и  $V_2$  компоненты скорости центра ротора.

В результате численного решения уравнения Рейнольдса получаем поле давлений смазочного материала в зазоре подшипника. Дальнейшее интегрирование поля давлений позволяет получить значения гидродинамических сил в проекциях на все оси:

$$\begin{aligned} F_1 &= - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \cos \alpha \cos \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \\ F_2 &= - \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \cos \alpha \sin \varphi \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \\ F_3 &= \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} p \sin \alpha \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол положения окрестности точки  $\beta_i$  на поверхности внутреннего цилиндра в координатах  $X_j$ .

В свою очередь, зная касательное напряжение  $s_{12}$  на поверхности внешнего цилиндра можно найти результирующий момент силы трения, создаваемый в опоре:

$$M = -r \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} \left( \frac{\partial p}{\partial \beta_2} \frac{h}{2\beta_1} + \frac{u_2 \mu}{h} \right) \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2. \quad (3)$$

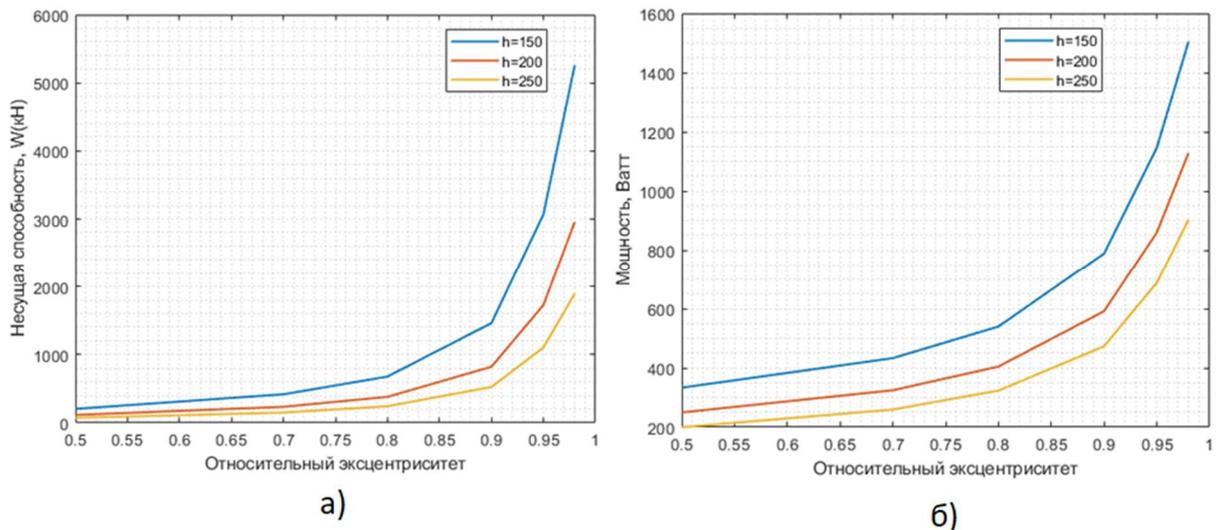
Расчет потерь мощности проводим с учетом момента трения:

$$D_N = M\omega. \quad (4)$$

Математическая модель гидродинамического подшипника жидкостного трения была реализована в программном комплексе Matlab. Для численного решения уравнения Рейнольдса использовался численный метод – метод конечных разностей.

### Результаты расчета характеристик ГДП ветрогенератора

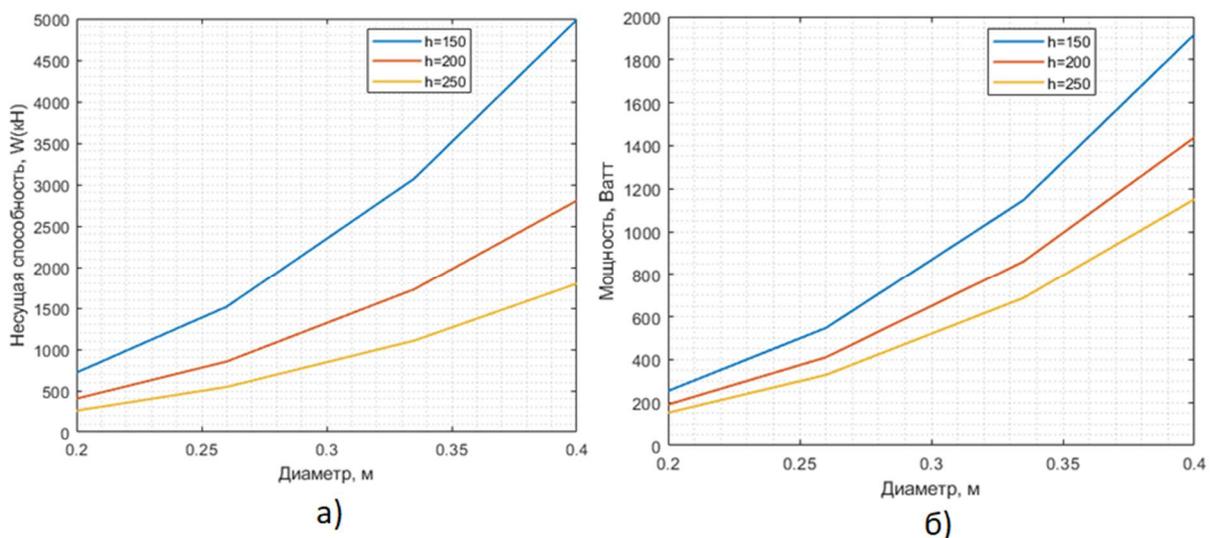
Расчет характеристик проводился для варианта подшипника диаметр которого  $D=335$  мм, ширина  $L=470$  мм, температура смазочного масла была равна  $40^\circ\text{C}$ , скорость вращения вала равнялась  $3.2$  рад/с. Для данного подшипника были рассчитаны несущая способность и момент трения. В ходе проведения имитационных вычислений такие параметры как средний зазор смазочного слоя, диаметр подшипника, а также относительный эксцентриситет были варьированными. Результаты расчетов несущей способности и потерь мощность в опоре в зависимости от относительного эксцентриситета при разных значениях зазора смазочного слоя представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4 - Зависимость несущей способности и потерь мощности от эксцентриситета при разных значениях зазора**

*а) несущая способность подшипника, б) потери мощности в опоре*

Как показывают результаты, представленные на рисунке 4, несущая способность увеличивается с увеличением эксцентриситета. Стоит отметить, что рост происходит нелинейно, особенно на больших значениях эксцентриситета несущая способность значительно возрастает. Однако данная зависимость характерна и для потерь мощности в опоре. Также стоит отметить, что функционирование на эксцентриситетах более 0,9 может привести к переходу режима трения от жидкостного к смешанному, что в свою очередь, зачастую, приводит к высокому показателю износа. За вероятность попадания ротора на больших эксцентриситетах в зону смешанного трения отвечают такие параметры, как величина среднего зазора смазочного слоя, а также шероховатость, которая напрямую зависит от диаметра подшипника и ротора. Ниже представлены результаты, которые показывают зависимости несущей способности подшипника и потерь мощности от диаметра подшипника при разных зазорах (рисунок 5).



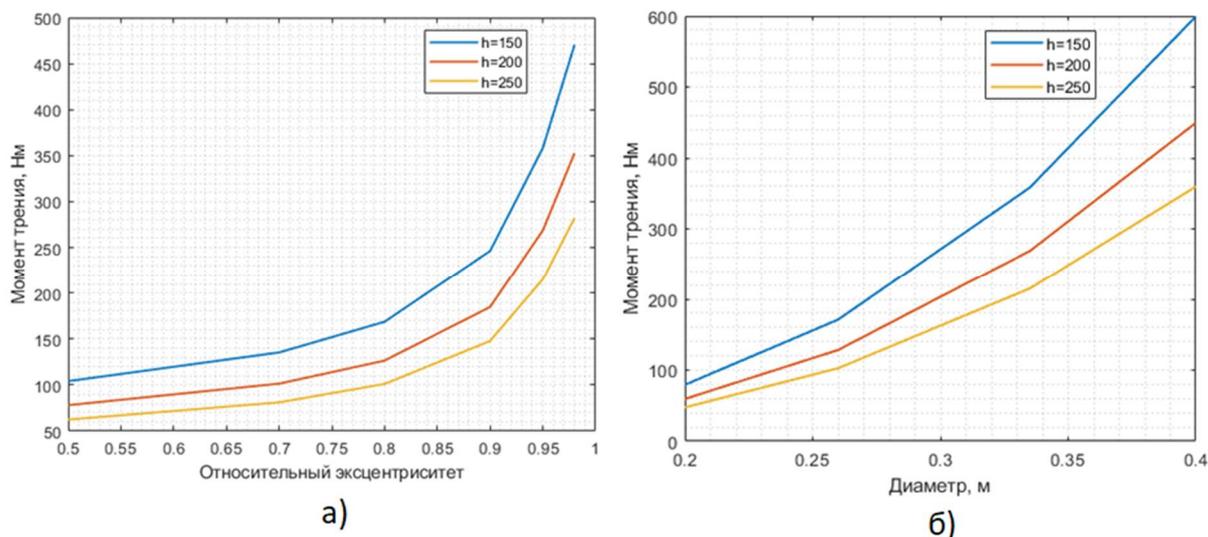
**Рисунок 5 - Зависимость несущей способности и потерь мощности от диаметра подшипника при разных значениях зазора**

*а) несущая способность подшипника, б) потери мощности в опоре*

Результаты показывают, что с увеличением диаметра несущая способность опоры и потери мощности в ней возрастают. Данная зависимость нелинейная, однако, степень ее

нелинейности достаточно мала. В свою очередь значение среднего зазора вносит значительный вклад в рассчитанные значения, что делает данный параметр более важным при конструировании опор.

Зависимости момента трения от диаметра ротора и эксцентриситета при разных значениях зазора представлены на рисунке 6.



**Рисунок 6 – Значение момента трения**

*а) в зависимости от эксцентриситета, б) в зависимости от диаметра ротора*

Данные на рисунке 6 показывают зависимости момента трения от варьируемых параметров. Данные зависимости имеют схожий характер с изменениями потерь мощности. Значения момента трения также значительно возрастают с увеличением эксцентриситета и с уменьшением величины смазочного слоя (рисунок 6).

Для данного варианта опоры можно отметить линию критической нагрузки равной  $F = 2384$  кН. Как результат, исходя из представленных результатов, значение необходимой несущей способности достигается на эксцентриситетах превышающих значение 0.9, которым соответствуют минимальные зазоры 7-9 мкм. Технологически допустимые минимальные зазоры при шероховатости  $Ra = 0.6 \dots 0.8$  также находятся в этих пределах. В результате, в данном случае имеет место переходный режим от жидкостной к полужидкостной (граничной) смазке. Для надежности и увеличения ресурса подшипника в данном случае рекомендуется использовать новые типы антифрикционных минеральных покрытий, которые имеют уникальные показатели износостойкости и коэффициента трения.

### **Заключение**

Результаты расчета моментов трения, потерь мощности и грузоподъемности высоконагруженных и низкооборотных гидродинамических подшипников осей планетарных коробок скоростей мощных ветрогенераторов свидетельствуют о значительном росте потерь на трение при больших значениях эксцентриситетов, что связано с увеличением уровня давлений в нагруженной зоне. В реальном ГДП при эксцентриситетах более 0,95 возможен контакт выступов шероховатостей, резкий рост потерь на трение и механический износ опорных поверхностей. Также следует отметить, что создаваемый в опоре момент трения и потери мощности имеет такую же зависимость, как несущая способность, что требует при проектировании принимать решения по выбору оптимальных значений грузоподъемности с учетом приемлемого момента трения.

### Список источников

1. Global Wind Report 2019 | Global Wind Energy Council. Дата обращения: 15 июля 2021. Архивировано 29 июня 2021 года.
2. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–8.
3. Tavner P. Offshore wind turbines: Reliability, availability and maintenance. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
4. Piffeteau S., Souchet D. Influence of Thermal and Elastik Deformations on Connecting-Rod Big End Bearing Lubrication Under Dynamic Loading // Journal of Tribology July 2000 Voll. 122(1). pp. 181-191.
5. Abdel-Aal, Hisham A. — On the Influence of Thermal Properties on Wear Resistance of Rubbing Metals at Elevated Temperatures. Journal of Tribology July 2000 Voll. 122(1). pp. 657—660(ТВ).
6. Савин Л.А., Соломин О.В., Устинов Д.Е., Пугачев А.О. Автоматизированный расчет роторных машин: монография – М.: Машиностроение-1, 2006. – 368 с.
7. Shengbo Li, Alexander Babin, Denis Shutin, Yu N Kazakov, Leonid Savin Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning Tribology International 175(4):107805.

### References

1. Global Wind Report 2019 | Global Wind Energy Council. Date accessed: July 15, 2021. Archived June 29, 2021.
2. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. R. 1–8.
3. Tavner P. Offshore wind turbines: Reliability, availability and maintenance. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
4. Piffeteau S., Souchet D. Influence of Thermal and Elastik Deformations on Connecting-Rod Big End Bearing Lubrication Under Dynamic Loading // Journal of Tribology July 2000 Vol. 122(1). pp. 181-191.
5. Abdel-Aal, Hisham A. — On the Influence of Thermal Properties on Wear Resistance of Rubbing Metals at Elevated Temperatures. Journal of Tribology July 2000 Vol. 122(1). pp. 657—660(ТВ).
6. Savin L.A., Solomin O.V., Ustinov D.E., Pugachev A.O. Automated calculation of rotary machines: monograph - M.: Mashinostroenie-1, 2006, pp 368.
7. Shengbo Li, Alexander Babin, Denis Shutin, Yu N Kazakov, Leonid Savin Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning Tribology International 175(4):107805.

### Информация об авторах

Ю.Н. Казаков – аспирант;  
Нгуен Тхай Ха – аспирант;  
Лю Ифань – аспирант;  
Н.А. Марахин – аспирант;  
Л.А. Савин – док. тех. наук, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники.

### Information about the authors

Yu. N. Kazakov - graduate student;  
Nguyen Thai Ha – graduate student;  
Liu Yifan – graduate student;  
N.A. Marakhin - graduate student;  
L.A. Savin – doc. those. Sciences, Professor of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics.

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

### Мониторинг узлов промышленного оборудования

Андрей Владимирович Горин<sup>1</sup>, Алексей Юрьевич Родичев<sup>1</sup>,  
Артем Дмитриевич Серебренников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>gorin57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3563-9109>

Автор, ответственный за переписку: Горин Андрей Владимирович, gorin57@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлен краткий анализ развития предприятий и фирм машиностроительной отрасли с точки зрения развития система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования. Рассматриваются последние достижения в области удаленной диагностики, ключевые компоненты дистанционной диагностики мехатронных устройств, включая механизмы сбора, передачи, анализа данных. Выявляются преимущества и проблемы внедрения систем удаленной диагностики, учитываются такие факторы, как кибербезопасность, конфиденциальность данных. Приведены примеры использования рассматриваемой технологии в индустрии.

**Ключевые слова:** мониторинг, диагностика, параметр, система мониторинга, технология, кибербезопасность, анализ.

**Для цитирования:** Горин А.В., Родичев А.Ю., Серебренников А.Д. Мониторинг узлов промышленного оборудования // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 98 – 101.

Intelligent technologies in power engineering

Original article

### Monitoring of industrial equipment units

Andrei Vladimirovich Gorin<sup>1</sup>, Aleksei Yurievich Rodichev<sup>1</sup>,  
Artem Dmitrievich Serebrennikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>gorin57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3563-9109>

Corresponding author: Gorin Andrei Vladimirovich, gorin57@mail.ru

**Abstract.** The paper presents a brief analysis of the development of enterprises and firms in the mechanical engineering industry from the point of view of the development of a system for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment. The latest advances in the field of remote diagnostics, key components of remote diagnostics of mechatronic devices, including mechanisms for collecting, transmitting, and analyzing data are considered. The advantages and problems of implementing remote diagnostic systems are identified, factors such as cybersecurity and data confidentiality are taken into account. Examples of the use of the technology in question in industry are given.

**Keywords:** monitoring, diagnostics, parameter, monitoring system, technology, cybersecurity, analysis.

**For citation:** Gorin A.V., Rodichev A.Yu., Serebrennikov A.D. Monitoring of industrial equipment units // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 98 – 101.

**Введение.** Машиностроительная промышленность быстро развивается благодаря внедрению передовых технологий, особенно в области системы мониторинга состояния

узлов и агрегатов промышленного оборудования. Одно из важнейших следствий совершенствования промышленной электроники - увеличение объема данных, необходимого для диагностики неисправностей мехатронных устройств. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования предназначена для оптимизации процессов обслуживания, продления срока службы и снижения вероятности простоев.

Со времен создания мехатронных устройств диагностика являлась важным составляющим процесса эксплуатации [1, 2, 3]. Перечисленные выше технологии - революционный подход в машиностроительной индустрии, позволивший предприятиям, оптимизировать производительность мехатронных средств, улучшить пользовательский опыт эксплуатации с минимальными затратами и воздействием на окружающую среду [4, 5]. Данные технологии актуальны как для коммерческих и государственных предприятий. Большие данные (Big Data) - это концептуальное и технологическое явление, описывающее объемы данных, которые настолько огромны, что их обработка и анализ с использованием традиционных методов и инструментов становятся недостаточно эффективными [6].

**Основная часть.** Данных, получаемых из системы диагностики узлов и агрегатов промышленного оборудования, может быть недостаточно, т.к., основываясь лишь на них, невозможно точно определить истинную причину, предпосылки появления неисправности без привязки к внешним условиям, например, состоянию окружающей среды, условиям эксплуатации и т.д. Объем данных, получаемых через системы телематики, огромен и зависит от количества отслеживаемых параметров и периодичности обновления. Такие системы позволяют отслеживать местоположение и скорость исполнительного органа мехатронного механизма, следить за расходом энергии, техническим состоянием. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации работы мехатронных механизмов, улучшения безопасности, а также для проведения профилактического обслуживания и предотвращения аварийных ситуаций. Телематические системы играют ключевую роль в улучшении эффективности и безопасности мехатронных устройств и способствуют более эффективному встраиванию мехатронных механизмов в производственный процесс.

Другой важной особенностью является безопасность передачи данных, поскольку в диагностических данных мехатронного механизма могут содержаться конфиденциальные и личные сведения. Защита от несанкционированного доступа путем внедрения механизмов аутентификации становятся неотъемлемой частью систем удаленной диагностики. Такие проблемы могут возникнуть в случае сбоя или недоступности сети, что может снизить надежность и доступность удаленной диагностики. В современных мехатронных устройствах, оснащенных продвинутыми электронными управляющими системами, данные о состоянии узлов и агрегатов, системах безопасности, механических передач и других аспектах мехатронного механизма становятся основой для обнаружения проблем, планирования технического обслуживания и повышения эффективности. С применением методов машинного обучения и алгоритмов анализа данных, таких как регрессия, классификация и кластеризация, можно выявлять аномалии и предсказывать потенциальные сбои, что способствует снижению затрат на ремонт и обслуживание, а также повышению безопасности эксплуатации.

Искусственный интеллект дополняет этот процесс, обеспечивая способность системы к обучению на основе диагностических данных, что позволяет предсказывать будущие проблемы и рекомендовать решения для их решения/предотвращения - т.е. осуществлять предиктивную диагностику. Предиктивная диагностика может значительно сэкономить средства на техническом обслуживании и ремонте путем своевременной локализации неисправностей.

Современные технологии позволяют работать с большими данными, генерируемыми диагностическими устройствами, подключенными к его узлам и агрегатам производственного оборудования. Вычислительные мощности облачных серверов дают возможность осуществлять ресурсоемкие вычисления, хранение больших объемов данных

распределенно, обеспечивая высокую скорость работы и постоянный доступ пользователей к системе. Это открывает возможности для создания доступных для конечного пользователя решений для удаленной диагностики транспортных средств.

Система удаленной диагностики в данной концепции является лишь элементом комплексной системы. Возможности удаленной диагностики с учетом применения современных технологий представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 - Возможности системы удаленной диагностики

Развитие современных технологий сделало большие данные основным экономическим и операционным ресурсом государства и бизнеса в большинстве отраслей экономики. Машиностроительная отрасль не стала исключением. Для диагностики современных мехатронных механизмов, генерирующих большие объемы данных, необходимы системы диагностики, имплементирующие продвинутое технологии сбора, хранения и анализа данных. Обладая описанными в статье преимуществами и недостатками, системы удаленной диагностики играют важную роль в эксплуатации мехатронных устройств, отвечая основным потребностям рынка.

Развитие систем удаленной диагностики будет происходить закономерно с развитием машиностроительной отрасли. Вероятно, такие системы будут интегрированы в полностью автономные мехатронные устройства, которые появятся на производствах в ближайшем будущем.

**Выводы.** На основе проведенного аналитического обзора были рассмотрены и предложены следующие решения в сфере дистанционной диагностики узлов и агрегатов промышленного оборудования:

- диагностический модуль с микроконтроллером на базе Tensilica Xtensa LX6 с беспроводными интерфейсами является перспективным решением для дистанционной диагностики узлов и агрегатов промышленного оборудования;

- Yandex Cloud позволяет развернуть облачный сервис, включающий сервер с работающей моделью, обученной на диагностических данных, для осуществления предиктивной диагностики; сервер, обеспечивающий работу пользовательского интерфейса, прием и передачу данных; базу данных получаемой диагностики. Подобное решение позволит минимизировать нагрузку на клиентские устройства благодаря централизации вычислений, что сделает сервис доступным для широкого круга пользователей.

### Список источников

8. X.X. Jiang, Q.Y. Song, H.E. Wang, G.F. Du, J.F. Guo, C.Q. Shen, Z.K. Zhu, Central frequency mode decomposition and its applications to the fault diagnosis of rotating machines, *Mech. Mach. Theory* 174 (2022), 104919.
9. S. Ren, Y. Zhang, Y. Liu, T. Sakao, D. Huisingh, C.M.V.B. Almeida, A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: A framework, challenges and future research directions, *J. Clean. Prod.* 210 (2019) 1343–1365.
10. J. Wang, L. Ye, R.X. Gao, C. Li, L. Zhang, Digital twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing, *Int. J. Prod. Res.* 57 (12) (2019) 3920–3934.
11. H.G. Chen, M.Y. Xu, C.Z. Fu, R.J. Song, Z. Li, Mechanical fault diagnosis of gis based on mfccs of sound signals, in: 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), IEEE, China, 2020, pp. 1487–1491.
12. C. Vununu, K.R. Kwon, E.J. Lee, K.S. Moon, S.H. Lee, Automatic fault diagnosis of drills using artificial neural networks, in: 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), IEEE, Mexico, 2017, pp. 992–995.
13. T. Tran, J. Lundgren, Drill fault diagnosis based on the scalogram and mel spectrogram of sound signals using artificial intelligence, *IEEE Access* 8 (2020) 203655–203666.

### References

8. Global Wind Report 2019 | Global Wind Energy Council. Date accessed: July 15, 2021. Archived June 29, 2021.
9. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. R. 1–8.
10. Tavner P. Offshore wind turbines: Reliability, availability and maintenance. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
11. Piffeteau S., Souchet D. Influence of Thermal and Elastik Deformations on Connecting-Rod Big End Bearing Lubrication Under Dynamic Loading // *Journal of Tribology* July 2000 Vol. 122(1). pp. 181-191.
12. Abdel-Aal, Hisham A. — On the Influence of Thermal Properties on Wear Resistance of Rubbing Metals at Elevated Temperatures. *Journal of Tribology* July 2000 Vol. 122(1). pp. 657—660(TB).
13. Savin L.A., Solomin O.V., Ustinov D.E., Pugachev A.O. Automated calculation of rotary machines: monograph - M.: Mashinostroenie-1, 2006, pp 368.

### Информация об авторах

А.В. Горин – канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроника, механика и робототехника;  
А.Ю. Родичев - канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроника, механика и робототехника;  
А.Д. Серебrenников - студент.

### Information about the authors

A.V. Gorin - candidate of sciences in technology, docent of department mechatronics, mechanics and robotics;  
A.Yu. Rodichev - candidate of sciences in technology, docent of department mechatronics, mechanics and robotics;  
A.D. Serebrennikov – student.

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении

Научная статья  
УДК 621.822

**Влияние режимов активной смазки на вязкое трение и расход смазочного материала в триботронных гибридных опорах роторов**

Денис Владимирович Шутин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>rover.ru@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0515-7106>

Автор, ответственный за переписку: Денис Владимирович Шутин, rover.ru@gmail.com

**Аннотация.** Статья содержит результаты исследования взаимосвязи режимов управления в активно смазываемых триботронных опорах с основными энергетическими показателями их функционирования, а именно вязким трением в смазочном слое и расходом смазочного материала через подшипник. Система активной смазки воздействует на режимы течения смазки в подшипнике и позволяет варьировать их в некоторых пределах. Работа триботронной опоры в пассивном, полуактивном и активном режимах различается также и по влиянию на энергетические параметры опоры. Проведенное численное исследование позволяет определить конструктивные решения и режимы работы триботронной опоры, способствующие минимизации затрат энергии на обеспечение ее работы.

**Ключевые слова:** триботронные опоры роторов, активные подшипники жидкостного трения, управление, вязкое трение, расход смазочного материала, минимизация энергозатрат.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-00289, <https://rscf.ru/project/22-79-00289/>.

**Для цитирования:** Шутин Д.В. Влияние режимов активной смазки на вязкое трение и расход смазочного материала в триботронных гибридных опорах роторов // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 102 - 107.

Intelligent technologies in power engineering

Original article

**Influence of active lubrication modes on viscous friction and lubricant flow in tribotronic hybrid bearings**

Denis Vladimirovich Shutin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Oryol state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>rover.ru@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0515-7106>

Corresponding author: Denis Vladimirovich Shutin, rover.ru@gmail.com

**Abstract.** The article contains the results of a study of the relationship between the control modes in actively lubricated tribotronic bearings and the main energy indicators of their functioning, namely viscous friction in the lubricant film and lubricant flow through the bearing. The active lubrication system affects the lubricant flow regimes in the bearing and allows them to be varied within certain limits. The operation of a tribotronic bearing in passive, semi-active and active modes also differs in its effect on the energy parameters of the support. The conducted numerical study makes it possible to determine design solutions and operating modes of the tribotronic bearing that help minimize energy costs to ensure its operation.

**Keywords:** tribotronic bearings, active fluid film bearings, control systems, viscous friction, lubricant flow, minimizing energy consumption.

**For citation:** Shutin D. V. Influence of active lubrication modes on viscous friction and lubricant flow in tribotronic hybrid bearings // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 97 - 102.

**Введение.** Современные роторные машины требуют более продвинутых решений для соответствия актуальным требованиям энергоэффективности и производительности. Опоры роторов являются одними из наиболее нагруженных их элементов, и поэтому подвергаются модификациям в первую очередь. Одним из наиболее актуальных подходов является переход к триботронным опорам, которые сочетают в себе функции обычных механических опор и системы управления режимами работы [1-2], а также могут расширяться функционалом по сбору и анализу данных о режимах работы.

Активная смазка является одним из способов реализации управления режимами работы опор жидкостного трения [3] и роторной системы в целом. Одной из основных целей их внедрения является снижение виброактивности роторной системы. Однако помимо влияния на силовые параметры опоры, система активной смазки также оказывает существенное влияние на ее трибологическое поведение [4]. Это является предпосылкой к оптимизации энергозатрат, приходящихся на обеспечение работы триботронных опор.

Как было показано в предыдущих работах, в случае активной смазки радиальных подшипников жидкостного трения существует минимум вязкого трения, обеспеченный сочетанием распределенных параметров смазочного слоя, а именно полей давления и зазора [5]. При этом для некоторых данных условий работы роторной системы минимум однозначно связан с положением центра цапфы в опоре [6]. Это используется для задания уставки системы управления триботронной опоры, которая имеет одной из своих целей минимизацию момента сопротивления вращения вала. Вместе с тем, затраты энергии на прокачку смазочного материала через подшипник в общем случае оказываются на порядок больше затрат на преодоление вязкого трения в опоре [5]. Поэтому снижение расхода смазочного материала, которое наблюдается при применении активной смазки [5], также следует учитывать как существенный фактор обеспечения энергоэффективности системы.

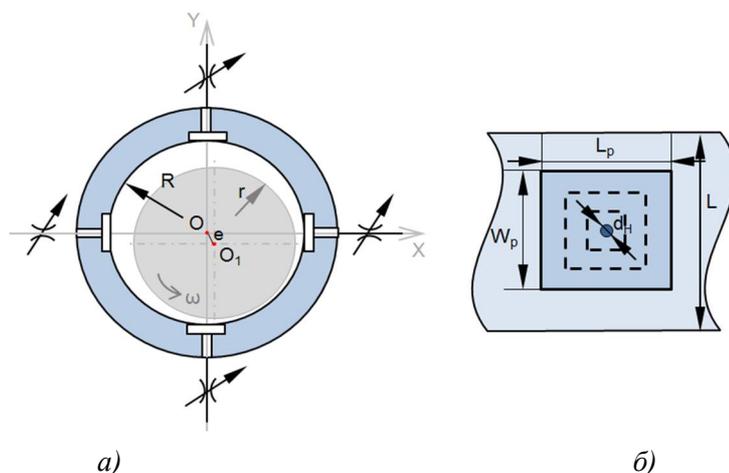
#### **Основная часть.**

Активно смазываемые триботронные опоры могут работать в нескольких различных режимах по методу управления. Например, можно выделить три подхода: пассивный, полуактивный и активный режимы [7]. Пассивный режим соответствует работе традиционной гибридной опоры без элементов регулирования. Активный режим подразумевает следящее управление, при котором минимизируются любые отклонения вала от заданного положения в опоре. Полуактивный режим отличается смещением области перемещений вала в целевую зону зазора подшипника, например область с минимальным трением, но отсутствием следящего управления положением цапфы.

Наконец, величина управляющей силы в триботронной опоре зависит от ее конфигурации, в том числе в значительной степени – от площади гидростатических карманов. Однако вопрос взаимосвязи этого фактора с энергетическими параметрами опор в условиях управления режимами работы ранее не был рассмотрен. Таким образом, данная работа определяет взаимосвязь между отмеченными выше конструктивными и алгоритмическими решениями триботронных опор, и характерными величинами расхода смазочного материала и вязкого трения в них. Полученные результаты позволят принимать во внимание потенциал снижения энергозатрат в опорах роторных машин нового поколения.

Схема активно смазываемой триботронной гибридной опоры приведена на рисунке 1. Опора оснащена четырьмя гидростатическими карманами квадратной формы, равномерно распределенными по центральной линии подшипника. Смазочный материал подводится в гидростатические карманы через жиклеры. Давление подачи в жиклеры регулируется раздельно независимыми сервоклапанами. В качестве объекта в данной работе рассмотрена роторно-опорная система со следующими параметрами: длина подшипника 40 мм, диаметр цапфы 40 мм ( $L/D = 1$ ), радиальный зазор 75 мкм, диаметр жиклера 2 мм; вес ротора, приходящийся на одну опору – 2.5 кг, вызывающее дисбаланс смещение центра масс – 100 мкм, скорость вращения вала 2000 об/мин; смазочный материал – вода при температуре 30 градусов Цельсия.

В исследовании рассмотрены квадратные гидростатические карманы различного размера, их относительная ширина  $W_p/L$  составляла 0.2, 0.4 и 0.6 длины подшипника. Также была рассмотрена конфигурация подшипника с так называемыми точечными питающими камерами, когда в отсутствие гидростатических карманов смазочный материал подается в зону трения непосредственно из жиклера. Упомянутые конфигурации проиллюстрированы на рисунке 1б.



**Рисунок 1 – Схема активно смазываемой триботронной гибридной опоры**  
 а) – общая схема сопряжения вал-подшипник;  
 б) – квадратный гидростатический карман различной площади.

Численная модель триботронной опоры базируется на решении обобщенного уравнения Рейнольдса (1) методом конечных разностей совместно с уравнениями баланса расхода смазочного материала через питающие камеры [6]. Момент вязкого трения в подшипнике рассчитывался согласно уравнению (2), а расход смазочного материала – согласно уравнению (3). Регулируемые давления в смазочных каналах использованы при этом в качестве граничных условий. Движение вала в подшипнике моделировалось уравнениями Лагранжа.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 12\mu V + 6\mu U \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (1)$$

$$Q_H = Q_x + Q_z + Q_y = \frac{\pi d_H^4}{128 l_H} \cdot \frac{(p_0 - p_H) \rho}{\mu}, \quad (2)$$

$$T = R \iint_S \left[ \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U \mu}{h} \right] dS, \quad (3)$$

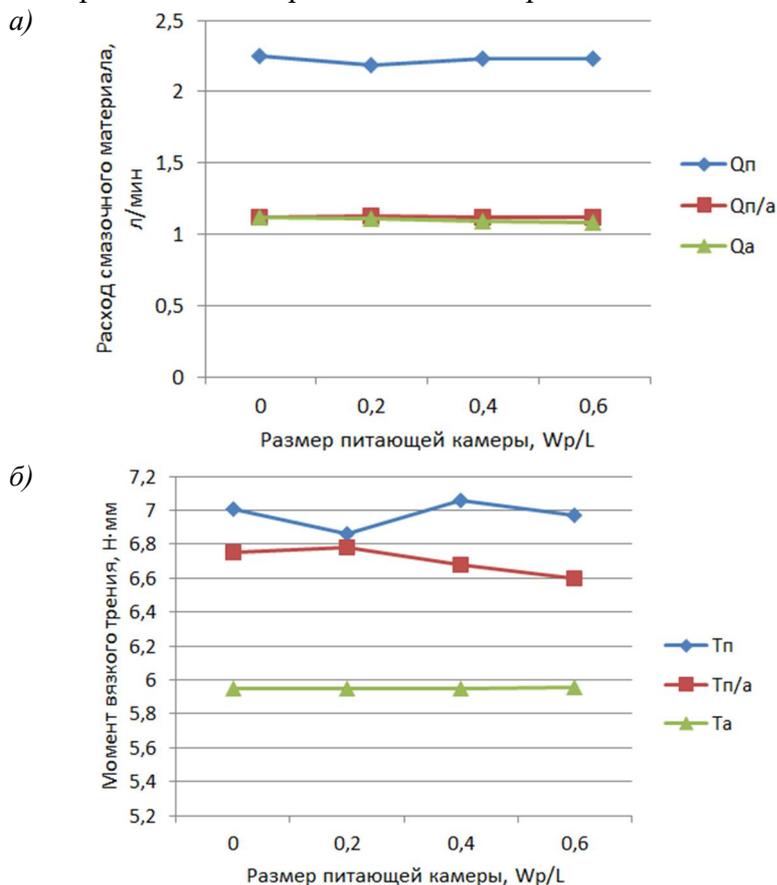
где  $p$  – давление смазочного материала в подшипнике,  $\mu$  и  $\rho$  – его вязкость и плотность,  $U$  – скорость вращения вала,  $V$  – скорость сдвигания смазочной пленки,  $h$  – зазор,  $R$  – радиус вала,  $Q$  – расход смазочного материала,  $T$  – момент вязкого трения.

В качестве базовой конфигурации системы активной смазки рассмотрена система с начальным давлением подачи смазочного материала с давлением  $p_0=0.2$  МПа и пропорциональным регулятором с коэффициентом усиления  $K=5$  [6]. Данные о положениях минимумов трения для активного и полупассивного режимов работы при скорости вращения 2000 об/мин взяты из [5].

В процессе численного эксперимента для определения момента трения и расхода смазочного материала в установившемся режиме работы роторно-опорной системы производились расчеты движения ротора на протяжении 100 мс, что соответствует чуть более чем трем оборотам вала. Ввиду наличия дисбаланса вала значения момента трения и расхода смазочного материала также подвержены колебаниям, поэтому для оценки результатов их значения усреднялись для установившегося режима работы. Полученные

данные для пассивного, полуактивного и активного режимов работы триботронной опоры приведены на рисунке 2.

Результаты показывают, что активный режим работы обеспечивает наибольшее снижение как момента вязкого трения в опоре, так и расхода смазочного материала через нее. При этом с повышением размера гидростатического кармана наблюдается лишь незначительное снижение расхода смазочного материала. Однако, несмотря на отмеченную эффективность активного режима, его недостатком являются крайне высокие требования к быстродействию гидравлических сервоклапанов для реализации следящего управления.



**Рисунок 2 – Данные об энергетических параметрах триботронной опоры при различных режимах управления и размерах гидростатических карманов**

*а) – расход смазочного материала через подшипник; б) – момент вязкого трения в подшипнике.*

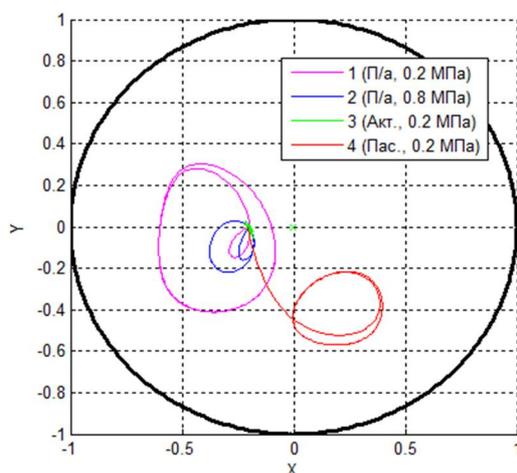
Полуактивный режим, как и активный, обеспечивает снижение расхода смазочного материала через подшипник более чем в 2 раза по сравнению с пассивными опорами. Также, аналогично активному режиму работы, влияние размера гидростатического кармана на этот параметр оказывается незначительным. Однако что касается момента трения в опоре, увеличение размера кармана положительно сказывается на его снижении. Вероятно, это связано с общим увеличением жесткости опоры, что приводит к минимизации отклонения вала от положения с минимумом трения даже в отсутствие следящего управления. Для прояснения этого момента был дополнительно проведен численный эксперимент, в котором для конфигурации с размером гидростатического кармана  $Wp/L = 0.2$  было повышено начальное давление подачи смазочного материала  $p_0$  с 0.2 до 0.8 МПа. Результаты приведены в таблице 1.

Полученные результаты говорят о том, что повышение начального давления приводит к дальнейшему повышению жесткости подшипника, что особенно отражается на параметрах пассивного и полуактивного режимов работы. Так, благодаря снижению амплитуд колебаний несбалансированного ротора в более жесткой опоре снизился и момент вязкого трения, причем как в полуактивном, так и в пассивном режиме. Соответствующие изменения в

Таблица 1 – Энергетические параметры активно смазываемой опоры с  $Wp/L = 0.2$  для различных давлений подачи смазочного материала

Начальное давление подачи смазочного материала, МПа	Пассивный режим		Полуактивный режим		Активный режим	
	Q, л/мин	T, Н·мм	Q, л/мин	T, Н·мм	Q, л/мин	T, Н·мм
0.2	2,19	6,86	1,13	6,78	1,11	5,95
0.8	3,63	6,29	3,72	6,05	3,65	5,95

амплитудах колебаний в полуактивном режиме проиллюстрированы на рисунке 3 посредством траекторий движения вала. В полуактивном режиме при этом момент сопротивления вращения цапфы приблизился к показателям активного режима. Однако вместе с тем во всех случаях расход смазочного материала через подшипник увеличился, и не снижался даже при реализации управления положением ротора. Поскольку затраты на прокачку смазочного материала через подшипник в общем случае оказываются более значительными, чем затраты на преодоление вязкого трения, такой подход можно считать необоснованным с точки зрения комплексного обеспечения энергоэффективных режимов работы роторно-опорной системы.



**Рисунок 3 – Траектории движения вала в триботронной опоре**

1 – полуактивный режим,  $p_0=0.2$  МПа; 2 – полуактивный режим,  $p_0=0.8$  МПа;  
3 – активный режим,  $p_0=0.2$  МПа; 4 – пассивный режим,  $p_0=0.2$  МПа.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов относительно влияния конструктивных и алгоритмических решений триботронных гибридных активных смазываемых опор на их энергетические показатели.

Во-первых, площадь гидростатических карманов мало влияет на энергетические параметры триботронных гибридных активно смазываемых подшипников во всех режимах работы. Ее следует выбирать с опорой на требуемый уровень управляющих сил.

Во-вторых, полуактивный режим управления триботронными опорами обеспечивает снижение расхода смазочного материала через подшипник в той же мере, что и активный режим, не требуя при этом быстродействующих сервоклапанов для реализации следящего управления. Снижение вязкого трения при этом оказывается не столь значительным, однако ввиду большего порядка затрат энергии на прокачку смазочного материала, такой подход оказывается более эффективным.

Наконец, для минимизации энергетических затрат на обеспечение функционирования триботронной опоры в активном режиме достаточно выбрать минимально необходимое начальное давление подачи смазочного материала, которое позволит эффективно удерживать вал вблизи области с минимальным трением. Снижению давления подачи может также способствовать увеличение площади гидростатических карманов, поскольку оно почти не сказывается на величине вязкого трения, но повышает уровень управляющих сил. При этом

окажется в наибольшей степени снижен и расход смазочного материала, на прокачку которого затрачивается значительная мощность.

#### Список источников

1. Rehman W.U., Jiang G., Luo Y., и др. Control of active lubrication for hydrostatic journal bearing by monitoring bearing clearance // *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Т. 10. № 4. doi:10.1177/1687814018768142.
2. Silva H.A.P., Nicoletti R. Rotor vibration control using tilting-pad journal bearing with active pads –Numerical and experimental results // *Journal of Sound and Vibration*. 2023. Т. 546. 117441. doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117441.
3. Salazar J.G., Santos I.F. Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part I – The hybrid lubrication / *Tribology International*. 2017. Т. 107. С. 94-105. doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.018.
4. Shutin D., Savin L., Polyakov R. Influence of a Control System in an Active Journal Hybrid Bearing on the Energy Parameters of Its Operation // *International journal of energy and environment*. 2017. Т. 11. С. 38-41.
5. Shutin D, Kazakov Y. Theoretical and Numerical Investigation of Reduction of Viscous Friction in Circular and Non-Circular Journal Bearings Using Active Lubrication // *Lubricants*. 2023. Т. 11. № 5. 218. doi.org/10.3390/lubricants11050218.
6. Li S., Zhou C., Savin L., Shutin D., Kornaev A., Polyakov R., Chen Z. Theoretical and experimental study of motion suppression and friction reduction of rotor systems with active hybrid fluid-film bearings // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Т. 182. 109548. doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109548.
7. Shutin D. Static reduction of viscous friction and stability of rotor motion in actively lubricated fluid film bearings. // *AIP Conference Proceedings*. 2023.

#### References

1. Rehman W.U., Jiang G., Luo Y., et al. Control of active lubrication for hydrostatic journal bearing by monitoring bearing clearance. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(4). doi:10.1177/1687814018768142.
2. Silva H.A.P., Nicoletti R. Rotor vibration control using tilting-pad journal bearing with active pads –Numerical and experimental results // *Journal of Sound and Vibration*. 2023. V. 546. 117441. doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117441.
3. Salazar J.G., Santos I.F. Active tilting-pad journal bearings supporting flexible rotors: Part I – The hybrid lubrication / *Tribology International*. 2017. V. 107. P. 94-105. doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.018.
4. Shutin D., Savin L., Polyakov R. Influence of a Control System in an Active Journal Hybrid Bearing on the Energy Parameters of Its Operation // *International journal of energy and environment*. 2017. Vol. 11. P. 38-41.
5. Shutin D, Kazakov Y. Theoretical and Numerical Investigation of Reduction of Viscous Friction in Circular and Non-Circular Journal Bearings Using Active Lubrication // *Lubricants*. 2023. Vol. 11. № 5. 218. doi.org/10.3390/lubricants11050218.
6. Li S., Zhou C., Savin L., Shutin D., Kornaev A., Polyakov R., Chen Z. Theoretical and experimental study of motion suppression and friction reduction of rotor systems with active hybrid fluid-film bearings // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 182. 109548. doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109548.
7. Shutin D. Static reduction of viscous friction and stability of rotor motion in actively lubricated fluid film bearings. // *AIP Conference Proceedings*. 2023.

#### Информация об авторах

Д.В. Шутин – канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники.

#### Information about the authors

D. V. Shutin – candidate of technical sciences, docent of mechatronics, mechanics and robotics department.

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

Научная статья  
УДК 621.822

### Параметрическая оценка динамического поведения роторной системы на многоклиновых подшипниках скольжения

Александр Сергеевич Фетисов<sup>1</sup>, Максим Геннадиевич Литовченко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup>fetisov57rus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3397-9863>

<sup>2</sup>yamaks123@bk.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Фетисов, fetisov57rus@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты решения задачи параметрического синтеза гидродинамического многоклинового подшипника. Задача выбора геометрической конфигурации подшипника представлена в виде задачи многокритериальной оптимизации. Целевыми функциями являлись момент вязкого трения подшипника как ключевая энергетическая характеристика и комплексная функция, отражающая динамическое поведение роторной системы. Функция, отражающая динамическое поведение роторной системы, основана на методе линейной свертки параметров. В ее основе использованы время переходного процесса в ответ на импульсное воздействие на ротор в комплексе с величиной декремента затухания колебаний. Приведены результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующие траектории движения ротора в подшипниках с различными конфигурациями.

**Ключевые слова:** многоклиновый подшипник скольжения, оптимизация, параметрический синтез, декремент затухания, импульсное воздействие.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00789, <https://rscf.ru/project/22-19-00789/>.

**Для цитирования:** Фетисов А.С., Литовченко М.Г. Параметрическая оценка динамического поведения роторной системы на многоклиновых подшипниках скольжения // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 108 – 111.

Intelligent technologies in power engineering

Original article

### Parametric estimation of the dynamic behavior of a rotor system on multi-wedge fluid-film bearings

Alexander Sergeevich Fetisov<sup>1</sup>, Maksim Gennadievich Litovchenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Orel state university of I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup>fetisov57rus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3397-9863>

<sup>2</sup>yamaks123@bk.ru

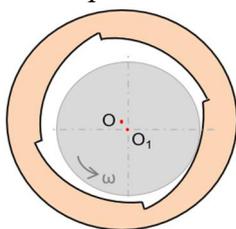
Corresponding author: Alexander Sergeevich Fetisov, fetisov57rus@mail.ru

**Abstract.** The article presents the results of solving the problem of parametric synthesis of a hydrodynamic multi-wedge bearing. The problem of choosing the geometric configuration of a bearing is presented as a multicriteria optimization problem. The target functions were the torque of viscous friction of the bearing as a key energy characteristic and a complex function reflecting the dynamic behavior of the rotor system. The function reflecting the dynamic behavior of the rotor system is based on the method of linear convolution of target parameters. It is based on the time of the transition process in response to the pulse action on the rotor in combination with the value of the oscillation damping decrement. The results of a computational experiment are presented, demonstrating the trajectories of rotor motion in bearings with various configurations.

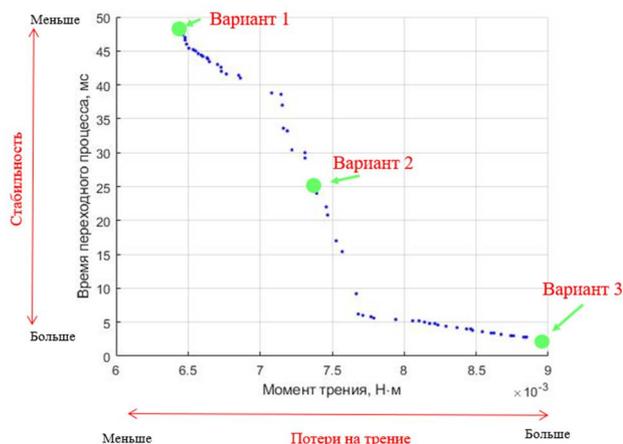
**Keywords:** multi-wedge plain bearing, optimization, parametric synthesis, damping decrement, impulse action.

Введение. Задача выбора геометрических параметров подшипника скольжения может быть представлена в виде многокритериальной оптимизационной задачи. Варьирование величины среднего зазора, длины подшипника и прочих параметров может повлиять не только на интегральные характеристики подшипника (грузоподъемность, момент трения), но и на динамическое поведение роторной системы. Целью данной работы является разработка новой целевой функции, описывающей динамическое поведение роторной системы на гидродинамических многоклиновых подшипниках скольжения, с целью совершенствования решения задачи параметрического синтеза роторных систем на подшипниках данного типа.

Основная часть. В качестве объекта проектирования выступает пассивный многоклиновый гидродинамический подшипник скольжения (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Схема многоклинового подшипника скольжения**



**Рисунок 2 – Фронт Парето для целевых функций «Момент вязкого трения» - «Время переходного процесса»**

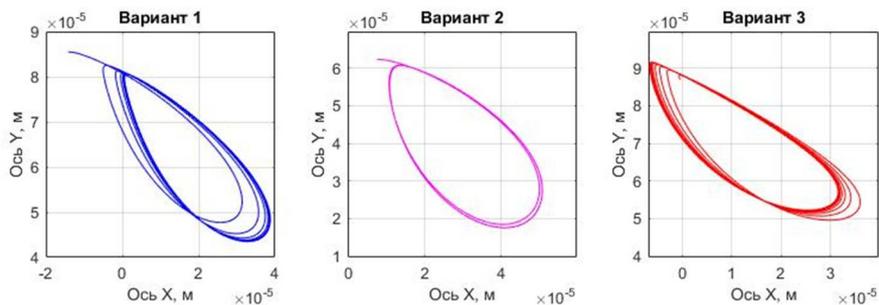
Решение оптимизационной задачи включает в себя выбор проектных переменных, диапазон их изменения, выбор целевых функций, а также формирование ограничений. Описание задачи аналогично подобному в работах [1,2]. В качестве проектных переменных выбраны: длина подшипника, средний зазор подшипника и отношение высоты клина к среднему зазору. В качестве целевых функций выбраны момент вязкого трения и время переходного процесса в ответ на импульсное воздействие на ротор. Итогом решения оптимизационной задачи является фронт Парето, отражающий множество лучших решений (рисунок 2).

Из множества Парето были выбраны 3 варианта, отражающие характерные качества роторной системы. Геометрические параметры данных вариантов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры пробных конфигураций

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Потери на трение	Низкий	Средний	Высокий
Стабильность	Низкий	Средний	Высокий
Момент трения, Н·м	0.0064	0.0073	0.0089
Время переходного процесса $T_{tr}$ , мс	48	24	2.6
Длина подшипника $L$ , мм	20	21	22
Радиальный зазор $h_0$ , мкм	75	74	67
Wedge Rate	0.71	0.12	1.94

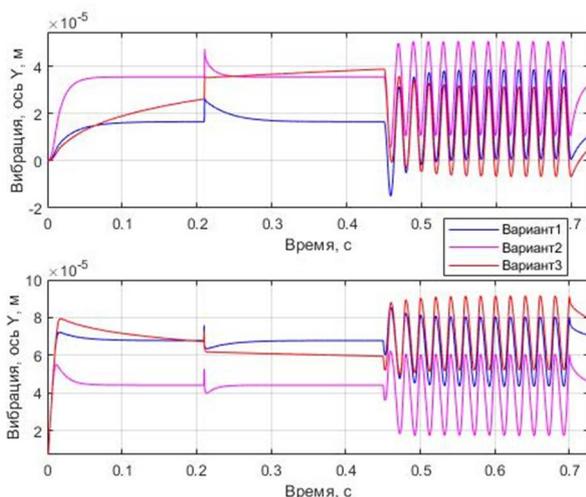
На основе данных конфигураций был проведен вычислительный эксперимент, заключающийся в оценке времени переходного процесса и определении амплитуд движения ротора в установившемся режиме работы. Эксперимент аналогичен расчетам, описанным в работах [1,2]. Результаты моделирования траекторий движения приведены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Траектории движения для пробных конфигураций**

Результаты показывают, что, несмотря на различные значения целевых функций, размер траекторий отличается не значительно.

На рисунке 4 приведены развертки колебаний ротора на различных геометрических вариантах подшипника. Как видно из рисунка, время переходного процесса не отражает в полной степени динамическое поведение многоклинового подшипника. Таким образом, требуется дополнение целевой функции, которая бы отразила динамику роторной системы.



**Рисунок 4 – Переходный процесс в ответ на импульсное воздействие на ротор для пробных конфигураций**

В качестве дополнительного параметра был выбран декремент затухания колебаний ротора в ответ на импульсное воздействие:

$$D = \frac{A(t)}{A(t+T)}$$

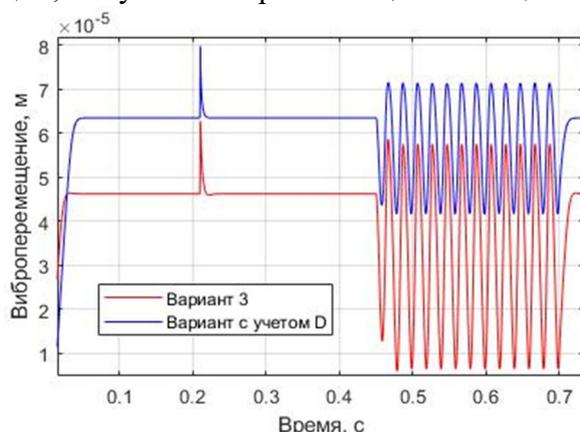
где  $A(t)$  – амплитуда колебаний в заданный момент времени,  $A(t+T)$  – амплитуда колебаний ротора через период.

Так как необходимо помимо декремента затухания учесть и время переходного процесса, новая целевая функция, основанная на методе линейной свертки параметров, принимает вид:

$$N = \omega_1 \cdot \frac{T_{mn}}{\bar{T}_{mn}} + \omega_2 \cdot \frac{D}{\bar{D}}$$

где  $\omega_i$  – весовой коэффициент,  $\Delta\omega_i = 1$ ,  $\bar{T}_{mn}$  – характерное время переходного процесса,  $\bar{D}$  – характерное значение декремента затухания.

Для данной целевой функции была снова решена задача параметрического синтеза. Результатом решения является конфигурация, для которой величина времени переходного процесса равна  $T=3.2$  мс, величина декремента затухания  $D=0$ , момент трения  $M_{mp}=0.007$  Н·м. На рисунке 5 представлено сравнение траекторий движения ротора для варианта 3 (рисунк 3) и конфигурации, полученной при помощи новой целевой функции.



**Рисунок 4 – Переходный процесс в ответ на импульсное воздействие на ротор для пробных конфигураций**

Переходный процесс полученной конфигурации практически не имеет колебательности, а амплитуды виброперемещений при наличии дисбаланса меньше в 1,72 раза по отношению к конфигурации №3.

Выводы. Предложенная комплексная целевая функция позволяет добиться лучших результатов при решении задачи параметрического синтеза роторных систем на многоклиновых подшипниках жидкостного трения.

#### Список источников

4. Shutin, D., Fetisov, A., Savin, L.: Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. Mechanisms and Machine Science 140, (2023). doi: 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.
5. Фетисов А.С., Литовченко М.Г., Шутин Д.В. Генетические алгоритмы для оптимального проектирования триботронных опор роторов / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. №4 (360). С. 230-240.

#### References

1. Shutin, D., Fetisov, A., Savin, L.: Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. Mechanisms and Machine Science 140, (2023). doi: 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.
2. Fetisov A.S., Litovchenko M.G., Shutin D.V. Genetic algorithms for automatic design of tribotronic rotor supports Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023. No. 4 (360). pp. 230-240.

#### Информация об авторах

А.С. Фетисов – канд. техн. наук, ассисент кафедры мехатроники, механики и робототехники;  
М.Г. Литовченко – магистрант.

#### Information about the authors

A.S. Fetisov – candidate of sciences in technology, assistant at the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics department.  
M.G. Litovchenko – undergraduate;

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении

Научная статья  
УДК 621.313.322

**Адаптивно-предиктивная модель анализа надежности турбогенератора**

**Кристина Владимировна Смирнова<sup>1</sup>, Максим Эдуардович Бондаренко<sup>2</sup>,  
Роман Николаевич Поляков<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

<sup>1</sup> [kristinka\\_boom@mail.ru](mailto:kristinka_boom@mail.ru)

<sup>2</sup> [maxbondarenko22@yandex.ru](mailto:maxbondarenko22@yandex.ru)

<sup>3</sup> [romanpolak@mail.ru](mailto:romanpolak@mail.ru)

Автор, ответственный за переписку: Максим Эдуардович Бондаренко, [maxbondarenko22@yandex.ru](mailto:maxbondarenko22@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается адаптивно-предиктивная модель для анализа надежности турбогенератора, которая используется для обеспечения надежной и безотказной работы оборудования. Эта модель позволяет оценивать остаточный ресурс отдельных узлов, что затруднено при прямом анализе в процессе работы. Интеграция соответствующих модулей в систему мониторинга и диагностики позволяет контролировать техническое состояние оборудования и прогнозировать вероятность его безотказной работы.

**Ключевые слова:** адаптивно-предиктивная модель, турбогенератор, интеллектуальные технологии.

**Для цитирования:** Смирнова К.В., Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н. Адаптивно-предиктивная модель анализа надежности турбогенератора // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 112 - 115.

Intelligent technologies in power engineering

Original article

**Adaptive-predicative model of turbo generator reliability analysis**

**Kristina Vladimirovna Smirnova<sup>1</sup>, Maxim Eduardovich Bondarenko<sup>2</sup>,  
Roman Nikolaevich Polyakov<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Oryol state university n.a. I.S. Turgenev, Oryol, Russia

<sup>1</sup> [kristinka\\_boom@mail.ru](mailto:kristinka_boom@mail.ru)

<sup>2</sup> [maxbondarenko22@yandex.ru](mailto:maxbondarenko22@yandex.ru)

<sup>3</sup> [romanpolak@mail.ru](mailto:romanpolak@mail.ru)

Corresponding author: Maxim Eduardovich Bondarenko, [maxbondarenko22@yandex.ru](mailto:maxbondarenko22@yandex.ru)

**Abstract.** The article discusses an adaptive-predictive model for analyzing the reliability of a turbogenerator, which is used to ensure reliable and trouble-free operation of the equipment. This model allows you to estimate the residual life of individual nodes, which is difficult with direct analysis during operation. Integration of relevant modules into a monitoring and diagnostic system allows you to monitor the technical condition of equipment and predict the likelihood of its failure-free operation.

**Keywords:** adaptive-predictive model, turbogenerator, intelligent technologies.

**For citation:** Smirnova K.V., Bondarenko M.E., Polyakov R.N. Adaptive-predicative model of turbo generator reliability analysis // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 112 - 115.

Введение. Турбогенераторные электростанции являются основой функционирования и жизнеобеспечения городов, предприятий и других структур. Повышение безопасности и эффективности работы электростанций с использованием программно-аппаратных комплексов и интеллектуальных систем мониторинга и диагностики ключевых компонентов турбогенератора (турбины и генератора) на основе создания проверенной цифровой модели этих компонентов с помощью методов управления динамическими процессами и

инструментов анализа в режиме реального времени позволит улучшить эффективность работы электростанций.

Возникновение аварий на объектах энергетической отрасли следует свести к минимуму. Повышение надежности и безопасности с помощью технологических и конструкторских решений достигло своего предела. Однако, по статистике более 70% случаев ремонта вызваны ошибками монтажа, которые приводят к постепенному или внезапному отказу оборудования. При установке оборудования обнаруживаются непредвиденные и скрытые рабочими дефекты, которые впоследствии приводят к аварии и необходимости внепланового ремонта.

Переход от планового обслуживания к ремонту на основе фактического технического состояния требует хранения, обработки и передачи большого объема информации, что стало возможным только сейчас, благодаря развитию компьютерных систем и технологий анализа и обработки больших объемов данных с помощью машинного обучения и нейронных сетей.

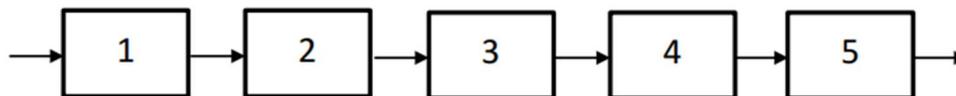
Анализ многолетнего опыта эксплуатации турбогенераторов показывает, что отказ может произойти в любой из подсистем. Причины таких отказов сложны и могут быть связаны с различными факторами и их взаимосвязями.

Для безотказной работы турбогенератора требуется безотказное функционирование всех его подсистем. Узлы, содержащие несколько однотипных деталей, такие как щеткодержатели в щеточно-коллекторном узле, нельзя рассматривать с точки зрения надежности как параллельное соединение элементов. Хотя они и выполняют сходные функции, но при выходе из строя одной детали нагрузка на остальные перераспределяется, что может вызвать их последовательный отказ по принципу домино.

В целом, турбогенераторы не имеют резервных подсистем для повышения надежности и могут рассматриваться как последовательное соединение компонентов (рисунок 1). Таким образом, общая надежность такой системы равна:

$$P_s = \prod_{i=1}^N p_i, \quad (1)$$

где  $P_s$  – надёжность системы в целом;  $p_i$  – надёжность отдельных подсистем.



**Рисунок 1 – Совокупность подсистем турбогенератора**

*1 – статор, 2 – ротор, 3 – щеточный аппарат, 4 – опорные узлы, 5 – подсистемы снабжения*

При таком способе объединения подсистем сбой в одной из них приводит к сбою всей системы, что для турбогенераторов чревато описанными ранее негативными последствиями. Поэтому задача обеспечения надежной и бесперебойной работы каждой подсистемы стоит особенно остро. С другой стороны, полностью предотвратить отказы невозможно из-за естественного ограничения ресурса отдельных элементов турбогенераторов. Поэтому для обеспечения максимально стабильной работы генерирующего энергию оборудования решаются две основные задачи:

1) Обеспечение надежной работы и продление срока службы узлов и компонентов, для которых существует значительный риск отказа.

2) Обеспечение комплекса мер по контролю технического состояния соответствующих компонентов и узлов, а также использование систем прогнозирования их остаточного ресурса с учетом фактической рабочей нагрузки для обоснования планирования и своевременной реализации необходимых технических операций.

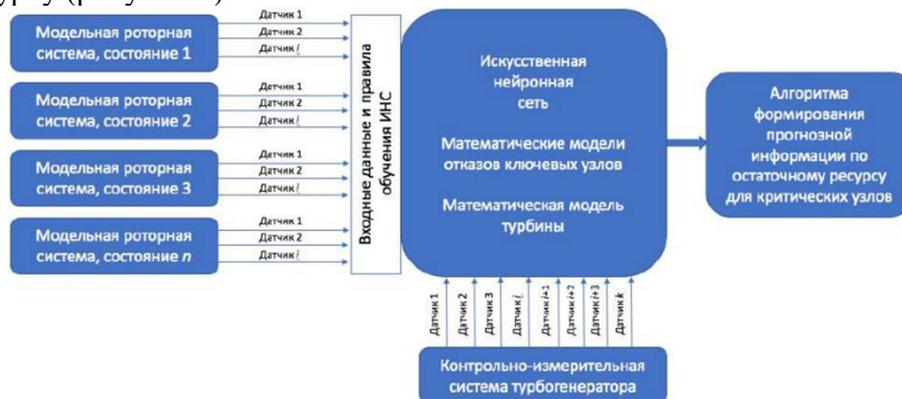
Подсистемы анализа состояния оборудования обычно предоставляют данные двух видов: качественные и количественные оценки параметров, определяющих состояние контролируемого оборудования. Это обычно выполняется путем прямого анализа показаний датчиков и сравнения текущих показаний с предельными значениями. Превышение

критического значения указывает на наличие неисправности, а превышение степени указывает на степень неисправности.

Результатом работы предикативной системы является количественная оценка остаточного ресурса контролируемого узла, которая зависит от его исходного состояния и условий работы за прошедший период. Сложность реализации предиктивного функционала системы диагностики для различных подсистем турбогенераторов варьируется. Например, степень износа щёточных колодок легко оценить непосредственно путём прямого измерения с помощью измерительных инструментов или датчиков системы контроля, что невозможно для оценки степени износа вкладышей подшипников, доступ к которым доступен только в результате демонтажа ротора. Или же, как таковая невозможность измерения контролируемых параметров (например, величину усталостных напряжений ротора). Все эти факторы создают потребность в использовании адаптивно-прогнозных моделей для оценки оставшегося ресурса определенных компонентов, для которых прямой анализ в процессе работы машины затруднен. Такие модули должны быть включены в систему контроля и диагностики вращающейся машины, а их данные должны использоваться для оценки надежности и вероятности бесперебойной работы оборудования. Таким образом, адаптивно-прогнозные модели должны включать в себя следующие математические модели:

- 1) износных процессов в узлах трения турбогенератора [1];
- 2) геометрических параметров износа [2];
- 3) условий и механизмов изнашивания [3];
- 4) факторов, влияющих на интенсивность изнашивания [4];
- 5) влияния распределения высот микронеровностей на изнашивание [5];
- 6) влияния температуры на химические процессы смазки и изнашивание [6];
- 7) учета усталостных процессов в механических элементах турбогенератора [2].

Перечисленные математические модели можно обобщить в блок-схему адаптивно-предиктивной модели анализа надёжности работы турбогенератора, объединяющую контрольно-измерительную систему, математическую модель турбины и типовых отказов ключевых узлов, неросетевой модуль и алгоритм формирования прогнозной информации по остаточному ресурсу (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Блок-схема взаимодействия контрольно-измерительной системы, математической модели турбины, математических моделей типовых отказов и нейросетевого модуля**

Данные с датчиков контрольно-измерительной системы поступают в блок математической модели турбины, в которой происходит расчёт требуемых параметров для выявления критических узлов, затем данные передаются в блок расчёта остаточного ресурса до отказа ключевых узлов турбогенератора. Полученные данные одновременно сравниваются с прогнозом нейросетевого модуля, который предобучен на модельных роторных системах. В конечном итоге данные передаются в блок алгоритма формирования прогнозной информации по остаточному ресурсу для критических узлов

Заключение. Более глубокий анализ состояний наиболее ответственных и опасных компонентов, а также других сигналов системы мониторинга и диагностики состояния

генерирующих энергию машин, позволяет проводить более точную оценку реального технического состояния агрегатов. С одной стороны, такой подход позволяет избежать лишних затрат на плановые ремонты, если состояние соответствующих компонентов допускает продолжение эксплуатации без потери качества и с высоким уровнем вероятности безотказной работы. С другой стороны, прогнозные возможности модели позволяют владельцам заранее получать оповещения о возможности и повышении вероятности отказов и предпринимать необходимые ответные действия. Более того, такие действия могут быть предприняты заблаговременно, что сводит к минимуму время простоя оборудования и увеличивает экономическую эффективность его эксплуатации.

#### Список источников

6. Чинчинадзе А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А.В. Чинчинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чинчинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
7. Shutin, D., Bondarenko, M., Polyakov, R., Stebakov, I., Savin, L. Prediction of Remaining Useful Life of Passive and Adjustable Fluid Film Bearings Using Physics-Based Models of Their Degradation // Mechanisms and Machine Science, 2024, 139, pp. 211–223.
8. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машгиз, 1961. 383 с.
9. Kasai M., Fillon M., Bouyer J., Jarny S. Influence of lubricants on plain bearing performance: Evaluation of bearing performance with polymer-containing oils. Tribology International, №46. 2012. P. 190-199.
10. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
11. Ростик Г.В. Оценка технического состояния турбогенераторов. Учебно-практическое пособие (изд. 2-е: исправленное и дополненное). Санкт Петербург, 2015. 410 с

#### References

1. Chinchinadze A.V. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka): Uchebnik dlya tekhnicheskikh vuzov. 2-ye izd. pererabot. i dop. / A.V. Chinchinadze, E.D. Braun, N.A. Bushe i dr.; Pod obshch. red. A.V. Chinchinadze. – М.: Mashinostroyeniye, 2001. 664 s.
2. Shutin, D., Bondarenko, M., Polyakov, R., Stebakov, I., Savin, L. Prediction of Remaining Useful Life of Passive and Adjustable Fluid Film Bearings Using Physics-Based Models of Their Degradation // Mechanisms and Machine Science, 2024, 139, pp. 211–223.
3. Kragel'skiy I.V. Treniye i iznos. М.: Mashgiz, 1961. 383 s.
4. Kasai M., Fillon M., Bouyer J., Jarny S. Influence of lubricants on plain bearing performance: Evaluation of bearing performance with polymer-containing oils. Tribology International, №46. 2012. P. 190-199.
5. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Treniye, smazka, iznos. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskkiye prilozheniya tribologii. М.: FIZMATLIT, 2007. 368 s.
6. Rostik G.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya turbogeneratorov. Uchebno-prakticheskoye posobiye (izd. 2-ye: ispravlennoye i dopolnennoye). Sankt Peterburg, 2015. 410 s

#### Информация об авторах

К.В. Смирнова – магистрант;

М.Э. Бондаренко – канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева;

Р.Н. Поляков – д-р. техн. наук, заведующий кафедрой мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева.

#### Information about the authors

K.V. Smirnova – Undergraduate student of OSU n.a. I.S. Turgenev;

M.E. Bondarenko – candidate of sciences in technology, Associate Professor of Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics of the OSU n.a. I.S. Turgenev;

R.N. Polyakov – doctor of sciences in technology, Head of Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics of the OSU n.a. I.S. Turgenev;

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

## Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении

Научная статья  
УДК 62-503.55

### Системы управления электроприводами на базе алгоритмов нечеткой логики и систем искусственного интеллекта

**Ярослава Константиновна Старостина**

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, Россия,  
yaroslava.starostina@bk.ru

**Аннотация.** Статья содержит анализ существующих решений и основные предпосылки для последующей оптимизации и модернизации системы управления транзисторным ключом, входящим в состав трансформаторно-транзисторного модуля. Результаты, отражённые в статье, необходимы для дальнейшего применения модернизированного трансформаторно-транзисторного модуля, для построения и моделирования различных схем асинхронных электроприводов.

**Ключевые слова:** система управления электроприводом, асинхронный двигатель, нечеткая логика, системы искусственного интеллекта, нейрорегулятор, нейросетевой контроллер.

**Для цитирования:** Старостина Я.К. Системы управления электроприводами на базе алгоритмов нечеткой логики и систем искусственного интеллекта // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. 116 – 119.

## Intelligent technologies in power engineering

Original article

### Electric drive control systems based on fuzzy logic algorithms and artificial intelligence systems

**Yaroslava Konstantinovna Starostina**

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk. Russia  
yaroslava.starostina@bk.ru

**Abstract.** The article contains an analysis of existing solutions and the main prerequisites for subsequent optimization and modernization of the transistor switch control system included in the transformer-transistor module. The results reflected in the article are necessary for the further use of the modernized transformer-transistor module for the construction and modeling of various circuits of asynchronous electric drives.

**Keywords:** electric drive control system, asynchronous motor, fuzzy logic, artificial intelligence systems, neuroregulator, neural network controller.

**For citation:** Starostina Y.K. Electric drive control systems based on fuzzy logic algorithms and artificial intelligence systems // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. 116 – 119.

Введение. К верхнему (технологическому) уровню управления относятся системы управления, которые на основе законов классической логики формируют алгоритм управления, реализуемый с помощью релейных элементов и программируемых логических контроллеров и формирующий команды электроприводу на выполнение задачи, предъявляемой технологическим процессом. Отдельные логические узлы могут входить в состав системы управления самим электроприводом, так называемой подчиненной системы управления, которая непосредственно влияет на характеристики электропривода.

Современное состояние развития техники характеризуется постоянным увеличением разнообразия и сложности объектов управления в системах автоматического управления. Системы с использованием нечеткой логики, появившиеся сравнительно недавно, расширяют функциональные возможности управления и эффективнее традиционных систем решают задачи управления рядом сложных, трудно описываемых, нелинейных объектов управления, включая электроприводы различного назначения и прежде всего приводы позиционирования.

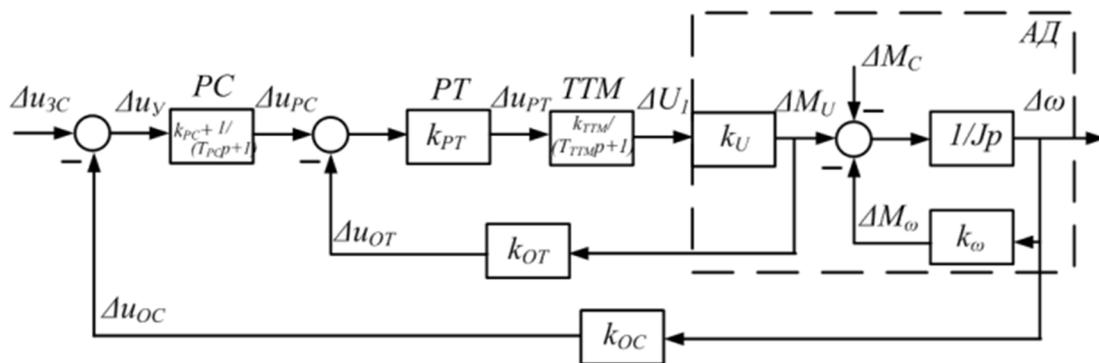
Широкое применение в существующих системах автоматического регулирования находят системы с широтно-импульсной модуляцией, в виду их известных значительных преимуществ, но учитывая их нелинейность и значительные трудности в настройке и решении задач параметрической оптимизации, приходится использовать упрощения и приближительные расчеты, что в свою очередь сводит к снижению всех преимуществ применения систем управления на базе широтно-импульсного регулирования. Современное состояние развития техники характеризуется постоянным увеличением разнообразия и сложности объектов управления в автоматике. Одной из наиболее актуальных задач в области электроприводов является модификация существующих систем управления за счет использования новых, нетрадиционных методов и алгоритмы управления. Примером таких нетрадиционных методов является использование искусственных нейронных сетей и нечеткой логики. Эти органы управления имеют большой потенциал для улучшения качественных характеристик системы управления электроприводом. В области автоматических систем управления искусственные нейронные сети применяются в решении задач определения и идентификации объектов управления, а также для прогнозирования и диагностики отдельных параметров таких оптимизированных систем регулирования.

В настоящее время представлены разработки, применяющие вышеуказанные технологии в электроприводах постоянного тока, например в статье [1] представлена эффективная модель системы управления бесщеточным электроприводом постоянного тока на базе контроллера нечеткой логики, кроме того, легко наблюдаются и анализируются скорость и крутящий момент двигателя постоянного тока, а также токи и напряжения компонентов инвертора.

Что касается электроприводов переменного тока, то одним из наиболее перспективных способов управления асинхронным двигателем является система прямого управления моментом, которую можно реализовать на новых нетрадиционных методах и алгоритмах управления для устранения недостатков, такие как пульсации электромагнитного момента, и дальнейшего повышения качественных характеристик системы управления электропривода переменного тока в целом.

Среди существующих решений можно выделить работу китайских исследователей [2], в которой потокосцепление статора, изменяющегося в процессе работы электродвигателя из-за непостоянного текущего значения сопротивления, оценивается наблюдателем, выполненного по принципу интеллектуальной нейросети. Другим примером применения интеллектуальной нейросети в системе прямого управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя является разработка [3], в которой интеллектуальная нейросети используется в качестве идентификатора угла между потокосцеплениями статора и ротора, а также сектора, в котором на данный момент находится вектор потокосцепления статора, что необходимо для выбора оптимальной совокупности одновременно работающих ключей инвертора и для достижения качественных характеристик работы электропривода переменного тока. Более сложная и модифицированная система прямого управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя представлена в статье [4].

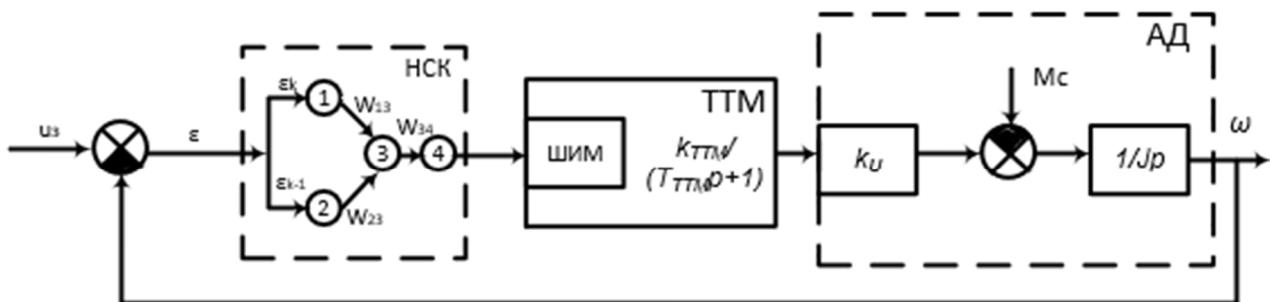
Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности применения нейросетей для моделирования регулирующих устройств. На рисунке 1 представлена структурная схема системы управления, построенная на одноключевом трансформаторно-транзисторном модуле.



**Рисунок 1 – Структурная схема системы управления, построенная на одноключевом трансформаторно-транзисторном модуле [5]**

Для управления статорным напряжением асинхронного двигателя [5], при уменьшении напряжения трансформаторно-транзисторным модулем, при  $I > I_{отс}$  включается в работу отрицательная обратная связь по току статора, удерживая его на уровне  $I_{отс}$ .

Для простых систем автоматического регулирования и алгоритмов управления качество работы интеллектуальной нейронной сети практически не отличается от аналитических алгоритмов. На рисунке 2 представлена структурная схема с нейросетевым контроллером, который содержит простейшую прямонаправленную интеллектуальную нейросеть, принцип работы которой приближается к динамическим свойствам ПИ-регулятора.



**Рисунок 2 – Структурная схема системы управления асинхронным двигателем с нейросетевым контроллером**

**Заключение.** Для реализации эффективного управления при моделировании необходимо знать модель электроприводов, также необходимо учитывать влияние исполнительного механизма, его характер работы и широтно-импульсного модулятора на качество работы автоматической системы регулирования. Однако по мере усложнения автоматизированных систем управления возникает необходимость использования многопараметрических алгоритмов управления. Известны проблемы с настройкой аналитических автоматических систем регулирования с большим количеством параметров, но их можно преодолеть с помощью одного из алгоритмов обучения многопараметрической нейронной сети. Кроме того, учитывая, что время вычислений очень мало без ущерба для точности получаемых результатов, можно сказать, что предложенный метод является перспективным. Подводя итог, можно сделать вывод о том, что вышеуказанные преимущества применения систем искусственного интеллекта и алгоритмов нечёткой логики, дают возможность применения таких систем в различных электроприводах с различным технологическими параметрами и позволяют достичь повышения качественных характеристик электроприводов и их систем управления с учётом предъявляемых требований.

### Список источников

1. Mehmet Çunkaş, Omer Aydoğdu Realization of fuzzy logic controlled brushless dc motor drives using MATLAB/Simulink, Mathematical and Computational Applications, Association for Scientific Research Vol. 15, No. 2, pp. 218-229, 2010.
2. Wang Ping, Li Bin, Huang Ruixiang, Li Guidan, Diangong jishu xuebao Trans. China Electrotech. Soc. 2003. 18, № 2, P.5-8
3. Kusuma Gottapu, YV Prashanth, P Mahesh, Y Sumith, Simulation of DTC IM Based on PI& Artificial Neural Network Technique, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 7, July 2013
4. Шигапов Айрат Альмирович, Смоляков Борис Петрович Прямое управление моментом асинхронного двигателя с нейро-фаззи регулятором скорости и нейросетевой идентификацией параметров электропривода // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. №95-101.
5. Старостина, Я. К. Разработка и исследование унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля для построения ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Старостина Ярослава Константиновна. – Чебоксары, 2019. – 207 с.

### References

1. Mehmet Çunkaş, Omer Aydoğdu Realization of fuzzy logic controlled brushless dc motor drives using MATLAB/Simulink, Mathematical and Computational Applications, Association for Scientific Research Vol. 15, No. 2, pp. 218-229, 2010.
2. Wang Ping, Li Bin, Huang Ruixiang, Li Guidan, Diangong jishu xuebao Trans. China Electrotech. Soc. 2003. 18, № 2, P.5-8
3. Kusuma Gottapu, YV Prashanth, P Mahesh, Y Sumith, Simulation of DTC IM Based on PI& Artificial Neural Network Technique, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 7, July 2013
4. Shigapov Airat Almirovich, Smolyakov Boris Petrovich Direct control of the torque of an asynchronous motor with a neuro-fuzzy speed controller and neural network identification of electric drive parameters // News of universities. Energy problems. 2015. No. 95-101.
5. Starostina, Ya. K. Development and research of a unified transformer-transistor module for the construction of a number of energy-saving asynchronous electric drives: specialty 05.09.03 "Electrical complexes and systems": dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Starostina Yaroslava Konstantinovna. – Cheboksary, 2019. – 207 p.

### Информация об авторе

Я. К. Старостина – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

### Information about the author

Y. K. Starostina – Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 14.11.2023.

The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 14.11.2023.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ 1. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ

<b>Шевляков Дм. Э., Коренков Д.А.</b> Моделирование изменения емкости рабочего конденсатора электротермических установок для ВЧ сушки пиломатериалов.....	6
<b>Качанов А.Н., Миронов Е.А.</b> Установка для индукционной закалки крупногабаритных валков прокатных станов.....	11
<b>Шевляков Д. Э., Коренков Д.А.</b> Анализ влияния конфигурации штабеля на параметры электрического поля внутри сушильной камеры.....	15
<b>Коренков Д.А.</b> Численный анализ математической модели кинетики процесса вакуумно-высокочастотной сушки .....	19

### СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РАЗВИТИЯ

<b>Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.</b> Исследование внешних магнитных проводимостей электрической машины с поперечным потоком .....	23
<b>Чернышов В.А., Пригодский М.О.</b> Использование транспозиции проводов для идентификации района аварийной посадки беспилотного летательного аппарата, осуществляющего мониторинг ЛЭП 10 кВ .....	29
<b>Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.</b> Сравнение различных топологий электрических машин с поперечным потоком.....	34
<b>Андреев Е.С., Корбушов Л.В., Королева Т.Г.</b> Анализ влияния на качество электрической энергии светодиодных светильников с драйверами управления низкого качества .....	42
<b>Глоткина Л.А., Воркунов О.В., Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н.</b> Повышение энергоэффективности силовых трансформаторов путем исследования влияния адсорбционной очистки на тангенс угла диэлектрических потерь .....	47
<b>Гладков О.Б.</b> Обоснование внедрения иммерсионного охлаждения для светодиодной аппаратуры.....	53
<b>Рахманкулов Ш.Ф., Гарифуллин М.Ш., Галиев И.Ф.</b> Алгоритм «Мотылькового пламени» для оптимизации топографии нейронной сети для диагностики силовых трансформаторов при помощи хроматографического анализа.....	57
<b>Даровых А.С., Чернышов В.А.</b> Способ оперативного устранения перенапряжений при однофазном замыкании на землю в воздушной электрической сети 6-10 кВ с изолированной нейтралью .....	62

<b>Юрьев Ю.Н., Миронов Е.А.</b> Концепция управления спросом на электроэнергию в рамках цифровой трансформации энергосбытовых компаний.....	66
--	----

### **СЕКЦИЯ 3. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ**

<b>Чернышов В.А., Бирюков С.В., Лёвин И.С., Слизин И.А.</b> Поиск новых схмотехнических и конструкционных решений, направленных на повышение эффективности функционирования водонапорной башни Рожновского .....	71
<b>Походных М.С.</b> Применение ветро-солнечной электростанции в осенне-зимний период для частного домостроения Орловской области.....	76
<b>Анвар С.К., Петров Г.Н.</b> Аналитический метод расчета заиления водохранилищ ГЭС.....	82
<b>Корбушов Л.В, Андреев Е.С., Королева Т.Г.</b> Сравнительный анализ деградации светодиодных источников света с применением программы DIALux.....	87

### **СЕКЦИЯ 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

<b>Казаков Ю.Н., Нгуен Тхай Ха, Лю Ифань, Марахин Н.А., Савин Л.А.</b> Энергетические характеристики гидродинамических подшипников приводов ветрогенераторов .....	91
<b>Горин А.В., Родичев А.Ю., Серебренников А.Д.</b> Мониторинг узлов промышленного оборудования.....	98
<b>Шутин Д.В.</b> Влияние режимов активной смазки на вязкое трение и расход смазочного материала в триботронных гибридных опорах роторов .....	102
<b>Фетисов А.С., Литовченко М.Г.</b> Параметрическая оценка динамического поведения роторной системы на многоклиновых подшипниках скольжения .....	108
<b>Смирнова К.В., Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н.</b> Адаптивно-предиктивная модель анализа надежности турбогенератора .....	112
<b>Старостина Я.К.</b> Системы управления электроприводами на базе алгоритмов нечеткой логики и систем искусственного интеллекта .....	116

Научное издание

# ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК

МАТЕРИАЛЫ  
XXI МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

г. Орёл, 15 – 16 ноября 2023 г.

под редакцией д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова,  
д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова

Материалы печатаются в авторской редакции  
Компьютерная верстка, оригинал-макет, техн. редактирование –  
канд. техн. наук Д.А. Коренков

Электронный адрес размещения:  
<http://myconfs.ru/energoser2023/conferences/info>

Подписано к печати 15.12.2023 г. Формат 60x84 1/8  
Усл. печ. л. 10,13. Тираж 100 экз.  
Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95, <http://oreluniver.ru>  
[oreluniver.ru](http://oreluniver.ru).

Лицензия ПД № 8-0023 от 25.09.2000 г.  
Отпечатано с готового оригинал-макета  
в авторской редакции  
в ООО Полиграфическая фирма «Картуш»  
г. Орёл, ул. 2-я Посадская, 26. Тел. (4862) 44-51-46.  
E-mail: [karyush.orel@yandex.ru](mailto:karyush.orel@yandex.ru) [www.kartush-orel.ru](http://www.kartush-orel.ru)