

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 1, т. 20, 2024

# Electrical and data processing facilities and systems

No. 1, Vol. 20, 2024

Подписной индекс ПБ092 в каталоге «Почта России».

Научные специальности, по которым ведется прием статей в научный журнал  
«Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

- 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки),
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы (технические науки),
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника (технические науки),
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки).



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

**№ 1, т. 20, 2024**

---

Журнал основан в 2005 году.  
Выходит 4 раза в год.

**Учредитель**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-67387 от 05.10.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

---

**Журнал включен:**

- в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ);
- в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Подписка оформляется через АО «Почта России». Подписной индекс ПБ092.

---

Адрес редакции и издательства:  
450064, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1  
Тел.: (347) 242-07-59, [etiicis@yandex.ru](mailto:etiicis@yandex.ru)

Свободная цена. **12+**

Дата выхода в свет: 27.04.2024 г. Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 18.14.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 60.

Адрес типографии: 450064, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы», допускается только с письменного разрешения редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых статей.

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

## Редакционная коллегия:

### Главный редактор:

Хакимьянов Марат Ильгизович — д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



### Зам. главного редактора:

Хазиева Р.Т. — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



### Члены редакционной коллегии:

Артюшенко В.М. — д-р техн. наук, профессор, ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (г. Москва, Российская Федерация)

Вахеда А. — Ph. D, профессор, Иранский университет науки и технологий (г. Тегеран, Исламская Республика Иран)



Глазырин А.С. — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Российская Федерация)



Григорьев М.А. — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск, Российская Федерация)



Доломатов М.Ю. — д-р хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Зицмане И. — д-р техн. наук, профессор, Рижский технический университет, эксперт научного совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия)



Крымский В.Г. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Кушнир В.Г. — д-р техн. наук, профессор, Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Республика Казахстан)



Лингфей К. — Ph. D, профессор, Нанкинский университет авиации и аэронавтики (г. Нанкин, Китайская Народная Республика)



Метельков В.П. — д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Российская Федерация)



Николаев А.А. — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск, Российская Федерация)



Павлов С.В. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа, Российская Федерация)



Петроченков А.Б. — д-р техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь, Российская Федерация)



Саттаров Р.Р. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа, Российская Федерация)



Сафин Р.Р. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» (г. Москва, Российская Федерация)



Ураксеев М.А. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Феоктистов Н.А. — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии» (г. Москва, Российская Федерация)



Хизбуллин Ф.Ф. — д-р хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Шабанов В.А. — канд. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Ответственный секретарь: Б. А. Соловьев  
Технический редактор: С. В. Халитова

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

**No. 1, Vol. 20, 2024**

---

The journal was founded in 2005.  
Issued 4 times a year.

**Founder**

Federal State Budgetary Educational Institution  
of Higher Education «Ufa State Petroleum  
Technological University» (FSBEI HE «USPTU»)

International standard serial number  
ISSN 1999-5458

Mass media registration certificate  
ПИ № ФС 77-67387 dd. 05.10.2016 given  
by Federal service of supervision in the sphere  
of communication, information technologies and  
mass media

---

**The journal is included:**

- in Russian Index of Scientific Citing (RISC);
- in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of theses on competition of a scientific degree of candidate of sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of sciences».

Subscription through Russian Post. Subscription Index ПБ092.

---

Address of Editors office and Founder:  
450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.  
Tel. (347) 242-07-59, etiicis@yandex.ru

Price is free. **12+**

Date of publication 27.04.2024. Paper format 60×84/8.  
Offset printing. 18.14 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 60.

Address of Publishing Office:  
450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without prior written consent of the Editors office of the journal «Electrical and Data Processing Facilities and Systems».

The Editors office do not always share the opinion of authors of the articles published.

Replicated in the printing office of the USPTU publishing house from electronic files.

## Editorial board:

### Editor-in-chief:

Marat I. Khakimyanov — Dr. Sci. Tech.,  
Associate Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological  
University» (Ufa, Russian Federation)



### Deputy editor-in-chief:

Khazieva R.T. — Cand. Sci. Tech.,  
Associate Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological  
University» (Ufa, Russian Federation)



### Members of editorial board:

Artyushenko V.M. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
SBEI HE MR «University of Technology» (Moscow, Russian Federation)



Dolomatov M.Yu. — Dr. Sci. Chem., Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



Feoktistov N.A. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Moscow State University of Design and Technology» (Moscow, Russian Federation)



Hizbullin F.F. — Dr. Sci. Chem., Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



Glazyrin A.S. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSAEI HE «National Research Tomsk Polytechnic University» (Tomsk, Russian Federation)



Grigorev M.A. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSAEI HE «South Ural State University» (Chelyabinsk, Russian Federation)



Krymsky V.G. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



Kushnir V.G. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
Akhmet Baitursynov Kostanay Regional University (Kostanay, Kazakhstan)



Lingfei X. — Ph. D., Professor, Nanjing University Aeronautics and Astronautics  
(Nanjing, Chinese People's Republic)



Metelkov V.P. — Dr. Sci. Tech., Professor, FSAEI HE «Ural Federal University  
named after the first President of Russian Federation B.N. Yeltsin» (Yekaterinburg, Russian Federation)



Nikolaev A.A. — Cand. Sci. Tech., Associate Professor,  
FSBEI HE «Nosov Magnitogorsk State Technical University» (Magnitogorsk, Russian Federation)



Pavlov S.V. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa University of Science and Technology» (Ufa, Russian Federation)



Petrochenkov A.B. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Perm National Research Polytechnic University» (Perm, Russian Federation)



Shabanov V.A. — Cand. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



Safin R.R. — D. Sci. Tech., Professor, FSBEI HE «Russian Biotechnological University»  
(Moscow, Russian Federation)



Sattarov R.R. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa University of Science and Technology» (Ufa, Russian Federation)



Urakseev M.A. — Dr. Sci. Tech., Professor,  
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



Vahedi A. — Ph. D., Professor, Iran University of Science & Technology  
(Tehran, Islamic Republic of Iran)



Zicmane I. — Dr. Sci. Tech., Professor, Riga Technical University,  
Expert of the Latvian Council of Science (Riga, Latvia)



**Assistant editor:** B. A. Solovyev  
**Technical editor:** S. V. Khalitova



---

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

*Сидоров С. В., Сушков В. В., Сухачев И. С.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ  
НА МОДУЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ 9

---

*Гирник А. С., Федянин А. Л.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК ТЯГОВЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПРИ НАРУШЕНИИ РЕЖИМА  
ЭКСПЛУАТАЦИИ 19

---

*Гизатуллин Ф. А., Демин А. Ю.*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ 34

---

*Саттаров Р. Р., Махиянов А. В.*

УПРОЩЕННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДВУХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ  
С РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМИ ОБМОТКАМИ 45

---

*Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Димукашева Г. Е., Коломеец Д. А.*

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО:  
ПОТЕНЦИАЛ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЬТЬЕ 55

---

*Зыкин П. В., Хамитов Р. Н., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С.*

СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
ПОДАЧИ И ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧИСЛОВЫМ  
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ 65

---

*Сираев Ф. Ф., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МАЛОЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ 75

---

*Хайдаров И. И., Шарипов Р. Р.*

БЕЗДАТЧИКОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ 90

---

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

*Зайцева А. А., Белявцев М. В., Зайцев Е. А., Кильмаков Д. К., Силин И. П.,  
Гаврилов В. Ф.*

СИНТЕЗ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ВЕРТОЛЕТА  
ПО КОМПЛЕКСУ ВНУТРИДВИГАТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ 97

---

---

*Закирничная М. М., Варламов В. А., Палладина Я. А.*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МАСШТАБИРОВАНИЯ БАЗОВОЙ  
ФУНКЦИИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА СТЕПЕНЬ ПРОЯВЛЕНИЯ  
ОСНОВНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ  
АГРЕГАТОВ В ВЕЙВЛЕТ-КАРТИНАХ 106

---

*Хазиева Р. Т.*

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ  
СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ 121

---

*Зиннатуллин В. Ф., Коледин С. Н.*

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ОСТАТКОВ В ПРОЦЕССЕ КОМПАУНДИРОВАНИЯ  
БЕНЗИНОВ ОСНОВАННЫЙ НА ИНТЕГРАЦИИ ЛИНЕЙНОГО  
ПРОГРАММИРОВАНИЯ И НЕЙРОННОЙ СЕТИ 132

---

*Шарипов Р. Р., Хайдаров И. И.*

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АСИНХРОННОГО  
ЧАСТОТНОГО ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СНИЖЕНИЯ  
ВРЕМЕНИ ПЕРЕРЫВА В РАБОТЕ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ  
ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ 141

---

**Об авторах** 149

---

---

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

---

*Sidorov S. V., Sushkov V. V., Sukhachev I. S.*

MODELING OF SINGLE-PHASE GROUND FAULT IN POWER LINES  
WITH ISOLATED NEUTRAL ON A MODULAR LABORATORY SYSTEM 9

---

*Girnik A. S., Fedyanin A. L.*

INVESTIGATION OF ELECTRO-MECHANICAL OVERLOADS OF ELECTRIC  
LOCOMOTIVES TRACTION ENGINES IN CASE OF OPERATING CONDITIONS  
VIOLATION 19

---

*Gizatullin F. A., Demin A. Yu.*

IMPROVING TECHNIQUE FOR EFFICIENCY CONTROL OF AIRCRAFT ENGINE  
IGNITION SYSTEMS 34

---

*Sattarov R. R., Makhiyanov A. V.*

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF WIND POWER DEVICES WITH  
RECONFIGURABLE WINDINGS 45

---

*Solovev B. A., Gamisonia G. K., Dimukasheva G. Ye., Kolomeets D. A.*

CONVERSION OF THERMAL ENERGY INTO ELECTRICITY: POTENTIAL  
AND EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC GENERATORS BASED ON PELTIER  
ELEMENTS 55

---

*Zykin P. V., Khamitov R. N., Zhrebtsov S. N., Ganicheva L. S.*

SYNTHESIS OF FUZZY LOGIC ROUGHNESS CONTROL SYSTEM BY MATLAB  
SIMULINK SOFTWARE PACKAGE 65

---

*Siraev F. F., Kirillov R. V., Khazieva R. T.*

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING CONVERTER FOR A SMALL  
WIND TURBINE 75

---

*Khaydarov I. I., Sharipov R. R.*

SENSORLESS SYNCHRONOUS MOTOR CONTROL SYSTEM 90

---

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

---

*Zaitseva A. A., Belyavtsev M. V., Zaitsev E. A., Kilmakov D. K., Silin I. P., Gavrilov V. F.*

SYNTHESIS OF AN INTEGRATED CONTROL SYSTEM  
FOR A HELICOPTER MULTI-ENGINE POWER PLANT  
ACCORDING TO A COMPLEX OF INTRA-ENGINE PARAMETERS 97

---



---

*Zakirnichnaya M. M., Varlamov V. A., Palladina Ya. A.*

ASSESSING THE INFLUENCE OF THE SCALING FACTOR  
OF THE BASIC WAVELET TRANSFORM FUNCTION ON THE DEGREE  
OF MANIFESTATION OF THE MAIN FAULTS OF CENTRIFUGAL PUMPING  
UNITS IN WAVELET PATTERNS 106

---

*Khazieva R. T.*

METHODOLOGY FOR SELECTING THE OPTIMAL LOCATION  
OF A SOLAR POWER PLANT 121

---

*Zinnatullin V. F., Koledin S. N.*

METHOD OF MINIMIZING RESIDUES IN THE PROCESS OF GASOLINE  
COMPOUNDING BASED ON THE INTEGRATION OF LINEAR PROGRAMMING  
AND NEURAL NETWORK 132

---

*Sharipov R. R., Khaydarov I. I.*

SOFTWARE COMPLEX FOR IMPLEMENTING ASYNCHRONOUS FREQUENCY  
STARTING OF HIGH-VOLTAGE MOTORS AND REDUCING BREAK TIME IN  
MOTOR OPERATION IN THE EVENT OF SHORT-TERM POWER LOSS 141

---

**About the Authors** 149

---

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-9-18

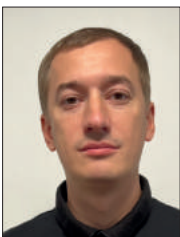
## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НА МОДУЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

**Сергей Владимирович Сидоров****Sergei V. Sidorov**

старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика»,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия

**Валерий Валентинович Сушков****Valery V. Sushkov**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Энергетика»,  
Нижевартовский государственный университет,  
Нижевартовск, Россия

**Илья Сергеевич Сухачев****Ilya S. Sukhachev**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электроэнергетика»,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия

### Актуальность

Работа посвящена решению задачи повышения точности определения места однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью разработанным авторами способом. С целью предотвращения повреждения линейного электрооборудования и нарушения нормальной работы потребителей электрической энергии апробация способа путём проведения испытаний на действующей электрической сети заменена натурными экспериментами на разработанной модульной лабораторной установке.

### Цель исследования

Провести на модульной лабораторной установке апробацию способа определения места однофазного замыкания на землю электрической сети с изолированной нейтралью и определить его погрешность.

### Методы исследования

В работе использован Фурье-анализ массива мгновенных значений сигнала, привязанных к отметкам времени, применено натурное моделирование линии электропередачи.

### Ключевые слова

стендовая модель,  
воздушная линия  
электропередачи,  
однофазное замыкание  
на землю, переходные  
процессы, определение  
места замыкания

### Результаты

Проведена апробация способа определения расстояния до места однофазного замыкания на землю на разработанной модульной лабораторной установке. Получены осциллограммы, сохраненные в виде массива мгновенных значений сигнала, привязанных к отметкам времени с интервалом 20 мкс. Построена частотная характеристика сигнала напряжения в конце линии электропередачи при однофазном замыкании на землю повреждённой фазы путем применения к сохранённому массиву мгновенных значений токов и напряжений прямого преобразования Фурье. Анализ частотной характеристики сигнала тока и напряжения в конце линии электропередачи при однофазном замыкании на землю повреждённой фазы модуля линии электропередачи показал, что расстояние до места замыкания от конца линии составляет  $x \approx 0,244 \cdot l$ , которое соответствует реальному месту повреждения с погрешностью  $\varepsilon \approx 2,439 \%$ .

**Для цитирования:** Сидоров С. В., Сушков В. В., Сухачев И. С. Моделирование однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью на модульной лабораторной установке // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 9-18. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-9-18>.

Original article

## MODELING OF SINGLE-PHASE GROUND FAULT IN POWER LINES WITH ISOLATED NEUTRAL ON A MODULAR LABORATORY SYSTEM

### Relevance

The work is devoted to solving the problem of increasing the accuracy of single-phase ground fault location in electrical networks with isolated neutral by the method developed by the authors. In order to prevent damage to electrical equipment and disruption of normal operation of consumers of electrical energy, approbation of the method by testing on the existing electrical network is replaced by field experiments on the developed modular laboratory system.

### Aim of research

To carry out on the modular laboratory system approbation of the method of determining the place of single-phase earth fault of the electric network with isolated neutral and to determine its error.

### Research methods

In this paper, Fourier analysis of signal timeseries array and full-scale modeling of the transmission line is applied.

### Results

The method of determining the distance to the place of single-phase ground fault has been tested on the developed modular laboratory system. Oscillograms were obtained, stored as signal timeseries array with 20  $\mu$ s interval. The frequency response of the voltage signal at the end of the transmission line during a single-phase ground fault of the damaged phase was constructed by applying the direct Fourier transform to the stored array of instantaneous values of currents and voltages. The analysis of the frequency response of the current and voltage signal at the end of the transmission line at single-phase ground fault of the damaged phase of the transmission line module showed that the distance to the fault location from the end of the line is  $x \approx 0,244 \cdot l$ , which corresponds to the real fault location with  $\varepsilon \approx 2,439 \%$  error.

### Keywords

stand model, overhead transmission line, single-phase ground fault, transition processes, short-circuit detection

**For citation:** Sidorov S. V., Sushkov V. V., Sukhachev I. S. Modelirovaniye odnofaznogo замыканиya na zemlyu v elektricheskikh setyakh s izolirovannoy neytral'yu na modul'noy laboratornoy ustanovke [Modeling of Single-Phase Ground Fault in Power Lines with Isolated Neutral on a Modular Laboratory System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 9-18 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-9-18>.

## Введение

Возникновение ненормальных и аварийных режимов работы электрических сетей является одной из основных причин ухудшения показателей качества электрической энергии. Повреждения воздушных линий электропередачи обусловлены перенапряжениями, гололёдными образованиями, ветровой нагрузкой, механическими воздействиями и прочими факторами, которые способны привести к развитию различных видов коротких замыканий и обрыву проводов [1–5]. В электрических сетях с изолированной нейтралью основным видом повреждения воздушной линии является возникновение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), доля которых, согласно опыту эксплуатации и различным экспертным оценкам, составляет до 70 % от общего количества повреждений. При этом среднее число повреждений воздушных линий, среднее время восстановления работоспособности, включая процессы диагностирования и локализации места повреждения, определяют надёжность электрической сети. Таким образом, решение проблемы повышения надёжности электрических сетей с изолированной нейтралью путём диагностирования ОЗЗ и определения расстояния до места повреждения воздушной линии электропередачи является актуальной научно-технической задачей.

В настоящее время для определения расстояния до места ОЗЗ воздушной линии электропередачи в цифровых устройствах релейной защиты применяются способы, основанные на применении индикаторов повреждений воздушных линий, устанавливаемых на линии

электропередачи и параметрах аварийного режима (токов нулевой и обратной последовательностей напряжений) [6, 7]. Ввиду малости токов нулевой последовательности в электрических сетях с изолированным режимом нейтрали и сложности их точного измерения авторами получен патент [8] на способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи, основанный на обработке мгновенных значений токов и напряжений группы трансформаторных подстанций.

С целью предотвращения повреждения линейного электрооборудования и недопущения нарушений работы потребителей электрической энергии принято решение на начальном этапе заменить испытания на действующей электрической сети лабораторными опытами, в результате чего разработана модульная лабораторная установка на базе блоков производства ООО НПП «Учтех-Профи» [9].

## Теория

В качестве прототипа при разработке модульной лабораторной установки взят участок воздушной линии, упрощённая однолинейная схема которой, адаптированная под напряжение питания 380 В, изображена на рисунке 1.

В соответствии с рисунком 1 разработанная лабораторная установка содержит физические модели всех основных элементов сети, реализованные модулями трёхфазной сети (Г1), трансформатора (Т1), воздушной линии электропередачи (ВЛ), активной нагрузки (R1), короткозамыкателя (Q1) и модулем ввода-вывода, содержащим измеритель-

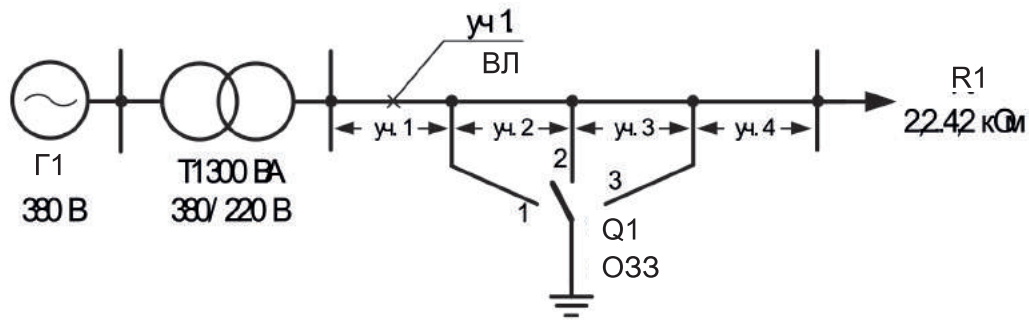


Рисунок 1. Принципиальная схема участка электрической сети

Figure 1. Circuit power grid

ные трансформаторы тока и напряжения и обеспечивающим связь с ЭВМ для обработки и хранения результатов измерений.

Модуль Т1 содержит трансформатор, обмотки которого соединены по схеме «треугольник — треугольник». Модифицированный модуль воздушной линии электропередачи представляет собой цепную схему П-образных звеньев, в которой продольное активно-индуктивного сопротивление регулируется переключателем SA1, а поперечная ёмкостная проводимость — переключателями SA2, SA3 в зависимости от длины, сечения провода и других эксплуатационных параметров и режимов моделируемого участка электрической сети. Основные технические характеристики и диапазон изменения параметров модуля воздушной линии электропередачи представ-

лены в таблице 1. Модуль короткозамыкателя Q1 применяется для моделирования ОЗЗ на участках 1–4 (рисунок 1).

В результате, с целью апробации разработанного способа [8] определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью на основе перечисленных модулей разработана лабораторная установка, схема которой приведена на рисунке 2.

Лабораторная установка содержит четыре идентичных модуля воздушной линии электропередачи, соединённых каскадным способом. Измерение фазных токов и напряжений осуществляется в конце линии измерительными трансформаторами в составе модуля ввода-вывода. В модуле активной нагрузки R1 резисторы соединены по схеме «звезда».

Таблица 1. Характеристики и диапазон изменения параметров модуля воздушной линии электропередачи

Table 1. Characteristics and variation range of transmission power line module parameters

Номинальное напряжение, В	220		
Номинальный ток, А	0,6		
Индуктивность фазы, Гн	При положении SA1		
	1	2	3
	0,1	0,2	0,3
Активное сопротивление фазы, Ом	При положении SA1		
	1	2	3
	4	7	10
Ёмкость фазы в начале/конце линии, мкФ	При положении SA2		
	1	2	3
	0	0,47	1,00



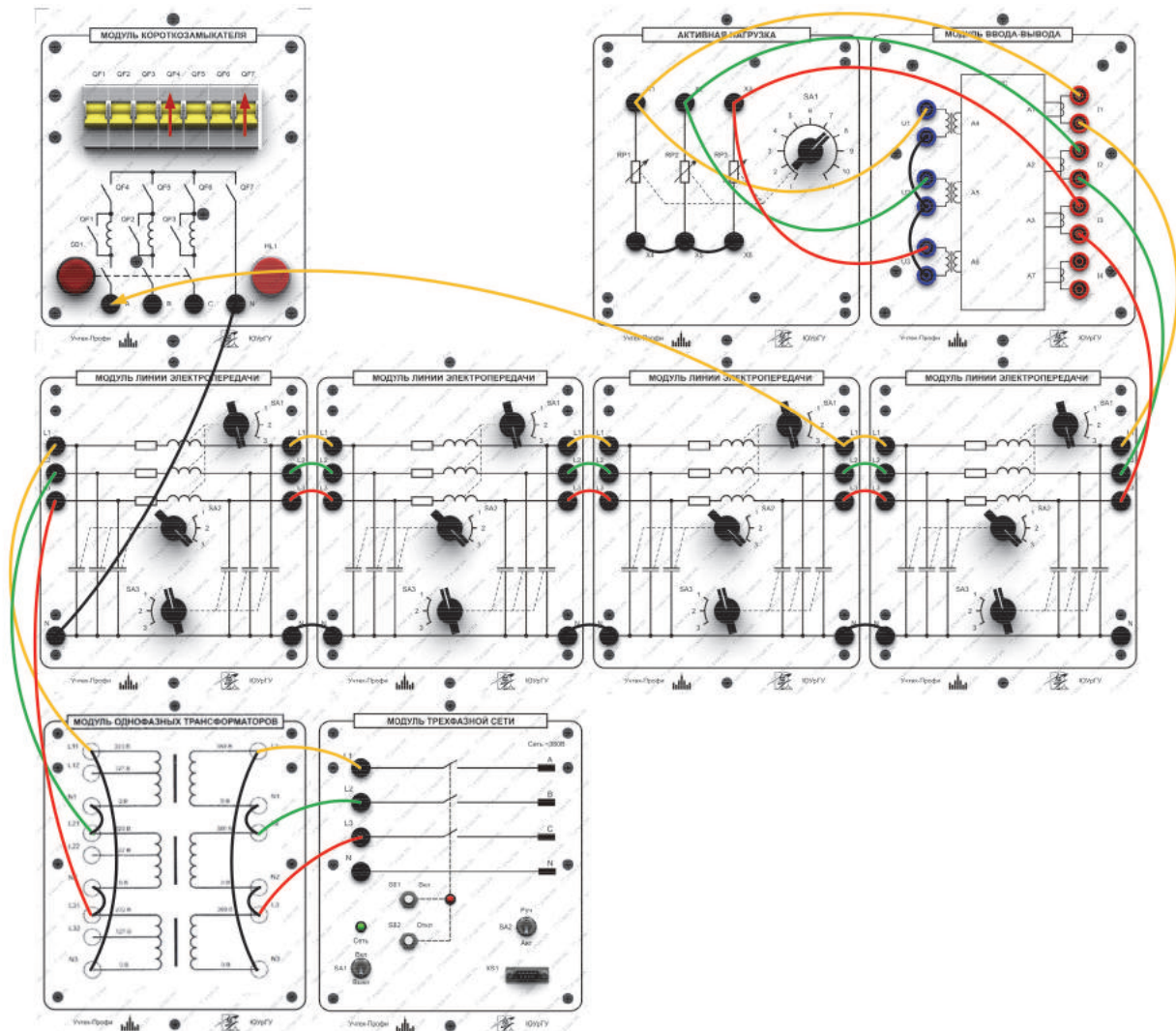


Рисунок 2. Схема модульной лабораторной установки

Figure 2. Scheme of modular laboratory installation

Модуль короткозамыкателя осуществляет ОЗЗ между участками 3 и 4 воздушной линии электропередачи, что соответствует позиции 3 переключателя Q1 на рисунке 1.

Согласно теории электрических цепей, возникновение ОЗЗ трактуется как коммутация, следовательно, является причиной переходного процесса, который в общем случае содержит как свободную, так и принуждённую составляющие [1, 10–12]. Свободная составляющая переходного процесса является непериодической несинусоидальной функцией времени и может быть разложена в ряд Фурье на высшие гармонические составляющие. В подавляющем большинстве случаев первичные обмот-

ки трансформаторов соединены треугольником, поэтому гармоники нулевой последовательности не передаются на низкую сторону и не могут быть получены разложением в ряд Фурье регистрируемых сигналов, что не вызывает затруднений в процессе определения места повреждения воздушной линии электропередачи.

Работа с модульной лабораторной установкой для апробации разработанного способа [8] осуществляется в соответствии со следующей методикой испытаний.

1. Установить необходимые положения переключателей SA1-3 четырёх модулей воздушной линии электропередачи.



2. В модуле активной нагрузки реостатом установить необходимую величину фазного сопротивления трёхфазного потребителя электрической энергии.

3. Выбрать место возникновения ОЗЗ моделируемой воздушной линии электропередачи путём установки короткозамыкателя Q1 в требуемое положение. Положение 1 соответствует расстоянию от места измерения токов и напряжений модулем ввода-вывода до места ОЗЗ равному  $x_1 = 3/4l$ , положение 2 — расстоянию  $x_2 = 1/2l$ , положение 3 — расстоянию  $x_3 = 1/4l$ , где  $l$  — длина воздушной линии электропередачи.

4. На ЭВМ предварительно должно быть установлено и запущено программное обеспечение, предназначенное для получения, хранения и обработки результатов измерений фазных напряжений и токов измерительными трансформаторами в составе модуля ввода-вывода. Необходимым функционалом обладает, например, программа DeltaProf1 [9], способная также осуществлять построение осциллограмм по результатам измерений и сохранение результатов осциллографирования в виде массива **M** мгновенных значений сигнала, привязанных к отметкам времени с интервалом  $\Delta t = 20$  мкс.

5. При разомкнутом короткозамыкателе Q1 подать напряжение величиной 380 В для питания модуля трёхфазной сети (Г1) — воздушная линия электропередачи работает в нормальном режиме.

6. На ЭВМ активировать запись в массив **M** мгновенных значений фазных токов  $i_a, i_b, i_c$  и напряжений  $u_a, u_b, u_c$  в нормальном режиме.

7. Осуществить ручное срабатывание короткозамыкателя Q1 — воздушная линия электропередачи работает в режиме ОЗЗ, в массив **M** записываются мгновенные значения фазных токов и напряжений в ненормальном режиме (ОЗЗ).

8. Вычислить спектры сигналов измеренных фазных токов и напряжений прямым преобразованием Фурье и зафиксировать резонансную частоту  $f_{\text{озз}}$  воздушной линии электропередачи при ОЗЗ из условия возникновения явления резонанса. Для этого сначала через интервал времени  $\Delta t$  необходимо взять выборку измеренных мгновенных значений напряжений и токов из записанного массива **M**. Верхний предел частоты в спектре должен быть равен частоте Котельникова  $1/(2\Delta t)$ , так как все частоты, превышающие половинную частоту дискретизации, отражаются относительно неё и переносятся на более низкие частоты, что приводит к возникновению эффекта наложения, искажающего исходный спектр. Затем элементы выборки необходимо преобразовать в цифровую форму и при помощи быстрых цифровых преобразований вычислить Фурье-образ. На заключительном шаге к элементам выборки следует применить прямое преобразование Фурье и сформировать спектр сигналов:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i kn}{N}}, \quad (1)$$

где  $N$  — количество значений сигнала, измеренных за период, а также количество компонент разложения;

$x_n$  — измеренные значения сигнала в дискретных временных точках с номерами  $n$  от 0 до  $N - 1$ ;

$X_k$  — комплексные амплитуды высших гармонических составляющих, формирующих исходный сигналов фазных токов и напряжений;

$k$  — номер высшей гармонической составляющей сигнала.

9. На основании полученных спектров сигналов токов и напряжений  $X_k$  определить наименьшую резонансную частоту  $f_{\text{озз}}$  при ОЗЗ воздушной линии электропередачи, превышающую рабочее (номинальное) значение частоты электриче-

ской сети, из условия равенства  $2\pi n$  разности фаз сигналов напряжения и тока, где  $n \in I'_0$ .

10. Вычислить наименьшую резонансную частоту воздушной линии электропередачи в нормальном режиме работы  $f_{рез}$  из перечня корней, полученных в результате численного решения уравнений математической модели цепной схемы модуля [8, 13] по условию возникновения резонанса.

11. Вычислить расстояние  $x$  до места возникновения ОЗЗ воздушной линии электропередачи от места измерения напряжений и токов модулем ввода-вывода, используя величины  $f_{ОЗЗ}$  и  $f_{рез}$  [8]:

$$x = \frac{f_{рез}}{f_{ОЗЗ}} \cdot l. \quad (2)$$

12. Сравнить расстояние  $x$  до места возникновения ОЗЗ воздушной линии электропередачи от места измерения напряжений и токов модулем ввода-вывода с расстоянием, установленном в пункте 2 настоящей методики и сформировать заключение о точности способа определения места ОЗЗ в электрической сети с изолированной нейтралью [8, 14].

## Результаты

Испытания на разработанной модульной лабораторной установке произведены при величине активной нагрузки 2,4 Ом и короткозамыкателе Q1, установленном в положение 3, что соответствует расстоянию от места измерения токов и напряжений модулем ввода-вывода до места ОЗЗ равному  $x_3 = 1/4l$ . Переключатели каждого из четырёх модулей воздушной линии электропередачи установлены одинаково: SA1 — в положение 2, SA2 — в положение 1, SA3 — в положение 2.

В соответствии с разработанной методикой испытаний на рисунке 3 получены осциллограммы фазных напряжений и токов при ОЗЗ фазы «А», при этом фазные напряжения на неповреждённых фазах превышают линейные номинальные величины [15].

На рисунке 4 представлена частотная характеристика напряжения воздушной линии электропередачи при ОЗЗ фазы «А», согласно которой «резонансная» частота неповреждённых фаз линии и  $f_{рез} = 149,97$  Гц, частота, определённая

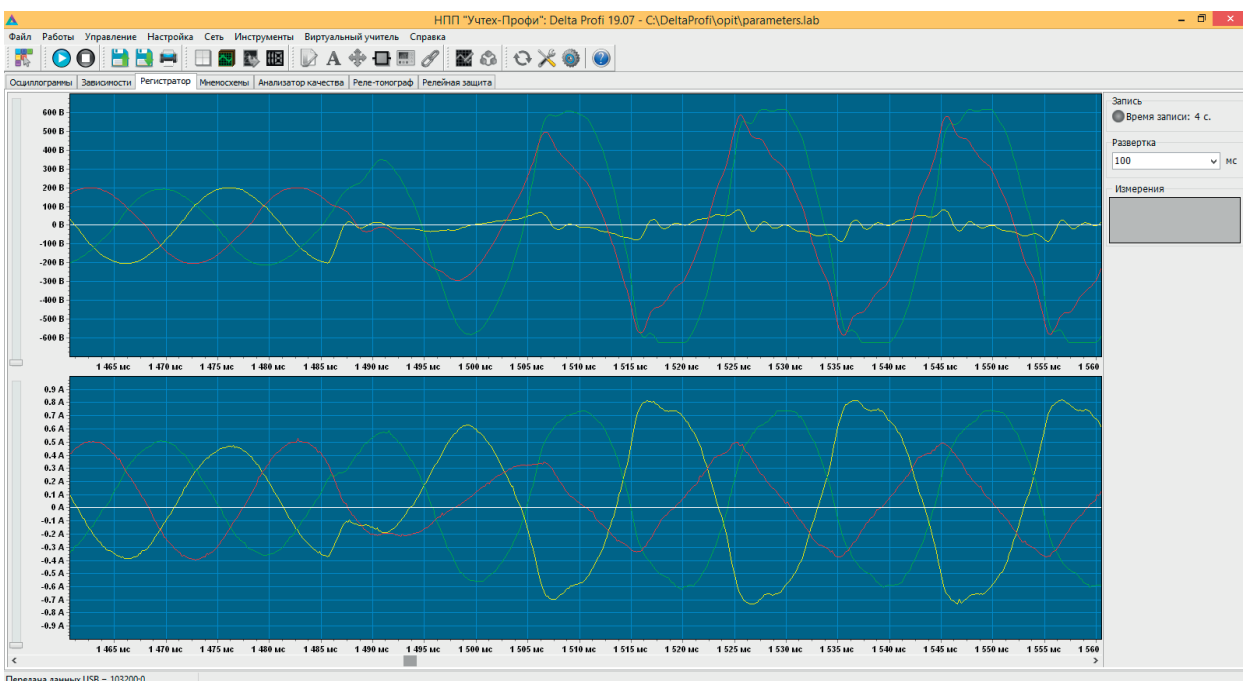
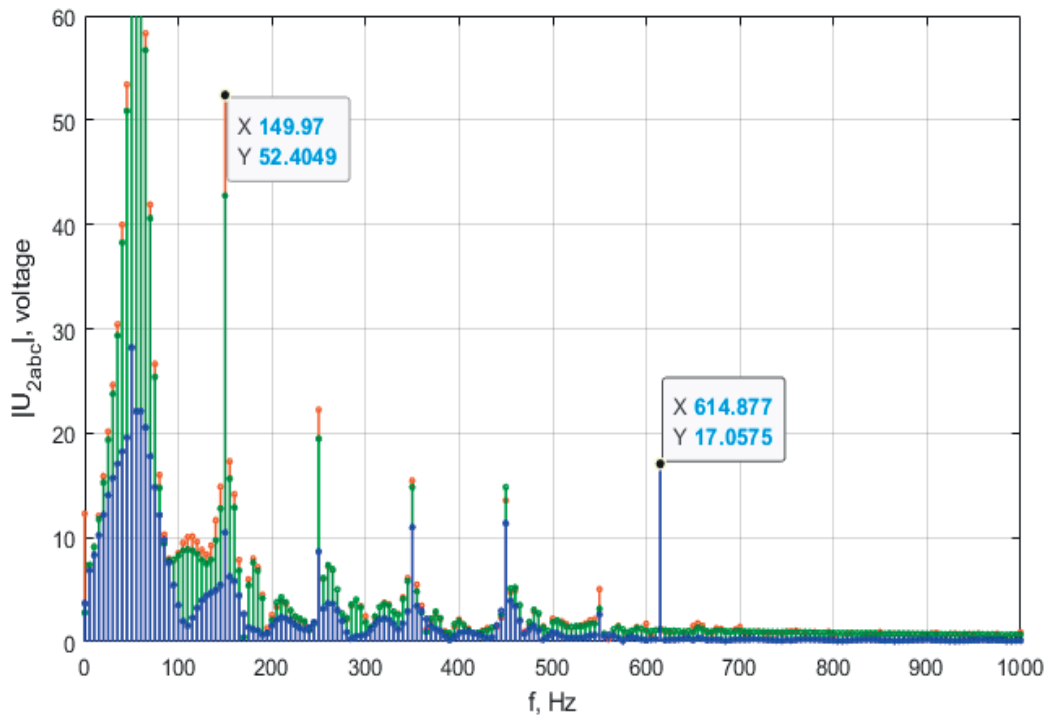


Рисунок 3. Осциллограмма фазных напряжений и токов при ОЗЗ фазы «А»

Figure 3. Phase voltages and currents oscillogram at single-phase ground fault of phase «А»



**Рисунок 4.** Частотная характеристика напряжения воздушной линии электропередачи при ОЗЗ фазы «А»

**Figure 4.** Power line voltage frequency characteristic at single-phase ground fault of phase «A»

для повреждённой фазы линии,  $f_{033} = 614,877$  Гц.

Согласно формуле (2), расстояние  $x$  до места возникновения ОЗЗ воздушной линии электропередачи от места измерения напряжений и токов модулем ввода-вывода составляет:

$$x = \frac{f_{\text{рез}}}{f_{033}} \cdot l = \frac{149,97}{614,877} \cdot l \approx 0,244 \cdot l;$$

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{x}{x_3} \right| = \left| 1 - \frac{0,244 \cdot l}{1/4 \cdot l} \right| \approx 2,439 \%$$

Полученное расстояние  $x \approx 0,244 \cdot l$  соответствует реальному месту возникновения однофазного замыкания на землю с погрешностью  $\varepsilon \approx 2,439 \%$ .

### Выводы

Произведены испытания способа определения места ОЗЗ воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью на

модульной лабораторной установке. Получены осциллограммы токов и напряжений и частотные характеристики, выделены «резонансные» частоты, возникающие при переходном процессе вследствие ОЗЗ, которые позволяют определить расстояние до места повреждения воздушной линии в соответствии с методикой испытаний. Погрешность определения расстояния до места повреждения воздушной линии электропередачи не превышает 2,5 %.

Применение общепринятых положений и законов теории электрических цепей на этапах математического моделирования воздушной линии электропередачи и разработки соответствующего модуля лабораторной установки позволяет в достаточной степени распространить результаты лабораторных испытаний на реальную линию электропередачи.

### Список источников

1. Abu-Siada A., Mosaad M.I., Mir S. Voltage-Current Technique to Identify Fault Location within Long Transmission Lines // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2020. No. 14 (23). P. 5588-5596. DOI:10.1049/iet-gtd.2020.1012.
2. Salim R.H., Resener M., Filomena A.D., Caino de Oliveira K.R., Bretas A.S. Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. No. 24 (2). P. 508-516. doi:10.1109/tpwr.2008.2002977.
3. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с. ISBN 5-283-02584-5.
4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
5. Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // *Новости электротехники*. 2005. № 1(31). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php>.
6. СТО 34.01-4.1-002-2017. Регистраторы аварийных событий. Технические требования. ПАО «Россети», 2017. 27 с.
7. Пат. 2510515 РФ, МПК G 01 R 31/08. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на линии электропередачи / В.А. Бороденко, В.Н. Горюнов, М.Я. Клецель, К.И. Никитин. 2011134542, Заявлено 17.08.2011; Опубл. 27.03.2014.
8. Пат. 2798941 РФ, МПК G 01 R 31/08. Способ определения места однофазного замыкания на землю воздушных линий электропередачи в электрических сетях с изолированной нейтралью / С.В. Сидоров, В.В. Сушков, И.С. Сухачев. 2022135489, Заявлено 31.12.2022; Опубл. 29.06.2023.
9. «Учтех-Профи» Учебная техника и наглядные пособия от производителя [Электронный ресурс]. URL: [https://labstand.ru/catalog/elektroenergeticheskie\\_sistemy](https://labstand.ru/catalog/elektroenergeticheskie_sistemy) (дата обращения: 19.03.2024).
10. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
11. Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983. 207 с.
12. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Физические основы диагностики повреждения воздушных

линий распределительных электрических сетей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2004. № 5-6. С. 43-47.

13. Сушков В.В., Сухачев И.С., Сидоров С.В. Разработка комплексного подхода к диагностированию места повреждения воздушной линии электропередачи при однофазных замыканиях на землю на основе алгоритма обработки данных цифровых подстанций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023. Т. 334. № 7. С. 66-77. DOI: 10.18799/24131830/2023/7/4332. EDN: YZVJCU.

14. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. Development of a Method for Determining the Location of a Single Line-To-Ground Fault of an Overhead Power Line with Voltage of 6(10) kV Considering Climatic Factors // *Kazan, E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 124. P. 1-6. Article No. 05003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405003>.

15. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 116 с. ISBN 978-5-98298-537-5.

### References

1. Abu-Siada A., Mosaad M.I., Mir S. Voltage-Current Technique to Identify Fault Location within Long Transmission Lines. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2020, No. 14 (23), pp. 5588-5596. DOI:10.1049/iet-gtd.2020.1012.
2. Salim R.H., Resener M., Filomena A.D., Caino de Oliveira K.R., Bretas A.S. Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, No. 24 (2), pp. 508-516. doi:10.1109/tpwr.2008.2002977.
3. Arzhannikov Ye.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikanov M.Sh. *Opredeleniye mesta korotkogo zamykaniya na vysokovol'tnykh liniyakh elektroperedachi* [Ground Faults in Networks with Isolated Neutral and Capacitive Current Compensation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 272 p. ISBN 5-283-02584-5. [in Russian].
4. Likhachev F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoyeytral'yu i s kompensatsiyey yomkostnykh tokov* [Ground Faults in Networks with Isolated Neutral and Capacitive Current Compensation]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 152 p. [in Russian].
5. Shalin A.I. *Zamykaniya na zemlyu v liniyakh elektroperedachi 6–35 kV. Osobennosti vozni-knoveniya i pribory zashchity zashchity* [Ground Faults in 6–35 kV Power Lines. Features of Occurrence and Protection Devices]. *Novosti*



*elektrotekhniki* — *News of Electrical Engineering*, 2005, No. 1(31). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php>. [in Russian].

6. STO 34.01-4.1-002-2017. *Registratory avarynykh sobytiy. Tekhnicheskiye trebovaniya* [STO 34.01-4.1-002-2017. Emergency Event Recorders. Technical Requirements]. PAO «Rosseti», 2017. 27 p. [in Russian].

7. Borodenko V.A., Goryunov V.N., Kletsel' M.Ya., Nikitin K.I. *Sposob opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya na linii elektroperedachi* [Method of Determining Distance to Single-Phase Short-Circuit Point on Electric Power Line]. Patent RF, No. 2510515, 2014. [in Russian].

8. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. *Sposob opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu vozduzhnykh liniy elektroperedachi v elektricheskikh setyakh s izolirovannoy neytral'yu* [Method for Determining the Location of a Single-Phase Ground Fault of Overhead Power Lines in Electrical Networks with Isolated Zero Line]. Patent RF, No. 2798941, 2023. [in Russian].

9. «Uchtekh-Profi» *Uchebnaya tekhnika i naglyadnyye posobiya ot proizvoditelya* [«Uchtekh-Profi» Educational Equipment and Visual Aids from the Manufacturer] [Electronic Resource]. URL: [https://labstand.ru/catalog/elektroenergeticheskie\\_sistemy](https://labstand.ru/catalog/elektroenergeticheskie_sistemy) (accessed 19.03.2024). [in Russian].

10. Shalyt G.M. *Opredeleniye mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh* [Determination of Fault Locations in Electrical Networks]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 312 p. [in Russian].

11. Shalyt G.M., Ayzenfel'd A.I., Malyy A.S. *Opredeleniye mest povrezhdeniya liniy elektroperedachi po parametram avariynogo rezhima* [Determination of Locations of Damage to Power Lines Based on Emergency Mode Parameters]. 2-oe

izd., pererab. i dop. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 207 p. [in Russian].

12. Minullin R.G., Fardiyev I.Sh. *Fizicheskiye osnovy diagnostiki povrezhdeniya vozduzhnykh liniy raspredelitel'nykh elektricheskikh setey* [Physical Basis for Diagnosing Damage to Overhead Lines of Electrical Distribution Networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* — *News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2004, No. 5-6, pp. 43-47. [in Russian].

13. Sushkov V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. *Razrabotka kompleksnogo podkhoda k diagnostirovaniyu mesta povrezhdeniya vozduzhnoy linii elektroperedachi pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu na osnove algoritma obrabotki dannykh tsifrovyykh podstantsiy* [Development of a Comprehensive Approach to Diagnosing the Overhead Line Faults Location in Single-Phase Ground Faults Based on a Digital Substation Data Processing Algorithm]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geoesursov* — *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2023, Vol. 334, No. 7, pp. 66-77. DOI: 10.18799/24131830/2023/7/4332. EDN: YZVJCU. [in Russian].

14. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. *Development of a Method for Determining the Location of a Single Line-To-Ground Fault of an Overhead Power Line with Voltage of 6(10) kV Considering Climatic Factors*. *Kazan, E3S Web of Conferences*, 2019, Vol. 124, pp. P. 1-6. Article No. 05003. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405003>. [in Russian].

15. Vainshtein R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Rezhimy zazemleniya neytrali v elektricheskikh sistemakh* [Neutral Grounding Modes in Electrical Systems]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 116 p. ISBN 978-5-98298-537-5. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 11.03.2024; одобрена после рецензирования 20.03.2024; принята к публикации 27.03.2024.*

*The article was submitted 11.03.2024; approved after reviewing 20.03.2024; accepted for publication 27.03.2024.*

Научная статья

УДК 621.313.333.2

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-19-33

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПРИ НАРУШЕНИИ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Андрей Сергеевич Гирник**Andrey S. Girnik*

кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

*Александр Леонидович Федянин**Alexander L. Fedyanin*

кандидат технических наук, заведующий кафедрой электрооборудование  
и автоматизация технологических процессов, Северский технологический  
институт — филиал федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Национальный  
исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северск, Россия

### Актуальность

В современном железнодорожном транспорте имеют место случаи преждевременного выхода из строя тяговых двигателей электровозов. Причиной данных отказов электрических машин может быть влияние таких факторов, как ускоренное старение или пробой электроизоляционных материалов из-за электрических перенапряжений, воздействие механических перегрузок, нарушение режимов эксплуатации локомотивного оборудования при повышенных нагрузках или несвоевременных переключениях в схеме электрического соединения тяговых двигателей. Такие факторы приводят к снижению гарантированного срока службы тяговых электрических машин и, как следствие, к их внеплановому ремонту с соответствующими финансовыми затратами. В некоторых случаях локомотивное оборудование непригодно для ремонта и требует полной замены.

### Цель исследования

Исследовать влияние коммутационных процессов в схеме электрического соединения тяговых двигателей на их возможный выход из строя при нарушении условий эксплуатации с повышенной механической нагрузкой и несвоевременном переключении способа их включения в электрическую цепь.

### Методы исследования

Для моделирования и анализа динамических изменений механического вращающего момента и электрических напряжений тяговых электродвигателей при переключении схемы соединения разработана имитационная модель схемы включения тяговых двигателей в программной среде MatLab Simulink.

### Ключевые слова

двигатель, тяговый, электровоз, коммутация, перенапряжение, перегрузка, ресурс, изоляция



### Результаты

Рассмотрено влияние изменения переходного электрического сопротивления контактного промежутка переключающей аппаратуры на ход работы тягового двигателя электровоза в кратковременный момент переключения схемы соединения при нарушении условий эксплуатации электровоза. Предложены рекомендации по снижению количества отказов тяговых электродвигателей.

**Для цитирования:** Гирник А. С., Федянин А. Л. Исследование электромеханических перегрузок тяговых двигателей электровозов при нарушении режима эксплуатации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 19-33. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-19-33>.

Original article

## INVESTIGATION OF ELECTRO-MECHANICAL OVERLOADS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES TRACTION ENGINES IN CASE OF OPERATING CONDITIONS VIOLATION

### Relevance

In modern railway transport, there are cases of premature failure of traction motors of electric locomotives. The cause of these failures of electrical machines may be the influence of such factors as accelerated aging or breakdown of electrical insulating materials due to electrical overvoltages, the effects of mechanical overloads, violation of operating modes of locomotive equipment under increased loads or untimely switching in the electrical connection circuit of traction motors. Such factors lead to a decrease in the guaranteed service life of traction electric machines and, as a consequence, to their unscheduled repairs with corresponding financial costs. In some cases, locomotive equipment is beyond repair and requires complete replacement.

### Aim of research

To study the influence of switching processes in the electrical connection circuit of traction motors on their possible failure in the event of violation of operating conditions with increased mechanical load and untimely switching of the method of their inclusion in the electrical circuit.

### Research methods

For modeling and analysis of dynamic changes in the mechanical torque and electrical voltages of traction motors during a connection circuit switching, the simulation model has been developed in the MatLab Simulink software environment.

### Results

The influence of changes in the transient electrical resistance of the contact gap of the switching equipment on the operation of the electric locomotive traction motor at a short-term moment of switching the connection circuit in case of violation of the operating conditions of the electric locomotive is considered. Recommendations were proposed to reduce the number of failures of traction motors.

### Keywords

engine, traction, locomotive, switching, overvoltage, overload, resource, insulation, contactor, gap

**For citation:** Girnuk A. S., Fedyanin A. L. Issledovaniye elektromekhanicheskikh peregruzok tyagovykh dvigateley elektrovozov pri narushenii rezhima ekspluatatsii [Investigation of Electro-Mechanical Overloads of Electric Locomotives Traction Engines in Case of Operating Conditions Violation]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 19-33 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-19-33>.

## Введение

Подвижной состав с электровозной тягой подвержен выходу из строя из-за отказа тяговых электродвигателей по причине влияния таких внешних факторов, как механические перегрузки, температура, влажность, вибрации, электрические перенапряжения. К числу неисправностей можно отнести старение пазовой изоляции и, как следствие, междувитковые электрические замыкания обмоток и их замыкание на корпус двигателя, износ подшипников и другие механические повреждения. В соответствии со статистикой выхода из строя тягового электрооборудования подвижного состава [1], в период с 2017 г. по 2022 г. при эксплуатации подвижного состава в восточных регионах России, на примере использования тягового двигателя серии NB-514В, количество отказов двигателей из-за ухудшения свойств изоляции обмотки якоря может составлять до 25 % от общего числа, а из-за изоляции обмоток основных полюсов до 29 %. Также подобные повреждения тяговых двигателей могут иметь место на примере эксплуатации локомотивов серии 18Е [2]. Количество отказов тяговых двигателей за последние годы из-за пробоя изоляции по причине влияния влаги, температуры и механических воздействий может составлять до 47 % [3]. Кроме того, отказы тяговых машин могут составлять около 53 % от общего числа отказов всего электрооборудования локомотивов [4]. Виной преждевременных отказов тяговых двигателей также может быть и нарушение режима эксплуатации локомотивного оборудования.

Данная работа — это продолжение уже ранее выполненных исследований влияния особенностей коммутации и переходных электромеханических процессов на вероятность отказа тяговых двигателей [5], т.е. расширенный вариант исследования кратковременных

режимов коммутации в схеме электрического питания тяговых двигателей с учётом возможного нарушения режима эксплуатации электровозов при некоторой перегрузке состава по массе перевозимого груза с движением на подъём, а также при ошибочно несвоевременном переключении схемы включения тяговых электрических машин.

Актуальность предыдущих исследований была обусловлена вероятными случаями выхода из строя тяговых электродвигателей электровозов из-за таких негативных факторов, как особенность горения дуги в контактной промежуточной электрических контакторов, используемых для переключения электродвигателей из одной схемы в другую. При этом схема электрического соединения тяговых двигателей у большинства электровозов может быть с последовательным включением электрических машин, с параллельным, так и со смешанным включением с возможностью переключения данных типов соединения из одного в другой в процессе движения локомотива. Переключение способа электрического соединения группы двигателей может делаться для усиления тяги, например, при движении на подъём. Сами тяговые электрические машины электровозов получают электрическое питание от железнодорожной контактной сети через специальную коммутационную аппаратуру (контакторы). Однозначно можно сказать, что процесс возникновения электрической дуги в промежуточной между контактами переключающей аппаратуры влияет на характер переходных процессов в тяговых двигателях [5]. Это может приводить к различным неисправностям электрических машин на борту электровоза, например, серии 2ЭС6 или 2ЭС4К. Сам процесс образования электрической дуги достаточно сильно зависит от характеристики изменения во времени электрического

сопротивления в воздушном промежутке между силовыми электрическими контактами [5].

Кроме того, следует отметить, что в процессе переключения схемы соединения тяговых двигателей могут иметь место механические перегрузки на сами электрические машины [5]. Но особенно это может быть опасным в случаях, когда тяговые двигатели работают сверхноминимального режима при нарушении допустимых условий эксплуатации. Например, при движении подвижного состава на подъём с некоторой перегрузкой по тяговому усилию из-за увеличенной массы перевозимого груза и поздним переключением схемы включения, т.е. например, когда подвижной состав уже начал движение на подъём, а схема соединения двигателей переключена с последовательного соединения на параллельное для увеличения тяги с опозданием, только через некоторое время.

При движении на подъём появляется дополнительная нагрузка на локомотив, так как в этом случае имеет место составляющая силы тяжести всего подвижного состава (скатывающая сила), которая направлена против движения. При таких условиях может иметь место преждевременный износ как колёсной пары, так и самих тяговых двигателей. Также несвоевременное переключение схемы соединения тяговых двигателей может способствовать буксованию колёсной пары при движении на подъём, так как в этом случае необходимый тяговой момент достигнет своей величины с опозданием.

Несмотря на то, что проблема выхода из строя тяговых машин электровозов в некоторых аспектах частично уже исследовалась [1–5], необходимо провести более полный анализ и более детальные исследования влияния таких факторов, как снижение ресурса изоляции под воздействием электрических перенапряжений, влияние механических перегрузок.

Далее необходимо разработать рекомендации по внедрению мероприятий для контроля состояния тягового электрооборудования, а также для снижения количества преждевременных отказов тяговых машин и таким образом внести дополнительный вклад в развитие данной области.

### **Исследование коммутации при кратковременных переключениях схемы соединения**

В работе [5] была использована имитационная модель электрической схемы при переключении 2-х тяговых двигателей ЭДП810 электровозов 2ЭС6 «Синара» и 2ЭС4К «Дончак» с последовательного соединения электрических машин на параллельное. При этом питание обмоток возбуждения было независимым. Исследования, проведённые в [5], учитывают особенности схемы соединения тяговых двигателей с независимым возбуждением. Но следует учитывать, что в различных модификациях электровозов схемы соединения двигателей могут отличаться.

В данной статье исследования дополняют уже сделанные в [5], тем самым позволяют получить более полную картину состояния тяговых двигателей на электровозах и отличаются от предыдущих исследований следующим.

- Изменена схема соединения тяговых электродвигателей на смешанное последовательно-параллельное с последующим переключением на параллельное (рисунок 1).
- Число двигателей увеличено до 4 с групповым включением, которое включает в себя 2 параллельных цепи, в каждой из которой находится 2 последовательно соединённых двигателя с одинаковыми параметрами. Соединение может изменяться на полное параллельное для всех 4-х машин (рисунок 1).

- Соединение обмоток возбуждения — последовательное, что допускается в работе двигателя ЭДП810 в соответствии с техническими условиями эксплуатации, т.е. питание этих обмоток осуществляется основным током обмотки якоря.

- Учтена вероятность нарушения режима эксплуатации электровоза при движении локомотива в наклонном направлении вверх и увеличенной массе подвижного состава, что может привести к увеличению механической нагрузки со стороны колёсной пары на 30 % по отношению к штатному режиму.

- Учтена вероятность ошибки управления локомотивом, когда при повышенной нагрузке со стороны колёсной пары схема электрического соединения тяговых двигателей переключается со смешанного на параллельное с опозданием (рисунок 1).

На рисунке 1 показаны варианты электрического соединения тяговых двигателей электровозов при переключении из смешанного последовательно-параллельного соединения (а) в полное параллельное соединение (б) или наоборот. При этом принято последовательное соединение обмоток возбуждения у всех двигателей.

На рисунке 1 приведены следующие обозначения:

- $M1-M4$  — тяговые двигатели;
- $K1-K3$  — силовые контакторы;
- $U$  — напряжение питания.

Кроме того, для описания выше приведённых схем (рисунок 1) системой математических уравнений электромеханического баланса, учтены следующие базовые выражения из работы [5].

Ток, протекающий через контактный промежуток контактора в процессе гашения электрической дуги, описывается следующим уравнением:

$$i = I_0 [1 - (t/T)^n], \quad (1)$$

где  $I_0$  — начальное значение тока;

$t$  — время;

$T$  — время гашения дуги;

$n$  — число, соответствующее типу контактора. В данном случае равно  $n = 4$  для используемых контакторов с закрытым дугогасительным устройством.

Также уравнение баланса потенциалов в общем виде для цепи включения тяговых электродвигателей описывается в следующем виде:

$$U = E + i \cdot r + U_d + L \cdot \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

где  $U$  — напряжение питания;

$E$  — ЭДС двигателей;

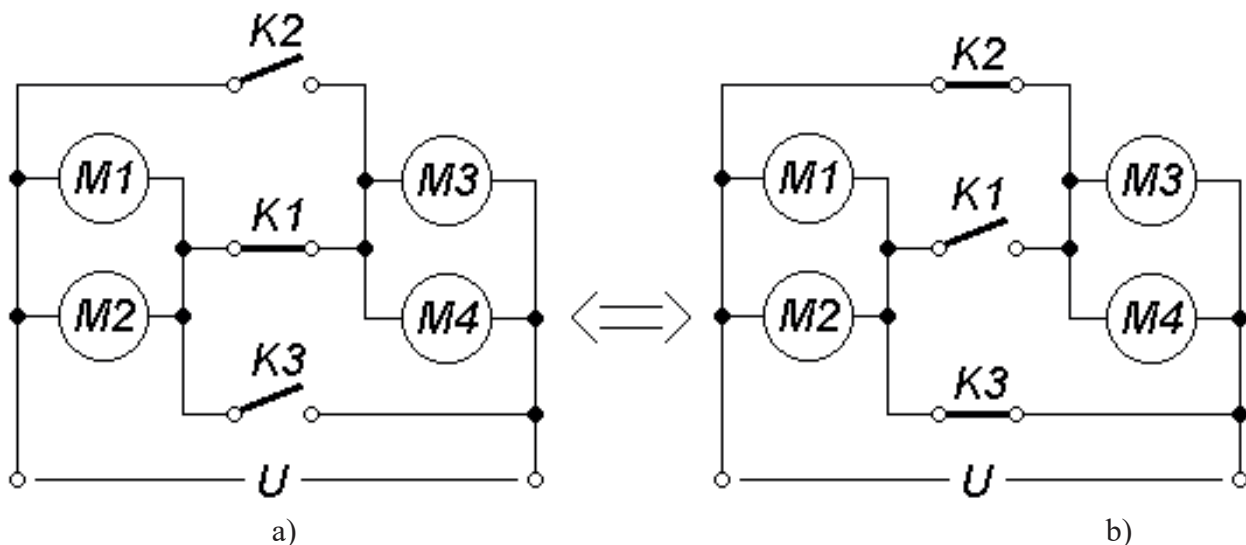


Рисунок 1. Варианты электрического соединения тяговых двигателей

Figure 1. Electrical connection versions for traction motors



$r$  — суммарное активное сопротивление всех двигателей, включая обмотку якоря и последовательную обмотку возбуждения;

$U_d$  — напряжение дуги;

$L$  — суммарная индуктивность всех двигателей, включая обмотку якоря и последовательную обмотку возбуждения.

Уравнение ЭДС описывается следующим выражением:

$$E = C_\omega \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3)$$

где  $C_\omega$  — конструктивная постоянная;

$\Phi$  — магнитный поток;

$\omega$  — скорость вращения якоря.

Уравнение вращающего момента имеет вид:

$$T = C_M \cdot \Phi \cdot i, \quad (4)$$

где  $C_M$  — механическая постоянная, зависящая от конструкции двигателя.

Магнитный поток зависит от общего электрического тока, так как включение обмотки возбуждения последовательное, поэтому его можно описать следующим уравнением:

$$\Phi = C_\Phi \cdot i, \quad (5)$$

где  $C_\Phi$  — постоянная, зависящая от геометрии магнитной цепи и её материалов.

Далее после подстановки (1) в (2), (4) и (5), а также (5) в (3) получена новая система уравнений электромеханического баланса:

$$\begin{cases} U = E + I_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{T}\right)^n\right] \cdot r + U_d + L \cdot I_0 \cdot n \cdot \frac{t^{n-1}}{T^n} \\ E = C_\omega \cdot C_\Phi \cdot I_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{T}\right)^n\right] \cdot \omega \\ T = C_M \cdot C_\Phi \cdot I_0^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{T}\right)^{n-2}\right] \\ T - T_L = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $T_L$  — механический момент нагрузки на валу машины;

$J$  — механический момент инерции двигателя.

Полученная математическая модель использована для дальнейшей разработки имитационной модели всей электрической схемы соединения группы из

4-х тяговых двигателей с силовыми контакторами.

В настоящее время прогрессивные методы моделирования дают возможность использовать программы, с помощью которых можно реально работающее электрооборудование представить в виде виртуальных функциональных модулей. При разработке имитационной модели для наших исследований был применён программный продукт MatLab Simulink.

В данной статье предложена имитационная модель, которая позволяет исследовать влияние коммутационных переключений, а также механических перегрузок на работу тяговых двигателей электровозов при числе машин, равном 4, с изменённой групповой схемой включения. При этом считается, что одна пара двигателей приводит в движение одну колёсную пару локомотива, а вторая пара двигателей приводит в движение другую колёсную пару, расположенную на противоположном конце электровоза. Таким образом, обеспечивается как симметричное электрическое включение, так и симметричное расположение машин на борту локомотива.

По рекомендациям [6] была построена имитационная модель (рисунок 2), которая состоит из отдельных и связанных между собой с помощью информационных каналов виртуальных элементов библиотеки Simulink. В модели присутствуют 4 электрические машины DC Machine 1-4. С помощью этой модели можно исследовать режимы работы двигателей при различных значениях питающего напряжения, которое выдаётся от источника DCV, а также при различных способах соединения электрических машин. Например, при смешанном последовательно-параллельном и параллельном включениях двигателей. Способ соединения может меняться посредством универсальных контакторов K1,

K2 и K3, которые могут работать как на размыкание, так и на замыкание. В процессе моделирования можно задавать нужный уровень механической нагрузки на вал тягового двигателя. Датчики тока Current1 и Current2 измеряют электрические токи в цепях якоря двигателей DC Machine 1 и DC Machine 2, далее измеренные величины токов направляются для отображения на осциллографы Main-Current1-2. Следует отметить, что токовое состояние другой пары машин DC Machine 3 и DC Machine 4 аналогичное. Поэтому делать измерения токов у них смысла нет. Это обусловлено тем, что все двигатели в схеме однотипные с одинаковыми сопротивлениями обмоток, и в случае смешанного последовательно-параллельного соединения пар машин

DC Machine 1–2 с другой парой DC Machine 3–4 по их общей внешней последовательной цепи протекает общий одинаковый ток, который в каждой паре двигателей распределяется равномерно на каждую отдельную электрическую машину в соответствии с общеизвестным законом Кирхгофа [7]. В случае параллельного соединения всех 4-х двигателей общий ток внешней цепи равномерно разделяется по всем 4-м машинам, так как их параметры у всех одинаковые. Датчики потенциалов Voltage1–2 измеряют напряжения на зажимах питания машин DC Machine 1–2, далее величина измеренных напряжений выводится для отображения на осциллографы Machine-Voltage1–2.

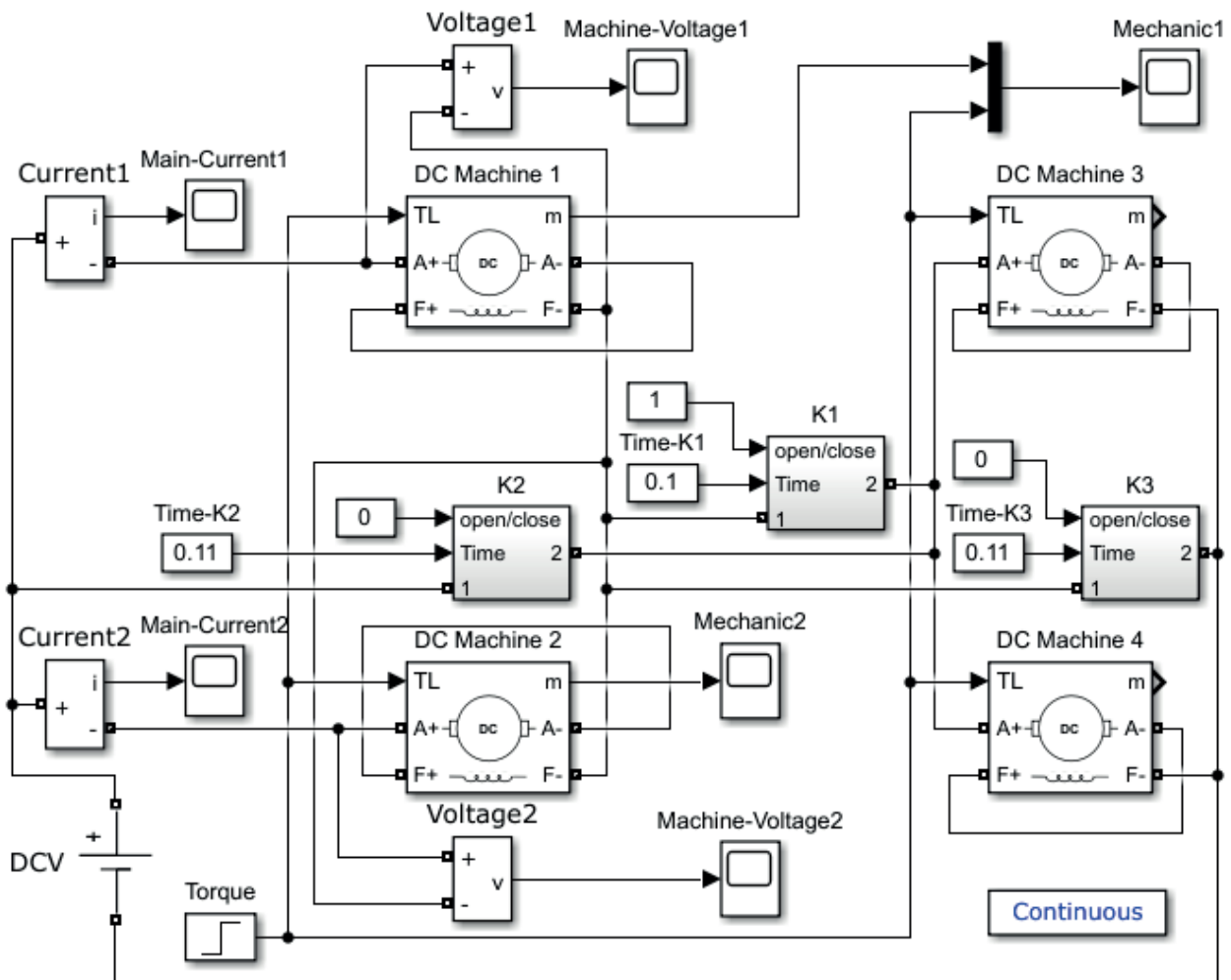


Рисунок 2. Имитационная модель группового электрического соединения двигателей

Figure 2. Simulation model of group electrical connection of motors



Последовательность работы контакторов К1, К2 и К3 следующая. При переключении соединения машин со смешанного на параллельное сначала размыкается контактор К1, а затем включаются контакторы К2 и К3. При переключении машин с параллельного соединения на смешанное сначала размыкаются контакторы К2 и К3, а затем включается К1.

Внутреннее устройство модели одного из универсальных контакторов К1–К3 показано на рисунке 3. Для подключения к основной силовой электрической цепи служат выводы 1 и 2. Для работы контактора на размыкание необходимо подать на его вход «open/close» управляющий сигнал равный 1, при этом включится коммутатор Switch-opened1, через который основной ток будет пропущен к силовому контактору Contactor-closed, работающему только на выключение. При управляющем сигнале, равном 0, основной силовой ток будет пропущен через коммутатор Switch-opened2 к силовому контактору Contactor-opened, работающему только на включение.

В данной математической модели так же, как в [5], учтена специфика вольт-амперной характеристики коммутационной аппаратуры. Это используется в силовом контакторе Contactor-closed,

входящем в состав универсальных переключающих ключей К1–К3. И именно в данном силовом контакторе Contactor-closed образуется дуга между контактами в момент размыкания [5]. Этот элемент позволяет задавать определённую характеристику изменения во времени электрического сопротивления горячей дуги между контактами. Как уже было описано в [5], это достигается за счёт построения последовательной цепи сопротивлений, которые по умолчанию зашунтированы накоротко и последовательно включаются в общую цепь через определённый интервал времени (рисунок 4). Если менять этот интервал, то можно настроить любой период коммутационного процесса, также, задав конкретную необходимую величину сопротивления каждой ступени цепи, можно выстроить любую скорость нарастания полного сопротивления всей цепи в течение коммутации. Таким образом моделируется изменение электрического сопротивления между контактами переключающей аппаратуры. Как правило, данное изменение переходного сопротивления представляет собой характеристику, которая сначала медленно возрастает во времени, затем ускоряется, и далее рост сопротивления увеличивается лавиноподобно.

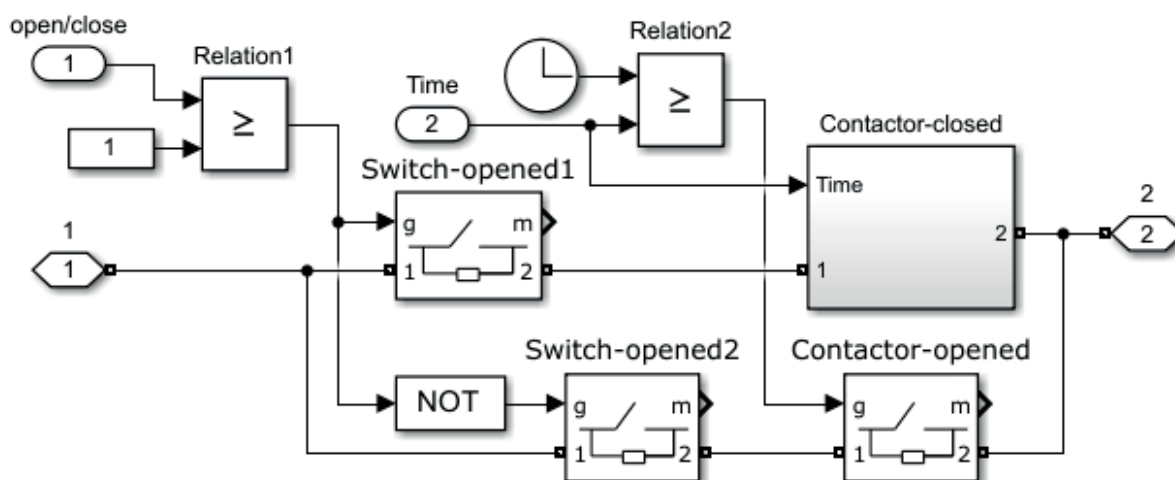


Рисунок 3. Модель универсального контактора

Figure 3. Universal contactor model

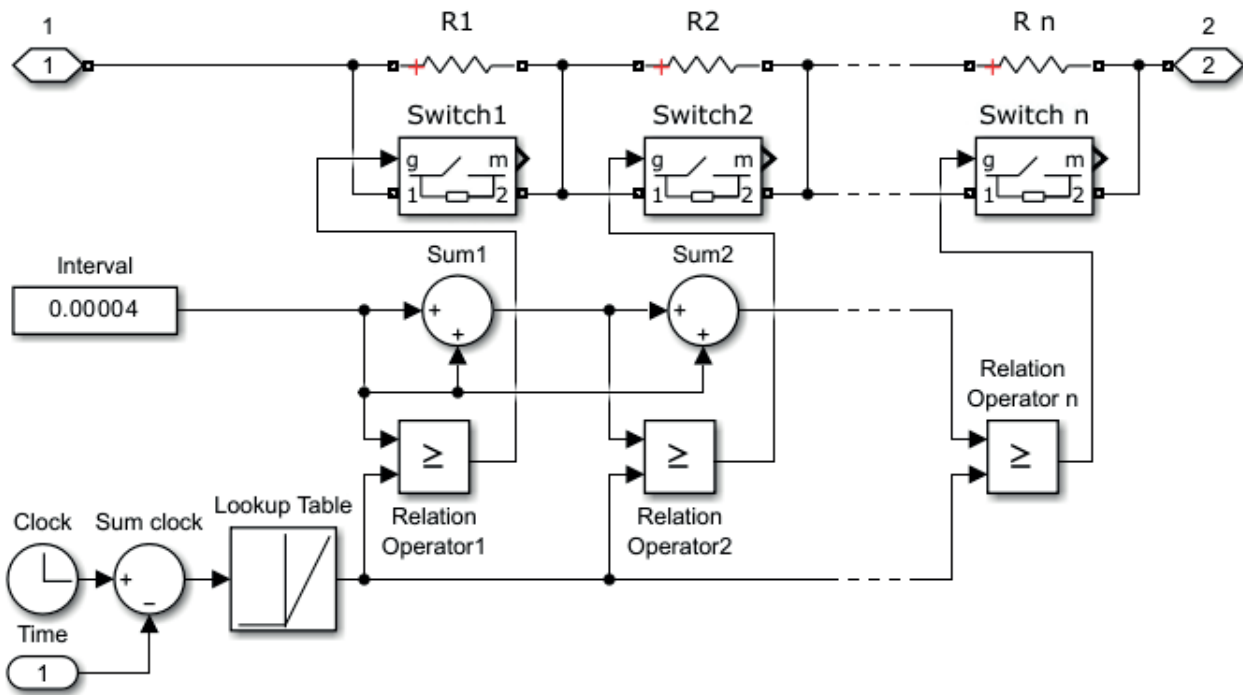


Рисунок 4. Модель контактора с участками сопротивлений электродуги

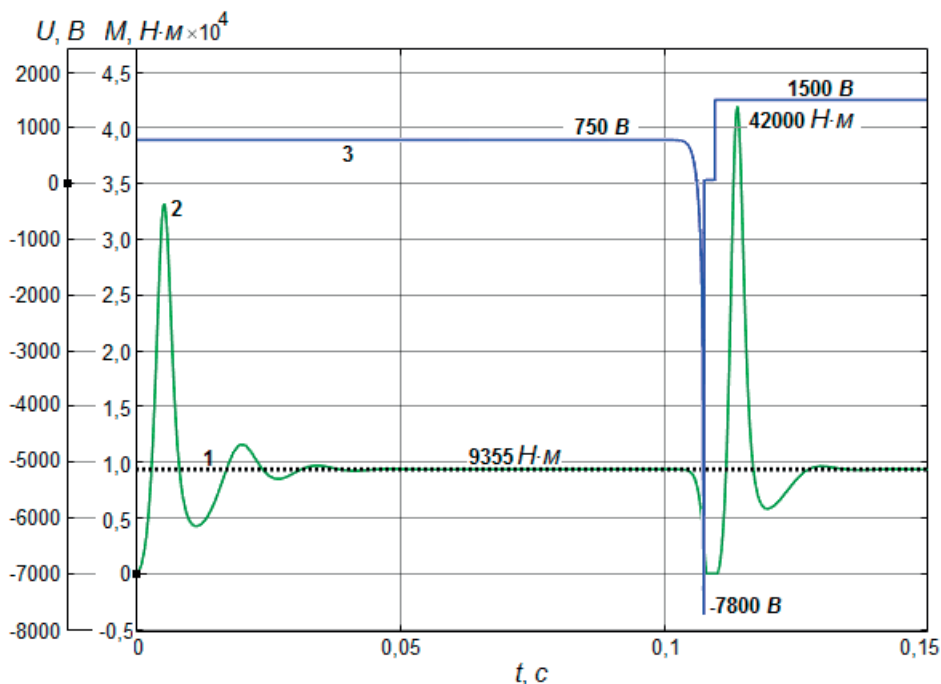
Figure 4. Model of a contactor with electric arc resistance sections

С помощью такой математической модели получены результаты исследований коммутационных перенапряжений и механических перегрузок тягового двигателя ЭДП-810, применяемого на электровозах серии 2ЭС6 «Синара» и 2ЭС4К «Дончак» при возможных нарушениях режима эксплуатации. Номинальное рабочее напряжение двигателя 1500 В, а его номинальный вращающий механический момент 9355 Н·м. Максимальное напряжение на выводах двигателя 4000 В.

На рисунке 5 показана диаграмма изменения механического момента и электрического напряжения на контактных зажимах тягового двигателя при номинальной нагрузке на его валу со стороны колёсной пары, учитывая, что электровоз движется в горизонтальном направлении и приводит в движение железнодорожный состав номинальной массы. Кривая 1 показывает механическую нагрузку на колёсную пару электровоза и соответственно на вал двигателя. Кривая 2 — это развиваемый дви-

гателем вращающий момент. Кривая 3 — это электрическое напряжение. В начале моделирования (0,005 с) показан всплеск пускового момента (кривая 2), далее двигатель входит в номинальный режим. В 0,11 с происходит переключение схемы включения двигателей со смешанного последовательно-параллельного на параллельное соединение. При этом наблюдается некоторое увеличение вращающего момента до 42000 Н·м. Электрическое перенапряжение в данный момент достигает — 7800 В, что в 1,95 раза по модулю превышает максимальное напряжение для двигателя 4000 В.

На рисунке 6 показана диаграмма с такими же кривыми (1, 2 и 3), но для случая, когда имеет место нарушение режима эксплуатации, т.е. со стороны колёсной пары присутствует механический момент нагрузки, на 30 % превышающий номинальное значение 9355 Н·м, т.е. 12160 Н·м когда подвижной состав уже движется в горной местности под углом вверх с перегрузкой по массе, а



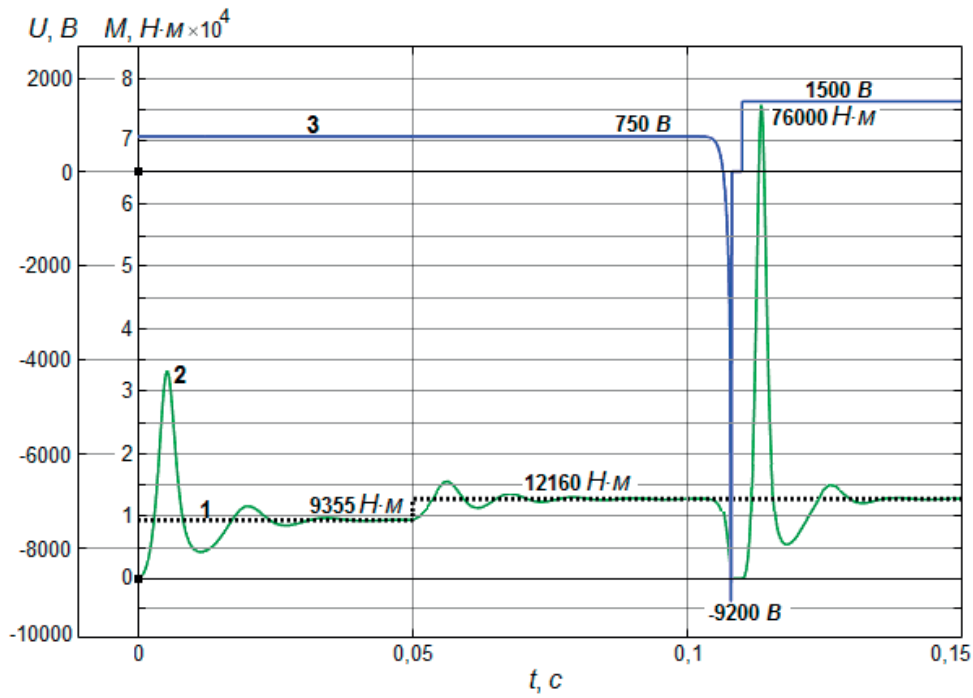
**Рисунок 5.** Изменение механического момента и напряжения двигателя при номинальной нагрузке колёсных пар локомотива

**Figure 5.** Changes in the mechanical torque and voltage of the engine at the rated load of the locomotive wheel sets

также переключение схемы включения двигателей на параллельное соединение происходит с опозданием. Повышение нагрузки показано с момента времени 0,05 с (кривая 1). При этом в момент коммутации (начиная с 0,1 с) наблюдается всплеск механического вращающего момента двигателя до 76000 Н·м, что в 8 раз превышает номинальное значение. Кроме того, это значение в 2,3 раза превышает пусковой момент при нормальных условиях для момента времени 0,008 с со значением 33000 Н·м (кривая 2). Электрическое перенапряжение достигает — 9200 В, что также в 2,3 раза по модулю превышает максимально допустимое напряжение двигателя 4000 В.

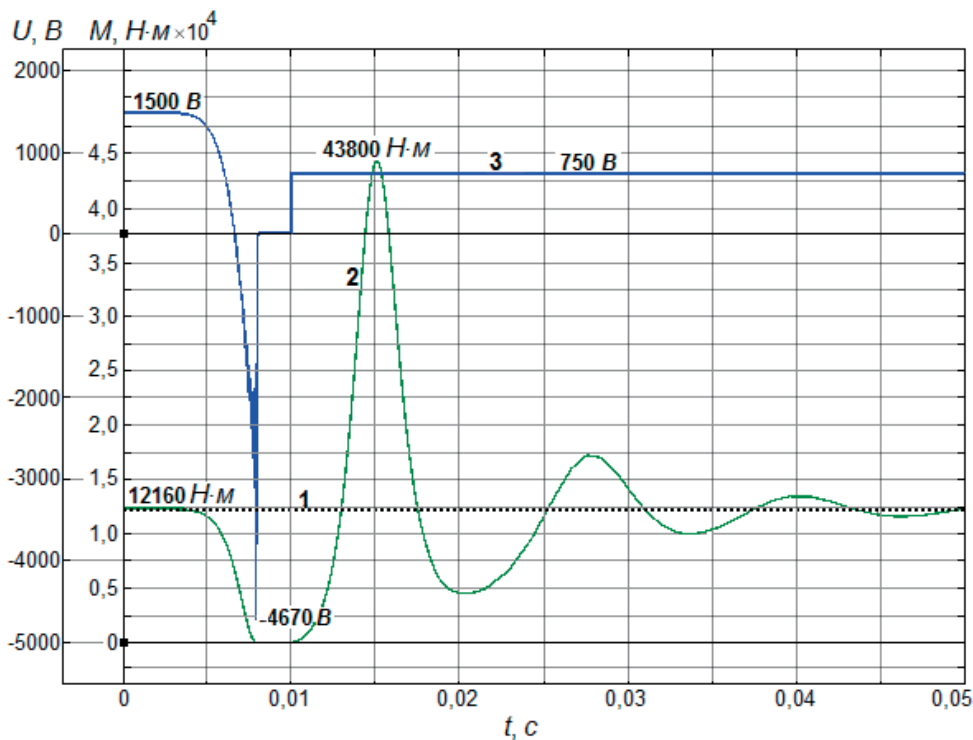
На рисунке 7 показана диаграмма с подобными кривыми (1, 2 и 3), но для случая, когда при нарушении режима эксплуатации с повышенным моментом нагрузки в 30 %, ещё не доехав до горизонтальной плоскости движения, уже

преждевременно происходит переключение схемы соединения двигателей с параллельного на последовательное. В начальный момент времени происходит переключение схемы соединения машин, при котором сначала выключаются универсальные ключи К2 и К3 (рисунок 2), а затем в момент времени 0,01 с включается ключ К1. При этом в момент начального переключения наблюдается всплеск электрического перенапряжения до -4670 В, что в данном случае уже меньше, чем при переключении на параллельное соединение. Далее после включения машин на последовательную схему соединения наблюдается всплеск вращающего момента до 43800 Н·м, что также меньше, чем на предыдущем графике из рисунка 6. После полного включения двигателей на последовательное соединение можно также заметить некоторые колебания механического момента с затуханием к моменту времени 0,05 с.



**Рисунок 6.** Изменение момента и напряжения двигателя при нарушении условий эксплуатации с переключением на параллельное соединение

**Figure 6.** Change of motor torque and voltage in case of violation of operating conditions with switching to parallel connection



**Рисунок 7.** Изменение момента и напряжения двигателя при нарушении условий эксплуатации с переключением на последовательное соединение

**Figure 7.** Changing the motor torque and voltage in case of violation of operating conditions with switching to a serial connection

Вышеуказанные электрические перенапряжения могут негативно влиять на изоляционные материалы, используемые в двигателе и, соответственно, приводить к электрическому пробоям. Например, при использовании в качестве изоляционного материала Imidoflex-292 его электрическое напряжение пробоя составляет 8 кВ [8], в то время как фактическое перенапряжение в момент коммутации двигателей при повышенной нагрузке может достигать 9,2 кВ, что отрицательно сказывается на работоспособности изоляции. Механические перегрузки могут постепенно приводить к механическому износу элементов конструкции машины.

### Заключение

Подводя итог исследований, можно сказать, что существующие возможные нарушения условий эксплуатации электровозов при повышенных механических нагрузках на валу тяговых двигателей со стороны колёсных пар с учётом особенностей их коммутации, а также при несвоевременном переключении схемы соединения машин могут приводить к сокращению срока службы данных электродвигателей. Кроме уже проведённых ранее исследований [5], можно сделать вывод также о том, что данные тяжёлые режимы работы тяговых двигателей электровозов имеют место и для схемы их смешанного последовательно-параллельного соединения в группе с последовательным включением обмотки возбуждения. Учитывая, что в электродвигателях опорным элементом конструкции для вращающегося вала являются подшипники, при повышении нагрузки на последние, например как на рисунке 5, срок их службы может сокращаться [9]. Имеющие место электрические перенапряжения в момент переключения схемы соединения двигателей со смешанного на параллельное (рисунок 6) также могут

сокращать срок службы электрической изоляции двигателей [1–4, 8]. Это, в свою очередь, снижает рекомендованный срок службы тягового электрооборудования, который должен составлять 20–30 лет [10].

Вариантом увеличения долговечности изоляции может быть её сушка инфракрасным облучением [4]. При этом напряжение пробоя увеличивается на 45 %. Степень отверждения образцов после обработки тепловым излучением на 30 % выше по сравнению с конвекционными печами. Интенсивность ИК-излучения обеспечивает степень отверждения 97,6 при прогреве в течение 2 ч по сравнению со степенью отверждения 78,0 при прогреве в печи в течение 8 ч. При этом разница в растворимой части примерно в 10 раз больше при ИК-нагреве. Оптимизация геометрии пазов электрической машины с целью снижения тепловых и электростатических нагрузок на изоляцию также способствует продлению её ресурса [8].

Одним из возможных способов снижения механических нагрузок на двигатели может служить, например, реостатное переключение электрических машин, что позволит снизить всплески механического момента за счёт снижения электрического тока за короткий интервал коммутации путём введения в цепь якоря двигателя электрического сопротивления.

В современном мире эксплуатируются различные модификации как электровозов, так и тяговых двигателей. Но в последнее время даётся предпочтение двигателям переменного тока с частотными преобразователями как более надёжным по сравнению с двигателями постоянного тока [11]. Например, асинхронный двигатель имеет меньшую стоимость и больший КПД, а также более надёжен ввиду отсутствия щёточно-коллекторного узла, у него больше удельная



мощность, чем у двигателя постоянного тока. Коллекторные двигатели постоянного тока могут иметь более высокое значение крутящего момента при низких скоростях, но требуют дополнительного обслуживания [11]. Двигатели постоянного тока до сих пор часто используются в Индийских железных дорогах, поэтому, например, там вопрос перехода на другой тип машин также актуален [11]. В целом, здесь можно сделать вывод о том, что переход на асинхронные тяговые двигатели переменного тока — это один из вариантов снижения отказов в будущем.

Также для своевременного предотвращения отказов тяговых машин, может быть, например, использование стратегий технического обслуживания, мониторинг состояния, прогнозирование отказов, диагностика различными методами с помощью датчиков [1]. Состояние тягового двигателя, в том числе нарушение его изоляции, можно фиксировать на основе токов утечки с помощью датчи-

ков тока [12]. Выход из строя подшипников можно диагностировать путем анализа характеристических частот датчика вибрации или датчика тока [9].

Стоит ещё отметить, что для решения ранее обозначенной проблемы с буксованием колёсной пары из-за несвоевременного переключения схемы электрического соединения тяговых двигателей можно воспользоваться рекомендациями по способам управления тяговыми машинами [13, 14].

### Выводы

Рассмотрено влияние изменения переходного электрического сопротивления контактного промежутка переключающей аппаратуры на ход работы тягового двигателя электровоза в кратковременный момент переключения схемы соединения при нарушении условий эксплуатации электровоза. Предложены рекомендации по снижению количества отказов тяговых электродвигателей.

### Список источников

1. Puzina E.Y., Khudonogov I.A., Dulsky E.Y. Zonal Peculiarities of Operating Traction Rolling Stock's Electrical Machines at the East Siberian Rail Road // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 456-460. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787153.
2. Mayisela M., Dorrell D. G. Application of Reliability-Centred Maintenance for DC Traction Motors — A Review // 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA). 2019. P. 450-455. DOI: 10.1109/RoboMech.2019.8704755.
3. Grachev V.V., Shrajber M.A. Thermo-mechanical Voltages in the Insulation of Traction Electric Machines of Locomotive // 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2131 042087. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042087.
4. Khudonogov A., Dulskiy E., Ivanov P. Basis for Local Methods of Insulation Hardening of Traction Rolling Stock Electrical Machines //

International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 692. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_12).

5. Girnik A. S., Fedyanin A.L., Kiselev A.V., Dorokhina E.S. A Study of the Dynamics of the Processes in Locomotive Traction Motors during Switching // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. Vol. 46, Issue 3. P. 240–245. DOI: 10.3103/S1052618817030062. EDN: XNCNQO.

6. Eklas Hossain. MATLAB and Simulink Crash Course for Engineers. 2022. 1st ed. ISBN : 978-3-030-89761-1.

7. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2002. 757 с. ISBN 5-06-004032-1.

8. Leonov A., Usacheva T., Lyapunov D., Voronina N., Galtseva O., Rogachev A.V. Improving the Heat Resistance of Polymer Electrical Insulation Systems for the Modernization of Induction Motors // Eurasian Physical Technical Journal. 2021. Vol. 18. No. 1 (35). DOI: 10.31489/2021No1/34-42. EDN: DALTRL.



9. Corne B., Vervisch B., Derammelaere S., Cruz S. M. A., Knockaert J., Desmet J. Single Point Outer Race Bearing Fault Severity Estimation Using Stator Current Measurements // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017. P. 1-7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8001869.

10. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

11. Ramya K.C., Ramani J.G., Sridevi A., Rai R.S., Shirley D.R.A. Analysis of the Different Types of Electric Motors Used in Electric Vehicles // E-Mobility. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85424-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85424-9_3).

12. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou Y. Online Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Motor Stator Insulation // 2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2010. P. 530-533, DOI: 10.1109/IPMHVC.2010.5958411.

13. Вильнин А. Д. Двухдвигательный частотно-управляемый тяговый электропривод подземного электровоза с эффективным управлением: дисс. ... канд. техн. наук / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). Томск, 2018. 178 л.

14. Арсентьев О.В., Баранов П.Р., Вильнин А.Д., Кладиев С.Н. Оценочные исследования тягового асинхронного электродвигателя с пониженным напряжением питания для рудничного электровоза // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 11. С. 126-138. EDN: ZXJPST.

## References

1. Puzina E.Y., Khudonogov I.A., Dulsky E.Y. Zonal Peculiarities of Operating Traction Rolling Stock's Electrical Machines at the East Siberian Rail Road. 2022 *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2022, pp. 456-460. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787153.

2. Mayisela M., Dorrell D. G. Application of Reliability-Centred Maintenance for DC Traction Motors — A Review. 2019 *Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, 2019, pp. 450-455. DOI: 10.1109/RoboMech.2019.8704755.

3. Grachev V.V., Shrajber M.A. Thermo-mechanical Voltages in the Insulation of Traction Electric Machines of Locomotive. 2021 *J. Phys.:*

*Conf. Ser.* 2131 042087. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042087.

4. Khudonogov A., Dulskiy E., Ivanov P. Basis for Local Methods of Insulation Hardening of Traction Rolling Stock Electrical Machines. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, Vol. 692. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_12).

5. Girnuk A.S., Fedyanin A.L., Kiselev A.V., Dorokhina E.S. A Study of the Dynamics of the Processes in Locomotive Traction Motors during Switching. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, Vol. 46, Issue 3, pp. 240–245. DOI: 10.3103/S1052618817030062. EDN: XNCNQO.

6. Eklas Hossain. *MATLAB and Simulink Crash Course for Engineers*. 2022. 1st ed. ISBN: 978-3-030-89761-1.

7. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of Electrical Machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 757 p. ISBN 5-06-004032-1.

8. Leonov A., Usacheva T., Lyapunov D., Voronina N., Galtseva O., Rogachev A.V. Improving the Heat Resistance of Polymer Electrical Insulation Systems for the Modernization of Induction Motors. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2021, Vol. 18, No. 1 (35), DOI: 10.31489/2021No1/34-42. EDN: DALTRL.

9. Corne B., Vervisch B., Derammelaere S., Cruz S. M. A., Knockaert J., Desmet J. Single Point Outer Race Bearing Fault Severity Estimation Using Stator Current Measurements. 2017 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, pp. 1-7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8001869.

10. GOST R 55364-2012. *Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [State Standard R 55364-2012. Electric Locomotives. General Technical Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 36 p.

11. Ramya K.C., Ramani J.G., Sridevi A., Rai R.S., Shirley D.R.A. Analysis of the Different Types of Electric Motors Used in Electric Vehicles. *E-Mobility. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*, Springer, Cham, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85424-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85424-9_3).

12. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou Y. Online Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Motor Stator Insulation. 2010 *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, 2010, pp. 530-533, DOI: 10.1109/IPMHVC.2010.5958411.

13. Vilnin A. D. *Dvukhdvigatel'nyi chastotno-upravlyaemyi tyagovyi elektroprivod podzemnogo elektrovoza s effektivnym upravleniem: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Double-Engine Frequency-Controlled Traction Electric Drive of an Underground Electric Locomotive with Effective Control: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet (TPU). Tomsk, 2018. 178 p.

14. Arsent'ev O.V., Baranov P.R., Vil'nin A.D., Kladiev S.N. Otsenochnye issledovaniya tyagovogo

asinkhronnogo elektrodvigatelya s ponizhennym napryazheniem pitaniya dlya rudnichnogo elektrovoza [Evaluation Studies of a Traction Asynchronous Electric Motor with Reduced Supply Voltage for a Mining Electric Locomotive]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Proceedings of the Tomsk Polytechnic University*, 2017, Vol. 328, No. 11, pp. 126-138. EDN: ZXJPST.

*Статья поступила в редакцию 16.01.2024; одобрена после рецензирования 13.02.2024; принята к публикации 19.02.2024.*

*The article was submitted 16.01.2024; approved after reviewing 13.02.2024; accepted for publication 19.02.2024.*

Научная статья

УДК 621.3.089

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-34-44

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Фарит Абдулганеевич Гизатуллин****Farit A. Gizatullin**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Алексей Юрьевич Демин****Aleksei Yu. Demin**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электронной инженерии,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

### Актуальность

Системы зажигания авиационных двигателей являются одним из основных элементов, определяющих надежность функционирования летательного аппарата в целом. Оценка и контроль эффективности работы таких систем необходимо осуществлять на этапах от разработки до эксплуатации, поэтому задача создания таких систем является очень актуальной.

### Цель исследования

Разработка новых структур и принципов функционирования цифровых измерителей параметров, характеризующих эффективность емкостных систем зажигания авиационных двигателей с полупроводниковыми свечами.

### Методы исследования

Рассмотрены вопросы построения и приведены разработанные аппаратные решения для цифровых измерителей параметров, характеризующих эффективность емкостных систем зажигания авиационных двигателей с полупроводниковыми свечами. Представлены структуры измерителей и временные диаграммы их работы, обсуждаются особенности использования датчиков тока и напряжения.

### Результаты

В статье представлены результаты разработки систем измерения параметров, характеризующих эффективность емкостных систем зажигания авиационных двигателей с полупроводниковыми свечами, — измерителя критерия воспламеняющей способности системы зажигания в виде функции параметров искровых разрядов в свечах и универсального измерителя длительности искровых разрядов, позво-

### Ключевые слова

емкостная система зажигания, полупроводниковая свеча, параметры искровых разрядов, цифровые измерители, критерий воспламеняющей способности, длительность искровых разрядов

ляющего измерять длительность разрядов колебательного и апериодического типов. Предложенные технические решения позволяют повысить качество и полноту оценки эффективности искровых разрядов в полупроводниковых свечах зажигания. Разработанные структуры относятся к классу систем с «жесткой» логикой работы и выполняют необходимые измерительные операции с максимальным быстродействием.

**Для цитирования:** Гизатуллин Ф. А., Демин А. Ю. Совершенствование средств контроля эффективности систем зажигания авиационных двигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 34-44. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-34-44>.

Original article

## IMPROVING TECHNIQUE FOR EFFICIENCY CONTROL OF AIRCRAFT ENGINE IGNITION SYSTEMS

### Relevance

Aircraft engine ignition systems are one of the main elements that determine the reliability of the operation of the aircraft as a whole. Evaluating and monitoring the performance of such systems must be carried out at stages from development to operation, so the task of creating such systems is very urgent.

### Aim of research

Development of new structures and principles of operation of digital meters of parameters characterizing the efficiency of capacitive ignition systems of aircraft engines with semiconductor spark plugs.

### Research methods

The issues of construction are considered and the developed hardware solutions for digital meters of parameters characterizing the efficiency of capacitive ignition systems of aircraft engines with semiconductor spark plugs are presented. The structures of the meters and timing diagrams of their operation are presented, and the features of using current and voltage sensors are discussed.

### Results

The article presents the results of the development of measuring systems for parameters characterizing the efficiency of capacitive ignition systems of aircraft engines with semiconductor spark plugs — a meter for the criterion of the ignition ability of the ignition system as a function of the parameters of spark discharges in spark plugs and a universal meter for the duration of spark discharges, which allows measuring the duration of discharges of oscillatory and aperiodic types. The proposed technical solutions make it possible to improve the quality and completeness of assessing the efficiency of spark discharges in semiconductor spark plugs. The developed structures belong to the class of systems with «hard» operating logic and perform the necessary measuring operations with maximum speed.

### Keywords

capacitive ignition system, semiconductor spark plug, spark discharge parameters, digital meters, ignition ability criterion, spark discharge duration

**For citation:** Gizatullin F. A., Demin A. Yu. Sovershenstvovaniye sredstv kontrolya effektivnosti sistem zazhiganiya aviatsionnykh dvigateley [Improving Technique for Efficiency Control of Aircraft Engine Ignition Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 34-44 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-34-44>.

## Введение

Контроль эффективности наиболее широко применяемых в настоящее время емкостных систем зажигания с полупроводниковыми свечами в той или иной системе осуществляется на всех этапах разработки, производства и эксплуатации. Контроль эффективности предполагает в том числе оценку общей работоспособности систем зажигания; оценку уровня энергии накопительных конденсаторов, пробивных напряжений коммутирующих разрядников и полупроводниковых свечей; оценку частоты следования разрядов в свечах; оценку энергетических параметров искровых разрядов; оценку воспламеняющей способности свечей [1–11]. Основными энергетическими параметрами полупроводниковых свечей являются: энергия и мощность разрядов, разрядные ток и напряжение, длительность двух стадий разрядов: подготовительной и искровой.

Воспламеняющая способность как основной показатель эффективности систем зажигания может оцениваться разными показателями, это может быть сам факт наличия или отсутствия воспламенения топливовоздушной смеси; воспламеняющую способность можно оценивать по величине площади пусковой характеристики камеры сгорания или пускового воспламенителя, по минимальному давлению среды, при котором возможно воспламенение, по максимальной скорости потока в камере сгорания, при котором происходит воспламенение [6]. Оценка воспламеняющей способности осложняется тем, что процессы воспламенения смеси и стабилизации пламени в устройствах горения взаимосвязаны. Важными показателями воспламеняющей способности систем зажигания являются: время задержки воспламенения смеси по отношению к моменту начала искробразования в свече, а также радиус

начального ядра пламени, образованного искровым разрядом [12, 13].

Значительный прогресс в оценке воспламеняющей способности емкостных систем зажигания был обусловлен разработкой обобщенной модели искрового воспламенения горючих смесей, позволившей установить критерий стабилизации пламени, аналогичный известному критерию Михельсона для стабилизации пламени плохо обтекаемыми телами, а также критерии воспламеняющей способности систем зажигания применительно к различным способам стабилизации пламени в камерах сгорания и пусковых воспламенителях, однозначно определяющие конечный результат процесса воспламенения. Установленные критерии являются функциями параметров системы зажигания, в том числе параметров искровых разрядов в свечах [14].

Особо остро вопросы контроля эффективности систем зажигания связаны с практикой разработки и доводки газотурбинных двигателей, для которых на этапах опытно-конструкторских работ не могут быть решены в полном объеме задачи по отработке систем запуска, систем воспламенения, предусмотренные отраслевыми стандартами. При выполнении доводочных работ по обеспечению требуемых пусковых характеристик камер сгорания, а также при возникновении проблем в эксплуатации по надежности запусков двигателей возникают вопросы контроля стабильности параметров систем зажигания, показателей их эффективности, связанных с характеристиками искровых разрядов в свечах.

Известно достаточно большое число научных работ, посвященных разработке методов и средств контроля систем зажигания и систем воспламенения в целом. Значительный вклад в решение этих вопросов внесли Центральный институт авиационного моторостроения, Уфимс-



кое научно-производственное предприятие «Молния», Уфимский государственный авиационный технический университет и другие. Для повышения эффективности контроля систем зажигания, сокращения времени и материальных затрат на доводку систем воспламенения газотурбинных двигателей решен ряд взаимосвязанных задач, в том числе разработаны цифровые измерители параметров быстротекущих импульсных разрядных процессов в полупроводниковых свечах: энергии и длительности разрядов, амплитуды разрядного тока, амплитуды высоковольтных импульсов напряжения на выходе агрегатов зажигания; разработаны средства контроля работоспособности систем зажигания. Решена задача создания различных вариантов измерительного комплекса, позволяющего одновременно регистрировать в цифровом формате перечисленные выше параметры [2, 3, 15]. Достаточно интенсивно ведутся научные работы по системам зажигания зарубежными исследователями в разных странах [16–18].

В статье представлены результаты разработки и область применения новых измерительных устройств, дополняю-

щих арсенал технических средств для оценки эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей.

### Технические средства для оценки эффективности систем зажигания авиационных двигателей

На рисунке 1 показана структурная схема разработанного цифрового измерителя упомянутого выше критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания на основе совершенствования измерителя критерия воспламеняющей способности одиночного искрового разряда в полупроводниковой свече, описанного в [19]. Названный критерий применительно к емкостным системам зажигания определяется соотношением [6, 14]:

$$K = \frac{W}{J_m \cdot t_u \cdot W_0 \cdot f}, \quad (1)$$

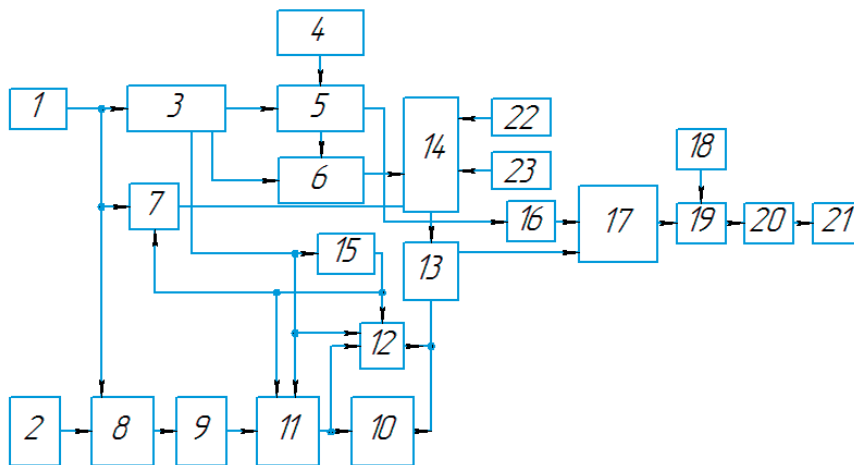
где  $W$  — энергия одиночного искрового разряда в свече;

$W_0$  — энергия накопительного конденсатора;

$J_m$  — амплитуда разрядного тока;

$t_u$  — длительность искровой стадии разрядов свече;

$f$  — частота следования разрядов в свече.



**Рисунок 1.** Структурная схема цифрового измерителя критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания

**Figure 1.** Block diagram of a digital ignition ability criterion meter for capacitive ignition systems

Измеритель содержит следующие блоки:

- 1 — датчик тока;
- 2 — датчик напряжения в свече;
- 3 — формирователь прямоугольного сигнала с длительностью, равной длительности искрового разряда, включающий двухуровневый компаратор, блок задержки среза импульсов, однопороговый компаратор, формирователь времени задержки сигнала, элемент 2И [3];
- 4 — генератор счетных импульсов;
- 5 — временной селектор;
- 6 — счетчик;
- 7 — пиковый детектор;
- 8 — перемножитель сигналов;
- 9 — инвертирующий усилитель;
- 10 — интегратор;
- 11 — первый аналоговый ключ;
- 12 — второй аналоговый ключ;
- 13 — полупроводниковый делитель;

14 — умножающий цифроаналоговый преобразователь;

15 — формирователь импульса задержки сброса;

16 — формирователь импульса задержки запуска аналого-цифрового преобразователя;

17 — аналого-цифровой преобразователь;

18 — таймер;

19 — регистр-зашелка;

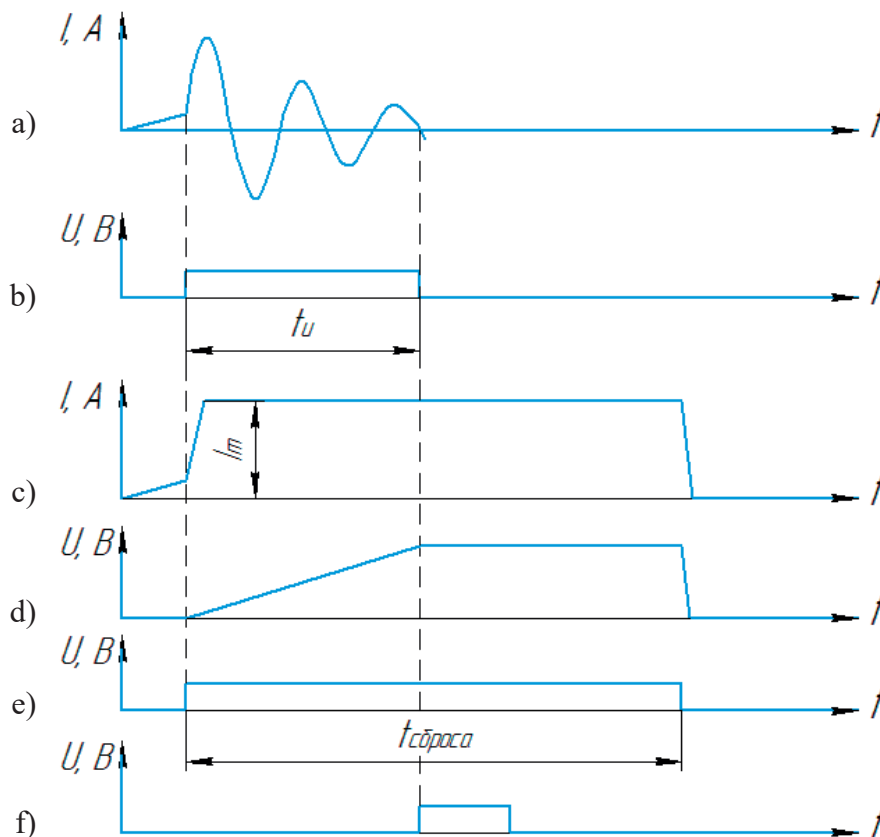
20 — дешифратор;

21 — индикаторы;

22 — блок ввода параметра  $W_0$ ;

23 — блок ввода параметра  $f$ .

На рисунке 2 приведены временные диаграммы, поясняющие логику работы функциональных блоков измерителя-измерителя длительности искровых разрядов, измерителя максимального значе-



**Рисунок 2.** Временные диаграммы работы измерителя критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания

**Figure 2.** Time diagrams of operation of the ignitability criterion meter for capacitive ignition systems

ния разрядного тока, измерителя энергии искровых разрядов.

Измерение длительности искровых разрядов производится следующим образом. Аналоговый сигнал в виде затухающей синусоиды (рисунок 2, *a*) длительностью  $t_{\text{и}}$  с датчика тока *1* поступает на вход формирователя прямоугольного сигнала, равного длительности разряда (рисунок 2, *b*). Процедура формирования прямоугольного сигнала длительностью  $t_{\text{и}}$  изложена в [3]. Во временном селекторе *5* происходит заполнение этого импульса импульсами с генератора счетных импульсов *4*. Таким образом, на вход счетчика *6* поступает определенное количество импульсов, пропорциональное длительности разряда  $t_{\text{и}}$ . Сброс счетчика осуществляется сигналом с формирователя *3* в момент начала разряда. Цифровой код счетчика *6* подается на умножающий цифроаналоговый преобразователь *14*.

Измерение амплитуды разрядного тока происходит так: аналоговый сигнал с датчика тока *1* поступает на пиковый детектор *7*, на выходе которого после прохождения первой полуволны тока устанавливается амплитудное значение тока (рисунок 2, *c*). Этот сигнал подается на умножающий цифроаналоговый преобразователь *14*, который умножает этот сигнал на цифровой код со счетчика *6*, соответствующий длительности разряда и на сигналы с выходов блоков *22* и *23*. Сброс пикового детектора осуществляется сигналом с формирователя импульса задержки сброса *15*.

Формирователь прямоугольного сигнала *3* осуществляет также синхронизацию работы измерителя энергии разряда, пикового детектора *7* и аналого-цифрового преобразователя *17* с момента прохождения искрового разряда в свече.

Основными блоками измерителя энергии разрядов являются перемножитель

сигналов *8*, инвертирующий усилитель *9*, интегратор *10*, первый *11* и второй *12* аналоговые ключи.

По переднему фронту сигнала с формирователя прямоугольного сигнала *3* осуществляется запуск интегратора *10* замыканием ключей *11* и *12*. Сигнал на выходе интегратора показан на рисунке 2, *d*. По этому же переднему фронту запускается формирователь импульса задержки сброса *15*, который создает прямоугольный импульс длительностью (рисунок 2, *e*). По срезу этого импульса осуществляются сброс и отключение интегратора размыканием ключей *11* и *12*, а также сброс пикового детектора *7*.

На первый вход полупроводникового делителя *13* поступает сигнал с измерителя энергии (рисунок 2, *d*). На второй вход поступает сигнал с умножающего цифро-аналогового преобразователя *14*, пропорциональный произведению  $J_m \cdot t_u \cdot W_0 \cdot f$ . Сигнал на выходе делителя *13* пропорционален измеряемой величине критерия воспламеняющей способности систем зажигания, определяемого по соотношению (1). Запуск аналого-цифрового преобразователя *17* осуществляется с помощью формирователя импульса задержки запуска *16*, сигнал на выходе которого формируется по срезу импульса на выходе формирователя прямоугольного сигнала *3* и показан на рисунке 2, *f*.

Поскольку частота следования разрядных импульсов в свече может колебаться в широких пределах, цифровая индикация величины критерия *K* для каждого разряда при большой частоте делает невозможным визуальное восприятие показаний измерителя. Поэтому считывание результата измерения из аналого-цифрового преобразователя на индикацию производится через строго определенные промежутки, регулируемые пользователем. Для этой цели используется таймер *18*, который разрешает

запись информации в регистры-защелки 19 только через заданные промежутки времени. Цифровой код с регистров-защелок дешифруется в семисегментный код дешифратором 20 и поступает на индикаторы 21.

Измерение длительности искровых разрядов в полупроводниковых свечах возможно с использованием датчика тока или датчика напряжения. Использование датчика тока предполагает двойное преобразование аналоговых сигналов в цифровые прямоугольные, что неизбежно связано с потерей точности измерения. Такой способ преобразования аналоговых сигналов в цифровые реализован в работе [3] и основан на использовании метода дискретного счета.

Использование датчика тока в измерителе длительности искровых разрядов в составе описанного выше измерителя критерия воспламеняющей способности системы зажигания является вынужденной мерой, так как датчик тока используется также в измерителе критерия К для измерения энергии разрядов и амплитуды разрядного тока.

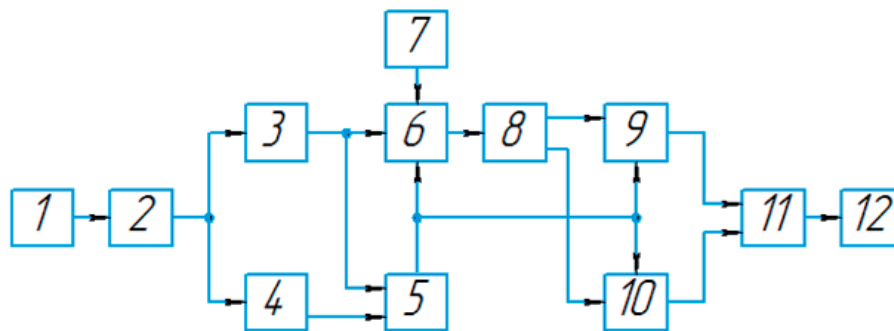
Применение датчика напряжения в искровом разряде для измерения длительности разряда является более предпочтительным из-за большой скорости уменьшения напряжения после пробоя полупроводниковой свечи, что упро-

щает структурную схему цифрового измерителя длительности разрядов в свече и обеспечивает повышенную точность измерений. Определенным ограничением в данном случае является технологическая сложность подключения датчика напряжения-делителя к рабочему торцу свечи в месте образования искровых разрядов. Это затруднение может быть преодолено с использованием специального переходного устройства, описанного в [20].

На рисунке 3 показана структурная схема разработанного универсального измерителя длительности искровых разрядов в полупроводниковых свечах, отличающегося использованием датчика напряжения вместо датчика тока и позволяющего регистрировать в цифровой форме длительность как колебательных, так и аperiodических разрядов в емкостных системах зажигания различных типов.

Обозначения на рисунке 3:

- 1 — переходное устройство для подключения датчика напряжения к свече;
- 2 — датчик напряжения в полупроводниковой свече;
- 3, 4 — двухпороговые дискриминаторы уровня;
- 5 — блок разности сигналов;
- 6 — временной селектор;
- 7 — генератор счетных импульсов;
- 8 — счетчик импульсов;



**Рисунок 3.** Структурная схема универсального цифрового измерителя длительности искровых разрядов в полупроводниковых свечах

**Figure 3.** Block diagram of a universal digital meter for the duration of spark discharges in semiconductor spark plugs

9 — промежуточное запоминающее устройство;

10 — блок управления памятью;

11 — блок памяти;

12 — блок цифровой индикации.

Временные диаграммы, поясняющие логику работы измерителя длительности искровых разрядов колебательного типа, показаны на рисунке 4, где обозначено:

$t_{nc}$  — длительность подготовительной стадии разрядов в полупроводниковой свече;

$t_u$  — длительность искровой стадии разрядов;

а) временная диаграмма напряжения в искровом разряде;

б) сигнал на выходе дискриминатора 3;

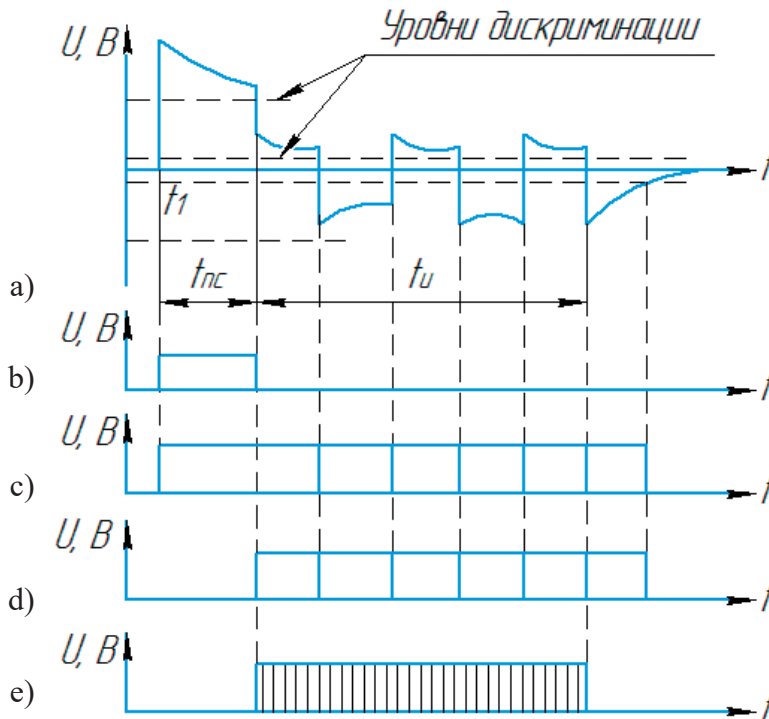
с) сигнал на выходе дискриминатора 4;

д) сигнал на выходе блока разности сигналов 5;

е) сигнал на выходе блока памяти 11.

Измеритель работает следующим образом: в момент времени на выходе дискриминаторов уровня 3 и 4 присутствует сигнал высокого уровня. Уровни

дискриминации выбираются таким образом, чтобы для дискриминатора 3 он был гарантированно большим напряжения искровой стадии разряда и гарантированно меньшим напряжения подготовительной стадии разряда. Дискриминатор 4 сравнивает сигнал с датчика напряжения в свече с уровнем, гарантированно меньшим напряжения искровой стадии разряда. Таким образом, дискриминатор 3 отслеживает подготовительную стадию разряда (рисунок 3, б), а дискриминатор 4 активен во всем промежутке времени разряда (рисунок 3, с). Блок разности сигналов 5 выполняет функцию вычитания двух описанных выше сигналов (рисунок 3, д). Эта разность больше длительности искрового разряда на длительность последнего импульса. Сигнал разности подается во временной селектор 6, в который поступают импульсы с генератора счетных импульсов 7. Счетчик 8 считает количество импульсов, соответствующее длительности прямоугольного сигнала.



**Рисунок 4.** Временные диаграммы работы универсального цифрового измерителя длительности применительно к искровым разрядам колебательного типа

**Figure 4.** Time diagrams of the operation of a universal digital duration meter in relation to oscillatory spark discharges



Сигнал на выходе блока разности 5 также является управляющим для промежуточного запоминающего устройства 9 и блока управления памятью 10. Промежуточное запоминающее устройство предназначено для временного хранения промежуточных результатов измерения. Блок управления памятью 10 через заданное число тактовых импульсов с выхода счетчика импульсов 8 генерирует импульс, при котором происходит запоминание итогового цифрового кода в блоке памяти 8. Таким образом, результатом измерения является цифровой код, пропорциональный длительности импульса блока разности сигналов без последнего импульса, что соответствует длительности искровой стадии разряда (рисунок 3, е). Блок памяти 8 хранит результаты измерений серии разрядов, следующих с определенной частотой, для последующей индикации в

блоке цифровой индикации 12 или дальнейшей обработки.

Измерение длительности аperiodических искровых разрядов осуществляется по аналогичному алгоритму и подробно описано в работе [18].

### Выводы

Представленные в статье разработки позволяют:

1. повысить качество и полноту оценки эффективности искровых разрядов в полупроводниковых свечах;
2. выполнить необходимые измерительные и расчетные операции с максимальным быстродействием, т.к. системы используют «жесткую» логику работы;
3. дополнить имеющийся арсенал технических средств диагностики емкостных систем зажигания на этапах разработки, производства и эксплуатации.

### Список источников

1. Пат. 2614388 РФ, МПК F 02 P 17/00. Устройство контроля емкостной системы зажигания двигателей летательных аппаратов / Е.В. Распопов, А.В. Краснов, А.Н. Мурысев, Л.В. Парфенов, У.Т. Кузбеков. 2015139142, Заявлено 14.09.2015; Оpubл. 17.03.2017. Бюл. № 9.
2. Гизатуллин Ф.А., Попов О.А. Измерительный комплекс для контроля параметров систем зажигания газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 1. С. 78-80.
3. Гизатуллин Ф.А., Зайцев В.Н., Великжанин И.А., Алимбеков Л.И. Методы и средства измерения параметров искровых разрядов в свечах зажигания газотурбинных двигателей // Измерительная техника. 1992. № 6. С. 10-11.
4. Гизатуллин Ф.А. Метод контроля эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 3. С. 82-84.
5. Гизатуллин Ф.А. Контроль эффективности систем зажигания газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. С. 197-200.
6. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
7. Пат. 2236019 РФ, МПК G 01 R 29/02. Устройство контроля работоспособности системы зажигания и настройки топливной аппаратуры газотурбинного двигателя / В.Х. Абдрахманов, Ф.А. Гизатуллин, К.В. Зиновьев. 2003118796/28, Заявлено 23.06.2003; Оpubл. 10.09.2004. Бюл. № 25.
8. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Чигвинцев В.А. Измерители пробивных напряжений искровых, плазменных и полупроводниковых свечей зажигания газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ, 2015. Т. 19, № 3 (69). С. 158-162.
9. Пат. 2338080 РФ, МПК F 02 C 7/26. Способ контроля емкостной системы зажигания реактивных газотурбинных двигателей / А.Н. Мурысев, А.В. Краснов, Е.В. Распопов, М.Н. Андреев. 2006105439/06, Заявлено 21.02.2006; Оpubл. 10.11.2008. Бюл. № 23.
10. Пат. 2463523 РФ, МПК F 23 Q 23/00. Способ контроля емкостной системы зажигания двигателей летательных аппаратов / А.Н. Мурысев, А.В. Краснов, Е.В. Распопов. 2011104121/06, Заявлено 04.02.2011; Оpubл. 10.10.2012. Бюл. 28.
11. Пат. 2608888 РФ, МПК F 02 P 17/00. Способ контроля емкостной системы зажигания двигателей летательных аппаратов / А.Н. Мурысев, А.В. Краснов, Е.В. Распопов. 2015139130, Заявлено 14.09.2015; Оpubл. 26.01.2017. Бюл. № 3.

12. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Демин А.Ю., Габидуллина З.Г., Салихова А.Р. Оценка воспламеняющей способности импульсно-плазменной системы зажигания // *Авиационная промышленность*. 2017. № 1. С. 23-27. EDN: VSXZFW.

13. Гизатуллин Ф.А., Газизов Д.Р. О совершенствовании методики проектирования емкостных систем зажигания // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2 (46). С. 233. EDN: RXUPNV.

14. Гизатуллин Ф.А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в ГТД // *Авиационная промышленность*. 2000. № 1. С. 56-60.

15. Кюрегян Н.С., Голенцов Д.А. и др. Диагностика разрядов на свечах зажигания авиационных газотурбинных двигателей // *Мир измерений*. 2011. № 12 (130). С. 21-26.

16. Kumar Jha N., Malve B. Design and Optimization of Combustion Chamber for Gas Turbine Engine. 2023. 10.20944/preprints202311.1853.v1.

17. Vorlíček M., Čerňan J. Ignition System and Their Purpose in Aircraft Reciprocating Engines // *Práce a štúdie*. 2023. Vol. 14. P. 5-10. DOI: 10.26552/pas.Z.2023.2.01. URL: PaS-2023\_vol14-5-10.pdf.

18. Bo Lu, Taixue Bei, Rui Liu, Na Liu, Ying Luo, Yuchen Liu. Experimental Study on the Performance-Influencing Factors of an Aviation Heavy-Oil Two-Stroke Direct-Injection Ignition Engine // *Processes*. 2022. No. 10. P. 2646. DOI: 10.3390/pr10122646.

19. Пат. 2182336 РФ, МПК G 01 R 22/00. Цифровой измеритель критерия воспламеняющей способности искровых разрядов в свечах зажигания / Ф.А. Гизатуллин, В.Х. Абдрахманов. 2000111610/09, Заявлено 10.05.2000; Опубл. 10.05.2002. Бюл. № 13.

20. А.с. 1592567 СССР, МКИ F 02 P 17/00. Устройство для испытания свечи зажигания / Ф.А. Гизатуллин, В.Н. Зайцев, М.С. Грибакин и др. Б.И. 1990. № 34.

21. Пат. 2210085 РФ, МПК G 01 R 29/02. Универсальный измеритель длительности искры / А.В. Шокоров, Ф.А. Гизатуллин. 2001127461/09, Заявлено 09.10.2001; Опубл. 10.08.2003, Бюл. № 22.

## References

1. Raspopov E.V., Krasnov A.V., Murysev A.N., Parfenov L.V., Kuzbekov U.T. *Ustroistvo kontrolya emkostnoi sistemy zazhiganiya dvigatelei letatel'nykh apparatov* [Control Device for the

Capacitive Ignition System of Aircraft Engines]. Patent RF, No. 2614388, 2017. [in Russian].

2. Gizatullin F.A., Popov O.A. *Izmeritel'nyi kompleks dlya kontrolya parametrov sistem zazhiganiya gazoturbinnnykh dvigatelei* [Measuring Complex for Monitoring the Parameters of Ignition Systems of Gas Turbine Engines]. *Izv. vuzov. Aviatsonnaya tekhnika — Izv vuzov. Aviation Technology*. 1999, No. 1, pp. 78-80. [in Russian].

3. Gizatullin F.A., Zaitsev V.N., Velikzhainin I.A., Alimbekov L.I. *Metody i sredstva izmereniya parametrov iskrovykh razryadov v svechakh zazhiganiya gazoturbinnnykh dvigatelei* [Methods and Means for Measuring Parameters of Spark Discharges in Spark Plugs of Gas Turbine Engines]. *Izmeritel'naya tekhnika — Measuring Techniques*, 1992, No. 6, pp. 10-11. [in Russian].

4. Gizatullin F.A. *Metod kontrolya effektivnosti sistem zazhiganiya gazoturbinnnykh dvigatelei* [Method for Monitoring the Efficiency of Ignition Systems of Gas Turbine Engines]. *Izv. vuzov. Aviatsonnaya tekhnika — Izv vuzov. Aviation Technology*. 1999, No. 3, pp. 82-84. [in Russian].

5. Gizatullin F.A. *Kontrol' effektivnosti sistem zazhiganiya gazoturbinnnykh dvigatelei* [Monitoring the Efficiency of Ignition Systems of Gas Turbine Engines]. *Vestnik UGATU — Bulletin of USATU*, 2000, No. 2, pp. 197-200. [in Russian].

6. Gizatullin F.A. *Emkostnye sistemy zazhiganiya* [Capacitive Ignition Systems]. Ufa, USATU, 2002. 249 p. [in Russian].

7. Abdrakhmanov V.Kh., Gizatullin F.A., Zinov'ev K.V. *Ustroistvo kontrolya rabotosposobnosti sistemy zazhiganiya i nastroiки toplivnoi apparatury gazoturbinnogo dvigatelya* [Device for Monitoring the Performance of the Ignition System and Setting up the Fuel Equipment of the Gas Turbine Engine]. Patent RF, No. 2236019, 2004. [in Russian].

8. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Chigvinsev V.A. *Izmeriteli probivnykh napryazhenii iskrovykh, plazmennykh i poluprovodnikovyykh svechei zazhiganiya gazoturbinnnykh dvigatelei* [Measuring the Breakdown Voltage of the Spark, Plasma and Semiconductor Satellite Spark Plugs for Gas Turbine Engines]. *Vestnik UGATU — Bulletin USATU*, 2015, Vol. 19, No. 3 (69), pp. 158-162. [in Russian].

9. Murysev A.N., Krasnov A.V., Raspopov E.V., Andreev M.N. *Sposob kontrolya emkostnoi sistemy zazhiganiya reaktivnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* [Method for Monitoring the Capacitive Ignition System of Jet Gas Turbine Engines]. Patent RF, No. 2338080, 2008. [in Russian].

10. Murysev A.N., Krasnov A.V., Raspopov E.V. *Sposob kontrolya emkostnoi sistemy*

*zazhiganiya dvigatelei letatel'nykh apparatov* [Method for Monitoring the Capacitive Ignition System of Aircraft Engines]. Patent RF, No. 2463523, 2012. [in Russian].

11. Murysev A.N., Krasnov A.V., Raspopov E.V. *Sposob kontrolya emkostnoi sistemy zazhiganiya dvigatelei letatel'nykh apparatov* [Method for Monitoring the Capacitive Ignition System of Aircraft Engines]. Patent RF, No. 2608888, 2017. [in Russian].

12. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Demin A.Yu., Gabidullina Z.G., Salikhova A.R. *Otsenka vosplamenyayushchei sposobnosti impul'sno-plazmennoi sistemy zazhiganiya* [Evaluation of the Flammability of the Pulsed-Plasma Ignition System]. *Aviatsionnaya promyshlennost' — Aviation Industry*, 2017, No. 1, pp. 23-27. EDN: VSXZFW. [in Russian].

13. Gizatullin F.A., Gazizov D.R. *O sovershenstvovaniy metodiki proektirovaniya emkostnykh sistem zazhiganiya* [Methods to Improve Design Capacitive Ignition Systems]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2013, No. 2 (46), pp. 233. EDN: RXUPNV. [in Russian].

14. Gizatullin F.A. *K teorii iskrovogo vosplamneniya toplivovozdushnykh smesei v GTD* [On the Theory of Spark Ignition of Fuel-Air Mixtures in Gas Turbine Engines]. *Aviatsionnaya promyshlennost' — Aviation Industry*, 2000, No. 1, pp. 56-60. [in Russian].

15. Kyuregyan N.S., Golentsov D.A. e.a. *Diagnostika razryadov na svechakh zazhiganiya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* [Diagnostics of Discharges on Spark Plugs of

Aviation Gas Turbine Engines]. *Mir izmereniy — World of Measurements*, 2011, No. 12 (130), pp. 21-26. [in Russian].

16. Kumar Jha N., Malve B. *Design and Optimization of Combustion Chamber for Gas Turbine Engine*. 2023. 10.20944/preprints202311.1853.v1.

17. Vorlíček M., Čerňan J. *Ignition System and Their Purpose in Aircraft Reciprocating Engines. Práce a štúdie*, 2023, Vol. 14, pp. 5-10. DOI: 10.26552/pas.Z.2023.2.01. URL: PaS-2023\_vol14-5-10.pdf.

18. Bo Lu, Taixue Bei, Rui Liu, Na Liu, Ying Luo, Yuchen Liu. *Experimental Study on the Performance-Influencing Factors of an Aviation Heavy-Oil Two-Stroke Direct-Injection Ignition Engine. Processes*, 2022, No. 10, pp. 2646. DOI: 10.3390/pr10122646.

19. Gizatullin F.A., Abdrakhmanov V.Kh. *Tsifrovoi izmeritel' kriteriya vosplamenyayushchei sposobnosti iskrovykh razryadov v svechakh zazhiganiya* [Digital Meter for the Criterion of Ignition Ability of Spark Discharges in Spark Plugs of Gas Turbine Engines]. Patent RF, No. 2182336, 2002. [in Russian].

20. Gizatullin F.A., Zaitsev V.N., Gribakin M.S. e.a. *Ustroistvo dlya ispytaniya svechi zazhiganiya* [Device for Testing Spark Plugs] Certificate of Authorship SSSR, No. 1592567, 1990. [in Russian].

21. Shokorov A.V., Gizatullin F.A. *Universal'nyi izmeritel' dlitel'nosti iskry* [Universal Spark Duration Meter]. Patent RF, No. 2210085, 2003. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 10.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 29.02.2024.*

*The article was submitted 10.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 29.02.2024.*

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-45-54

## УПРОЩЕННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДВУХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ С РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМИ ОБМОТКАМИ

**Роберт Радилевич Саттаров****Robert R. Sattarov**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

**Артур Валерьевич Махиянов****Arthur V. Makhyanov**

аспирант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

В связи с растущим спросом на электроэнергию и сокращением запасов традиционных источников энергии большое значение приобретают энергосбережение и использование альтернативных источников.

Ветроэнергетика представляет собой динамично развивающуюся отрасль в области производства электроэнергии из возобновляемой энергии ветрового потока, играя важную роль в диверсификации источников энергии и сокращении зависимости от нестабильных политических и экономических факторов, связанных с добычей и транспортировкой ископаемых. Ветроэнергетика с научной точки зрения представляет собой область науки и техники, разрабатывающую теоретические основы, методы и средства использования энергии ветра.

Для преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения ротора генератора с последующим её преобразованием в электрическую энергию используют различной конфигурации ветроэнергетические установки, установленные на открытых местностях, где ветер имеет пригодную скорость для выработки электроэнергии. Особое внимание у исследователей, инженеров и общественности по всему миру вызывает вопрос по разработке новых ветроэнергетических установок и улучшению действующих.

Таким образом, ветроэнергетика имеет огромное значение в современном мире, представляя собой важный и перспективный вариант для диверсификации энергетической системы, сокращения загрязнения

### Ключевые слова

энергия, электроэнергия, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, ветер, ветроэнергетика, ветроэнергетическая установка, ветроэнергетическая система, синхронный генератор с постоянными магнитами, обмотка



окружающей среды и обеспечения устойчивого и экономически привлекательного источника энергии для будущих поколений.

#### **Цель исследования**

Изучить при низких и нормальных скоростях ветра режимы работы модели ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками в пакете прикладных программ Matlab (Simscape).

#### **Методы исследования**

Моделирование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками в пакете прикладных программ Matlab (Simscape).

#### **Результаты**

Исследованы при низких и нормальных скоростях ветра режимы работы ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками в пакете прикладных программ Matlab (Simscape). Подобный метод регулирования напряжения может обеспечить возможность стабилизировать напряжение и сохранять высокую эффективность на приемлемом уровне в более широком диапазоне низких и нормальных скоростей ветра.

**Для цитирования:** Саттаров Р. Р., Махиянов А. В. Упрощенная компьютерная модель ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 45-54. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-45-54>.

Original article

## **DEVELOPMENT AND RESEARCH OF WIND POWER DEVICES WITH RECONFIGURABLE WINDINGS**

#### **Relevance**

Due to the growing demand for electricity and the reduction in reserves of traditional energy sources, energy conservation and the use of alternative sources are becoming increasingly important.

Wind energy is an important growth industry in the production of electricity from renewable wind energy, playing an important role in diversifying energy sources and reducing dependence on the unstable political and economic factors associated with the extraction and transportation of fossil fuels. Wind energy, from a scientific point of view, is a field of science and technology that develops the theoretical foundations, methods and means of using wind energy.

To convert the kinetic energy of the wind flow into mechanical energy of rotation of the generator rotor with its subsequent conversion into electrical energy, wind power plants of various configurations are used, installed in open areas where the wind has a suitable speed for generating electricity. Of particular interest to researchers, engineers and the public around the world is the issue of developing new wind power plants and improving existing ones.

Thus, wind energy has great interest in the modern world, representing an important and promising option for diversifying the energy system, reducing environmental pollution and providing a sustainable and economically attractive source of energy for future generations.

#### **Keywords**

energy, electricity, energy efficiency, renewable energy, wind, wind energy, wind power plant, wind power system, permanent magnet synchronous generator, winding



**Aim of research**

To study the operating modes at low and normal wind speeds of a wind power system model based on two magnetoelectric generators with reconfigurable windings in the Matlab application package (Simscape).

**Research methods**

Simulation of operating modes at low and normal wind speeds of a wind energy system based on two magnetoelectric generators with reconfigurable windings in the Matlab application package (Simscape).

**Results**

A study was carried out of the operating modes at low and normal wind speeds of a wind energy system based on two magnetoelectric generators with reconfigurable windings in the Matlab application package (Simscape). This voltage regulation method can provide the ability to stabilize voltage and maintain high efficiency at an acceptable level over a wider range of low and normal wind speeds.

**For citation:** Sattarov R. R., Makhiyanov A. V. Uproshchennaya komp'yuternaya model' vetroenergeticheskoy sistemy na osnove dvukh magnitoelektricheskikh generatorov s rekonfiguriruyemyimi obmotkami [Development and Research of Wind Power Devices with Reconfigurable Windings]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 45-54 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-45-54>.

**Введение**

В связи с растущим спросом на электрическую энергию и высокой динамикой истощения запасов традиционных источников энергии (природный газ, нефть, торф, уголь, уран, мазут, ядерное топливо и др.) большое значение приобрели энергосбережение и использование альтернативных источников в виде энергии Солнца, ветрового потока, приливов, волн, тепловой энергии и др. [1, 2]. Использование традиционных источников энергии обернулось негативными последствиями для окружающей среды в виде повышения парниковых газов диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) и метана ( $\text{CH}_4$ ) в атмосфере, что непосредственно влияет на изменение климата планеты и качества жизни людей [3, 4]. Альтернативные источники энергии, несомненно, являются более экологически безопасными [5, 6].

Ветроэнергетика как отрасль энергетики, специализирующаяся на преобразовании кинетической энергии воздушных масс в атмосфере в электрическую, механическую, тепловую или в любую другую форму энергии, удобную для

использования в народном хозяйстве [7], играет важную роль в диверсификации источников энергии и сокращении зависимости от нестабильных политических и экономических факторов, связанных с добычей и транспортировкой ископаемых. В настоящее время этот вид энергетики стал ключевым фактором в глобальных усилиях по диверсификации источников энергии, сокращению выбросов парниковых газов и обеспечению устойчивого энергетического будущего.

Ветроэнергетика с научной точки зрения представляет собой область науки и техники, разрабатывающую теоретические основы, методы и средства использования энергии ветра [8], заслуживающие особое внимание у исследователей, инженеров и общественности по всему миру при разработке новых ветроэнергетических установок и улучшении действующих.

Процесс генерации электроэнергии из воздушного потока осуществляется с помощью ветроэнергетических установок, установленных на открытых местностях, где ветер имеет благоприятную скорость для выработки электроэнергии.

энергии. Для эффективной работы ветроэнергетических установок, как указано в [9], требуется скорость ветра не менее 3–4 м/с, а оптимальная скорость составляет от 12 до 25 м/с. В основном для генерации электрического тока в подобных установках повсеместно используют синхронные генераторы с постоянными магнитами [10, 11]. На рисунке 1 показаны характеристики различных ветроэнергетических установок.

В настоящее время существует много различных разработок в сфере электротехники, которые с легкостью можно интегрировать в различные ветроэнергетические установки для повышения надёжности и энергоэффективности [13–15].

Таким образом, ветроэнергетика представляет важный и перспективный вариант для диверсификации энергетической системы, сокращения загрязнения окружающей среды и обеспечения устойчивого и экономически привлекательного источника энергии для будущих поколений.

### Конструкция ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками

Рассмотрим ветроэнергетическую систему на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками (рисунок 2) по аналогии с [16].

Ветроэнергетическая система содержит ветроколесо 1, которое с помощью муфты 2 соединено с мультипликатором 3. В свою очередь мультипликатор 3 с помощью муфт 4 и 5 соединен с синхронными генераторами с постоянными магнитами 6 и 7. Выводы каждого генератора выведены к выпрямителям 8 и 9, которые соединены с контактором 10, где происходит реконфигурация на параллельное или последовательное соединение. Питание идет на аккумулятор 11.

Рассмотрим принцип действия данной ветроэнергетической системы. При нормальной скорости ветра ключи С1 и С2 замкнуты, а ключ С3 разомкнут так, что обмотки синхронных генераторов с посто-

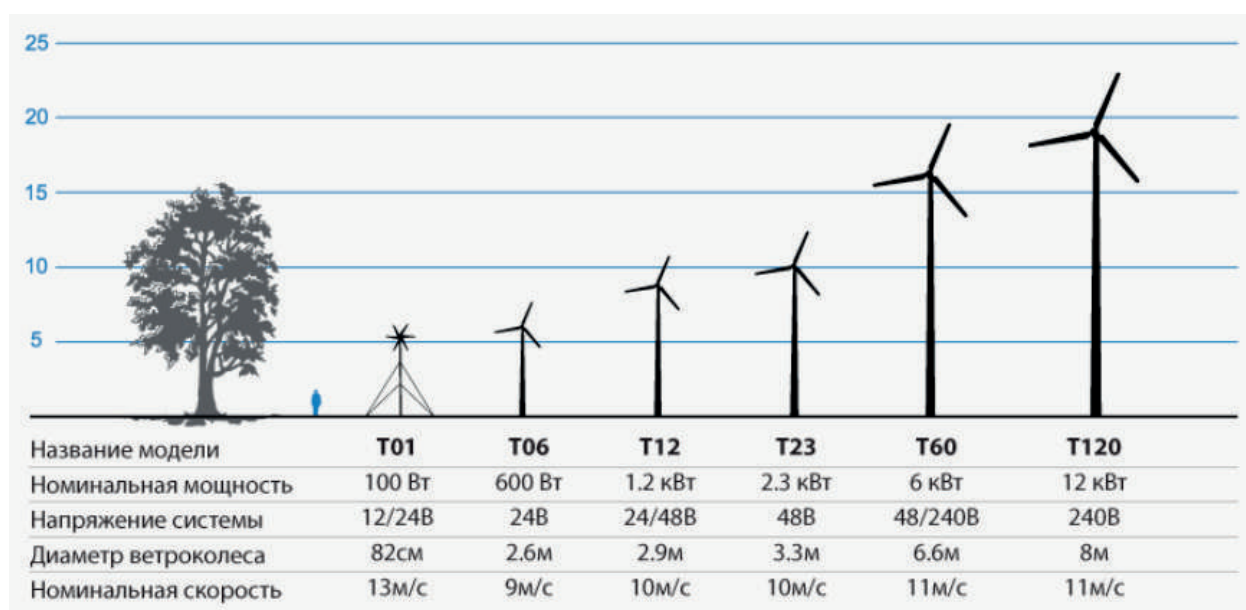
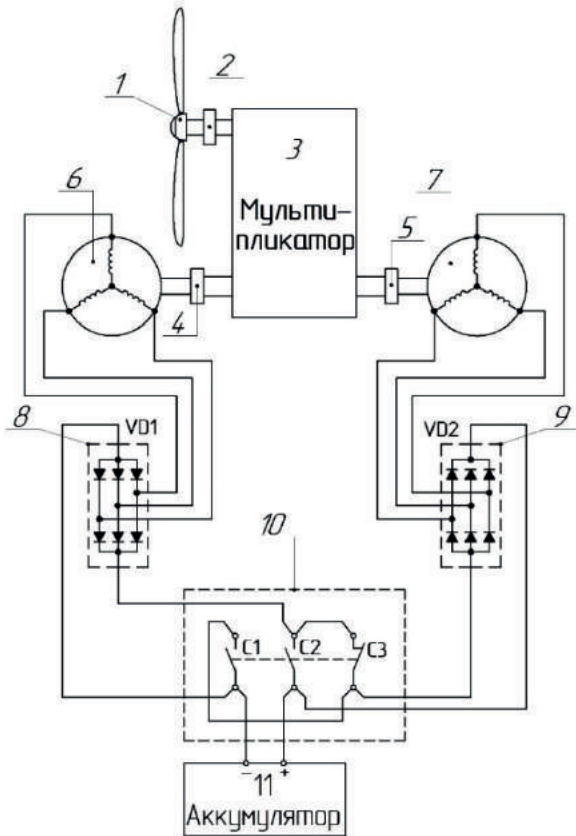


Рисунок 1. Характеристики различных ветроэнергетических установок [12]

Figure 1. Characteristics of various wind energy devices [12]

янными магнитами 6 и 7 оказываются подключенными параллельно, при этом выходное напряжение имеет нормальное значение, а ток равен удвоенному нормальному току одного генератора. Выводы от контактора 10 подключены к аккумулятору 11. При таком режиме обеспечивается максимальная мощность данной установки при сохранении нормального значения напряжения.



1 — ветроколесо; 2, 4, 5 — муфта;  
3 — мультипликатор; 6, 7 — синхронные генераторы с постоянными магнитами;  
8, 9 — выпрямители VD1 и VD2;  
10 — контактор; 11 — аккумулятор

1 — windwheel; 2, 4, 5 — sleeve; 3 — gear box; 6, 7 — permanent magnet synchronous generator; 8, 9 — rectifier; 10 — contactor; 11 — accumulator

**Рисунок 2.** Ветроэнергетическая система на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками

**Figure 2.** Wind power system based on two magnetoelectric generators with reconfigurable windings

При снижении скорости вращения ветроколеса 1 до минимальной пороговой величины ключи С1 и С2 размыкаются, а ключ С3 замыкается, из-за чего одноименные фазы синхронных генераторов с постоянными магнитами 6 и 7 соединяются последовательно, что приводит к повышению выходного напряжения до нормального значения, а ток при этом уменьшится и окажется равным току одного генератора. При этом мощность данной установки снижается, но является максимально возможной при данной сниженной скорости ветра.

При повышении скорости ветра обеспечивается обратное переключение одноименных фаз синхронных генераторов с постоянными магнитами 6 и 7 на параллельную работу.

Во всех режимах ветроэнергетическая система на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками сохраняет нормальный уровень напряжения и выдает максимально возможную мощность при данной скорости ветра.

### Моделирование ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками

Электрическая часть синхронной машины с постоянными магнитами описывается системой уравнений, связанных с ротором [17]:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q,$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_d} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q},$$

$$T_e = 1,5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q],$$

где  $L_d, L_q$  — индуктивности статора по осям  $d$  и  $q$ ;

$R$  — активное сопротивление обмотки статора;

$i_d, i_q$  — проекции тока статора на оси  $d$  и  $q$ ;

$u_d, u_q$  — проекции напряжения статора на оси  $d$  и  $q$ ;

$\omega_r$  — угловая частота вращения ротора;

$\lambda$  — магнитный поток постоянных магнитов, сцепленный с обмоткой статора;

$p$  — число пар полюсов;

$T_e$  — электромагнитный момент.

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору.

Механическая часть модели описывается следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m),$$

$$\frac{d}{dt} \theta = \omega_r,$$

где  $J$  — суммарный момент инерции ротора и нагрузки;

$F$  — коэффициент трения;

$\theta$  — угол положения ротора;

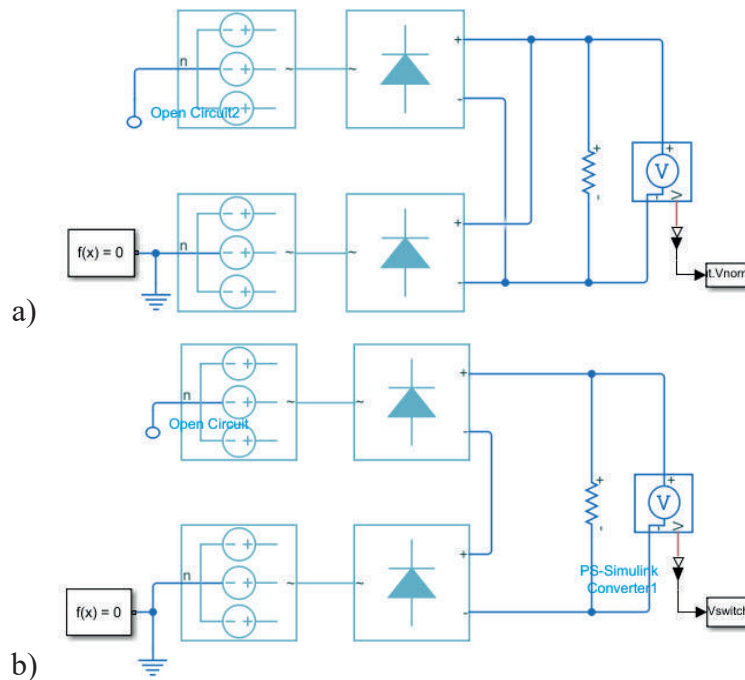
$T_m$  — момент сопротивления.

Рассмотрим упрощенную компьютерную модель в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab (Simscape) исследуемой ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками, показанной на рисунке 3 [18]. Генераторы заменяются эквивалентными источниками напряжения. Используются готовые библиотечные блоки трехфазных выпрямителей.

В первом варианте (рисунок 3, а) выпрямители соединены параллельно, имитируются следующие режимы на генераторах:

- 1) нормальная скорость ветра в виде номинальной частоты 60 Гц;
- 2) пониженная скорость ветра в виде частоты 30 Гц.

Во втором варианте (рисунок 3, б) выпрямители соединены последовательно, имитируется пониженная скорость ветра в виде частоты 30 Гц на генераторах. При этом принято, что напряже-



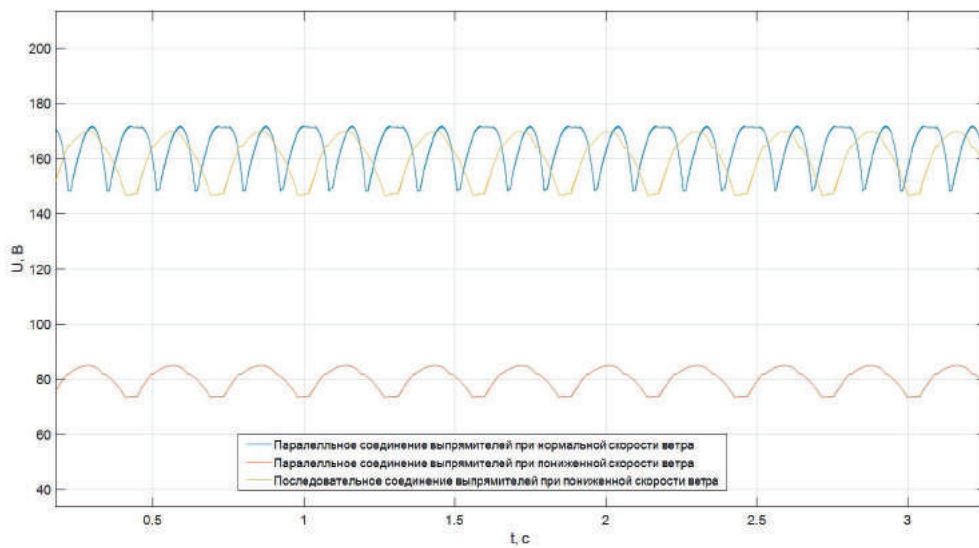
**Рисунок 3.** Моделирование ветроэнергетического устройства с реконфигурируемыми обмотками в Matlab (Simscape): параллельное соединение (а); последовательное соединение (б)

**Figure 3.** Modeling a wind power device with reconfigurable windings in Matlab (Simscape): parallel connection (a); series connection (b)

ние генераторов снижается пропорционально частоте вращения ротора.

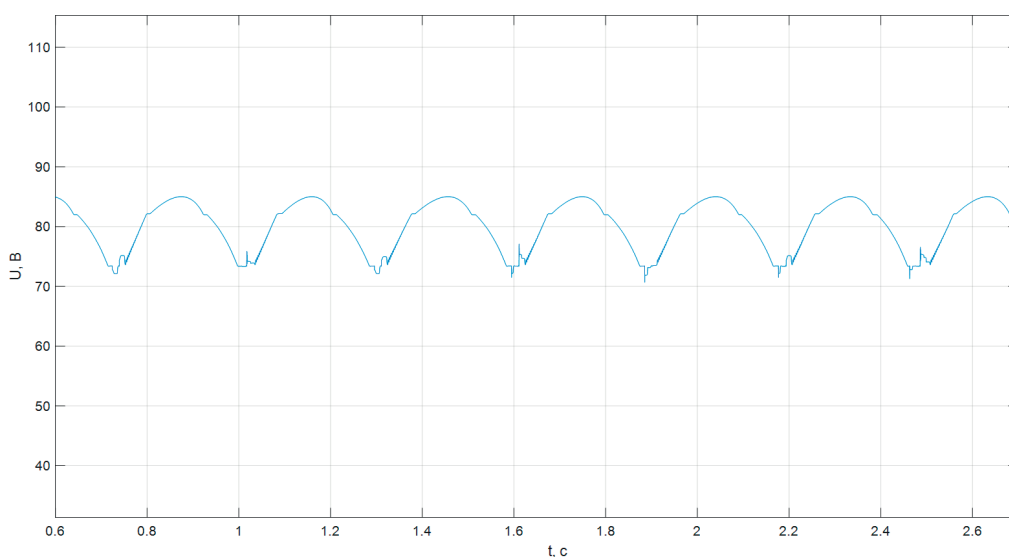
Как видно из результатов моделирования (рисунок 4), в этом идеальном случае, когда скорость снижается в 2 раза, переход на последовательное соединение блоков выпрямителей позволяет удвоить напряжение генераторов и получить среднее постоянное напряжение, близкое к номинальному.

С другой стороны, необходимо учитывать, что если выпрямители соединены последовательно, то между нейтралями генераторов возникает разность потенциалов (рисунок 5) [19]. Среднее значение этого напряжения между нейтралями близко к напряжению одного генератора, которое равно напряжению параллельного соединения выпрямителей при пониженной скорости ветра.



**Рисунок 4.** Напряжения нагрузки при параллельном и последовательном включении для нормальной и вдвое пониженной частоты

**Figure 4.** Load voltages for parallel and series connection for normal and twice reduced frequency



**Рисунок 5.** Разность потенциалов между нейтралями генераторов при последовательном соединении выпрямителей

**Figure 5.** Potential difference between generator neutrals when rectifiers are connected in series



## Выводы

Проведено исследование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками в пакете прикладных программ Matlab (Simscare). Подобный метод регулирования напряжения дает

возможность стабилизировать напряжение и сохранять высокую эффективность на приемлемом уровне в более широком диапазоне низких и нормальных скоростей ветра. Однако требуются дальнейшие исследования подобной модели с целью анализа условий работы полупроводниковых элементов, обмоток генераторов и нейтралей энергосистемы.

## Список источников

1. Gofurjanovich Yu.Ju., Tojiahmadugli H.N., Suyunjonugli M.A. Traditional and Non-Traditional Sources of Energy // *Asian Journal of Multidimensional Research*. 2022. Vol. 11, No. 3. P. 87–91. DOI: 10.5958/2278-4853.2022.00047.7.
2. Flaksman A.S., Mozgovoy A.I., Lopatkin D.S., Dikikh V.A., Shamsov I.S., Romanova Ju.A., Morkovkin D.E., Bovtrikova E.V. Prospects for the Development of Alternative Energy Sources in the World Energy // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Smolensk, 25 January 2021. Smolensk, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052040. EDN: QBMLMI.
3. Мудрецов А.Ф., Прудникова А.А. Традиционные и зеленые источники энергии: проблемы и перспективы развития в условиях глобальной декарбонизации // *Проблемы рыночной экономики*. 2022. № 1. С. 159–168. DOI: 10.33051/2500-2325-2022-1-159-168. EDN: XXXUWU.
4. You V., Kakinaka M. Modern and Traditional Renewable Energy Sources and CO<sub>2</sub> Emissions in Emerging Countries // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. No. 29. P. 17695–17708. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16669-2>.
5. Ovchinnikova S., Kulinova G., Borovkov A., Markina N. Environmental Substantiation for the Use of Alternative Energy Sources // *E3S Web of Conferences*: 22, Voronezh, 08–10 December 2020. Voronezh, 2021. P. 01007. DOI: 10.1051/e3sconf/202124401007. EDN: HJSVOR.
6. Атомный эксперт. Ветер энергоперемен [Website]. URL: [https://atomicexpert.com/novawind\\_rosatom](https://atomicexpert.com/novawind_rosatom) (дата обращения 05.03.2024).
7. Ветроэнергетика. Википедия [Website]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветроэнергетика> (дата обращения 05.03.2024)
8. Ветроэнергетика. Большая российская энциклопедия 2004–2017 [Website]. URL: [https://old.bigenc.ru/technology\\_and\\_technique/text/1911230](https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/1911230) (дата обращения 05.03.2024).
9. Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика / Под общ. ред.
- П.П. Безруких. М.: ИнтехэнергоИздат, Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
10. Татевосян А.А., Андреева Е.Г. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование синхронного генератора с постоянными магнитами // *Промышленная энергетика*. 2019. № 4. С. 20–28.
11. Sattarov R.R., Ziganshin T. Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Float Buoy Type Wave Energy Converters // *13th International IEEE Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2019 — Proceedings*, Omsk, 05–07 November 2019. Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8944704. DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944704. EDN: ITXURR.
12. Как сэкономить электричество в квартире и частном доме [Электронный ресурс]. URL: <https://infoelectrik.ru/elektroprovodka/ekonomiya-elektrichestva-svoimi-rukami.html>. (дата обращения 06.03.2024).
13. Xiao L., Liu P., Lin C., Sattarov R.R. Intelligent Fault-Tolerant Control for AC/DC Hybrid Power System of More Electric Aircraft // *Aerospace*. 2022. Vol. 9, No. 1. DOI: 10.3390/aerospace9010004. EDN: KAXLYL.
14. Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Черных И.В. Моделирование полупроводниковых преобразователей энергии для питания электромагнитного сепаратора // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14, № 1. С. 54-60. URL: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/1776>.
15. Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Приступ А.Г., Топорков Д.М. Повышение эффективности ветроэнергетической установки путем использования псевдопрямого привода // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2017. № 5. С. 59–63. DOI: 10.18635/2071-2219-2017-5-59-63. EDN: ZMZPEN.
16. Пат. 219734 РФ, МПК Н 02 Р 9/00. Ветроэнергетическое двухгенераторное устройство для выработки электроэнергии в расширенном

диапазоне ветровых скоростей / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов, А.А. Евдокимов. 2023105593; Заявлено 09.03.23; Опубл. 02.08.2023, Бюл. № 22.

17. Терешкин В.М. Обобщенное представление фазного напряжения многофазного преобразователя // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 1. С. 11–14.

18. Sattarov R., Makhiyanov A. Twin-Generator Reconfigurable Set for Wind Power Plant // 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 150-154.

19. Осипов Д.С., Долгих Н.Н., Сатпаев Д.С., Андреева Е.Г. Анализ режима однофазного замыкания на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с помощью вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-76-81>.

## References

1. Gofurjanovich Yu.Ju., Tojiahmadugli H.N., Suyunjonugli M.A. Traditional and Non-Traditional Sources of Energy. *Asian Journal of Multidimensional Research*, 2022, Vol. 11, No. 3, pp. 87–91. DOI: [10.5958/2278-4853.2022.00047.7](https://doi.org/10.5958/2278-4853.2022.00047.7).

2. Flaksman A.S., Mozgovoy A.I., Lopatkin D.S., Dikikh V.A., Shamsov I.S., Romanova Ju.A., Morkovkin D.E., Bovtrikova E.V. Prospects for the Development of Alternative Energy Sources in the World Energy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Smolensk, 25 January 2021*. Smolensk, 2021. DOI: [10.1088/1755-1315/723/5/052040](https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/5/052040). EDN: QBMLMI.

3. Mudretsov A.F., Prudnikova A.A. Traditsionnye i zelenye istochniki energii: problemy i perspektivy razvitiya v usloviyakh global'noi dekarbonizatsii [Traditional Energy Sources and Green Power Sources: Problems and Development Prospects in the Context of Global Decarbonization]. *Problemy rynochnoi ekonomiki — Market Economy Problems*, 2022, No. 1, pp. 159–168. DOI: [10.33051/2500-2325-2022-1-159-168](https://doi.org/10.33051/2500-2325-2022-1-159-168). EDN: XXXUWU. [in Russian].

4. You V., Kakinaka M. Modern and Traditional Renewable Energy Sources and CO<sub>2</sub> Emissions in Emerging Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, No. 29, pp. 17695–17708. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16669-2>.

5. Ovchinnikova S., Kukinova G., Borovkov A., Markina N. Environmental Substantiation for the Use of Alternative Energy Sources. *E3S Web of Conferences: 22, Voronezh, 08–10 December 2020*,

Voronezh, 2021, pp. 01007. DOI: [10.1051/e3sconf/202124401007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124401007). EDN: HJSVOR.

6. *Atomnyi ekspert. Veter energoperemen* [Atomic Expert. The Wind is Energetically Changing] [Website]. URL: [https://atomicexpert.com/nova-wind\\_rosatom](https://atomicexpert.com/nova-wind_rosatom) (accessed 05.03.2024). [in Russian].

7. *Vetroenergetika* [Wind Energy] Wikipedia [Website]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Vetroenergetika> (accessed 05.03.2024). [in Russian].

8. *Vetroenergetika. Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya 2004–2017* [Wind Energy Great Russian Encyclopedia 2004–2017] [Website]. URL: [https://old.bigenc.ru/technology\\_and\\_technique/text/1911230](https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/1911230) (accessed 05.03.2024). [in Russian].

9. Bezrukikh P.P., Bezrukikh P.P. (ml.), Gribkov S.V. *Vetroenergetika* [Wind Energy]. Ed. by P.P. Bezrukikh. Moscow, IntekhenergoIzdat Publ., Teploenergetik Publ., 2014. 304 p. [in Russian].

10. Tatevosyan A.A., Andreeva E.G. Razrabotka, modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami [Development, Modeling and Experimental Study of a Synchronous Generator with Permanent Magnets]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Energy*, 2019, No. 4, pp. 20–28. [in Russian].

11. Sattarov R.R., Ziganshin T. Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Float Buoy Type Wave Energy Converters. *13th International IEEE Scientific and Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2019 — Proceedings, Omsk, 05–07 November 2019*. Omsk, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, pp. 8944704. DOI: [10.1109/Dynamics47113.2019.8944704](https://doi.org/10.1109/Dynamics47113.2019.8944704). EDN: ITXURR.

12. *Kak sekonomit' elektrichestvo v kvartire i chastnom dome* [How to Save Electricity in an Apartment and Private House] [Electronoc Resours]. URL: <https://infoelektrik.ru/elektroprovodka/ekonomiya-elektrichestva-svoimi-rukami.html>. (accessed 06.03.2024). [in Russian].

13. Xiao L., Liu P., Lin C., Sattarov R.R. Intelligent Fault-Tolerant Control for AC/DC Hybrid Power System of More Electric Aircraft. *Aerospace*, 2022, Vol. 9, No. 1. DOI: [10.3390/aerospace9010004](https://doi.org/10.3390/aerospace9010004). EDN: KAXLYL.

14. Evdokimov A.A., Charykov V.I., Chernykh I.V. Modelirovanie poluprovodnikovyykh preobrazovatelei energii dlya pitaniya elektromagnitnogo separatora [Modeling of Semiconductor Energy Converters for Electromagnetic Separator Power Supply]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika — Bulletin of the South Ural State University. Series:*

*Power Engineering*, 2014, Vol. 14, No. 1, pp. 54–60. URL: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/1776>. [in Russian].

15. Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Toporkov D.M. Povyshenie effektivnosti vetroenergeticheskoi ustanovki putem ispol'zovaniya psevdopryamogo privoda [Improving Wind Turbine Efficiency with Use a Pseudo Direct Drive]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie — Energy Safety and Energy Economy*, 2017, No. 5, pp. 59–63. DOI: 10.18635/2071-2219-2017-5-59-63. EDN: ZMZPEN. [in Russian].

16. Sattarov R.R., Makhyanov A.V., Evdokimov A.A. *Vetroenergeticheskoe dvukhgeneratornoie ustroistvo dlya vyrabotki elektroenergii v rasshirennom diapazone vetrovykh skorostei* [Wind Power Dual-Generator Device for Generating Electricity in an Expanded Range of Wind Speeds]. Patent RF, No. 219734, 2023. [in Russian].

17. Tereshkin V.M. Obobshchennoe predstavlenie faznogo napryazheniya mnogofaznogo preobrazovatelya [Generalized Presence of Phase Voltage of a Multiphase Transmitter]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta — Electronics and*

*Electrical Equipment of Transport*, 2019, No. 1, pp. 11–14. [in Russian].

18. Sattarov R., Makhyanov A. Twin-Generator Reconfigurable Set for Wind Power Plant. *2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russian Federation*, 2023, pp. 150-154.

19. Osipov D.S., Dolgikh N.N., Satpaev D.S., Andreeva E.G. Analiz rezhima odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s kombinirovannym zazemleniem neutrali s pomoshch'yu veivlet-preobrazovaniya [Analysis of Single-Phase Earth Fault Mode in Networks with Combined Neutral Ground by Means of Wavelet Transformation]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2018, No. 5 (161), pp. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-76-81>. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 19.03.2024; одобрена после рецензирования 26.03.2024; принята к публикации 02.04.2024.*

*The article was submitted 19.03.2024; approved after reviewing 26.03.2024; accepted for publication 02.04.2024.*

Научная статья

УДК 620.92

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-55-64

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО: ПОТЕНЦИАЛ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЬТЬЕ

**Богдан Алексеевич Соловьев****Bogdan A. Solov'ev**

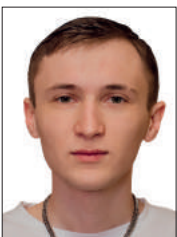
аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

**Гиорги Кахаберович Гамисония****Giorgi K. Gamisonia**

аспирант кафедры «Экономика и стратегическое развитие»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

**Гульназ Ержановна Димукашева****Gulnaz Ye. Dimukasheva**

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

**Дмитрий Алексеевич Коломеец****Dmitry A. Kolomeets**

магистрант кафедры «Евразийская политехническая школа»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

Извлечение энергии с помощью термоэлектрических генераторов, работающих на элементах Пельтье, из природных и искусственно созданных источников тепла позволяет создать новый экологичный метод производства чистой энергии. Данное исследование проведено с целью выявления факторов, оказывающих влияние на процессы энергетического преобразования.

### Цель исследования

Целью работы является изучение производительности элементов Пельтье и определение оптимальных условий для работы термоэлек-

### Ключевые слова

термоэлектрический генератор, ячейка Пельтье, эффект Зеебека, энергоэффективность



трического генератора на их основе, а также анализ эффективности термоэлектрических генераторов на основе ячеек Пельтье.

#### Методы исследования

Физические основы термоэлектричества, математическое моделирование.

#### Результаты

В ходе исследования проанализированы температурные градиенты в регионах с термальными водами горного массива, а также разработана математическая модель процесса преобразования тепловой энергии в электрическую.

**Для цитирования:** Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Димукашева Г. Е., Коломеец Д. А. Преобразование тепловой энергии в электричество: потенциал и эффективность термоэлектрических генераторов на основе элементов Пельтье // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2024. № 1. Т. 20. С. 55-64. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-55-64>.

Original article

## CONVERSION OF THERMAL ENERGY INTO ELECTRICITY: POTENTIAL AND EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC GENERATORS BASED ON PELTIER ELEMENTS

#### Relevance

Energy extraction using thermoelectric generators powered by Peltier elements through the application of both natural and engineered heat sources, aiming to create a new green method for clean energy production.

#### Aim of research

This study delves into the literature analysis to identify the factors that influence the accuracy of energy conversion, and aims to investigate the performance of Peltier elements while learning the principles of heat transfer, creating optimal conditions for the operation of a thermoelectric generator based on them. During the experiments, by adapting the process conditions, a process transfer function is formed, which aims to improve the energy generation efficiency. The aim of the study is to analyze the efficiency of thermoelectric generators based on Peltier cells.

#### Research methods

Physical foundations of thermoelectricity, development of a mathematical model.

#### Results

The study analyzed that the simulation revealed the presence of temperature gradients in regions with thermal waters of the mountain mass, and a mathematical model of the process was developed.

#### Ключевые слова

thermoelectric generator, Peltier cell, Seebeck effect, energy efficiency

**For citation:** Solovev B.A., Gamisonia G.K., Dimukasheva G.Ye., Kolomeets D.A. Preobrazovaniye teplovoy energii v elektrichestvo: potentsial i effektivnost' termoelektricheskikh generatorov na osnove elementov Pel't'ye [Conversion of Thermal Energy into Electricity: Potential and Efficiency of Thermoelectric Generators Based on Peltier Elements]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 55-64 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-55-64>.

#### Введение

Термоэлектрические генераторы производят прямую трансформацию тепловой энергии в электричество и представляют собой эффективный экологический

альтернативный источник энергии, не оказывающий вредного воздействия на окружающую среду. Исследования показывают перспективность использования избыточного тепла производственных



процессов как возможного источника для выработки электроэнергии. Модуль, содержащий ячейки Пельтье, функционирует как компактный тепловой насос, состоящий из чередующихся полупроводниковых термопар типов  $n$  и  $p$ . Когда через термоэлектрические модули пропускается электричество, они охлаждаются, а при наличии температурной разницы — генерируют напряжение в соответствии с четырьмя физическими законами: эффектом Зеебека, Пельтье, Томсона и Джоуля [1].

История термоэлектрических генераторов началась в 1909 г. благодаря работам немецкого ученого Эдмунда Альтенкирхену, изучавшего их эффективность и применение. Работа ячеек Пельтье основана на эффекте Зеебека, в соответствии с которым происходит преобразование тепла в электричество с созданием разности потенциалов при приложении температурного градиента к различным металлическим материалам [2].

С 1990 г. наблюдается развитие технологий Пельтье, включая создание U-образных элементов, способных вырабатывать значительную энергию от пламени свечи, разработку мощных элементов для автомобилей, а также многослойных и специализированных модулей. Ключевым фактором для эффективности термоэлектрического генератора являются высокий температурный градиент и хорошая теплопроводность материалов, при этом также важны для достижения оптимальных результатов колебания температуры и фазы между горячими и холодными поверхностями.

### Структура системы теплопередачи

Тепловая энергия часто остается не востребованной для производства других видов энергии в районах с доступными естественными тепловыми источниками, что приводит к неэффективному использованию выделяемого тепла.

Важно оценить работу элементов Пельтье в разнообразных условиях, проведя сравнение их эффективности с характерными реакциями на тепловые воздействия. Система генерации на основе Пельтье включает в себя тепловой источник для создания разницы температур между двумя сторонами элемента, где для поддержания высокой температуры на «горячей» стороне применяется закрытая система, а для отвода тепла с «холодной» стороны используется теплоотвод, выпускающий тепло в окружающую среду [3].

На рисунке 1 демонстрируется схема системы теплопередачи, включающая нагреватель мощностью 4500 Вт, который подогревает водяной поток, циркулирующий через змеевик [4]. Наличие двух ручных клапанов на входе и выходе из системы позволяет регулировать поток воды вручную.

В обменнике тепла использовалась металлическая пластина (МП) для эффективной передачи тепла к «горячей» стороне элементов. Для определения наиболее эффективной конфигурации в рамках эксперимента рассматривалось несколько вариантов соединения МП: последовательно (рисунок 2, а), комбинированно параллельно-последовательно (рисунок 2, б) и комбинированно последовательно-параллельно (рисунок 2, в).

Конфигурация соединения элементов влияет на параметры напряжения и тока, циркулирующие через нагрузку. Напряжения и токи вычисляются с использованием правил сложения токов и напряжений для последовательных и параллельных соединений [5].

### Характеристика

#### термоэлектрического генератора

Эффект Зеебека является основополагающим принципом для генерации термоэлектрической энергии при использо-

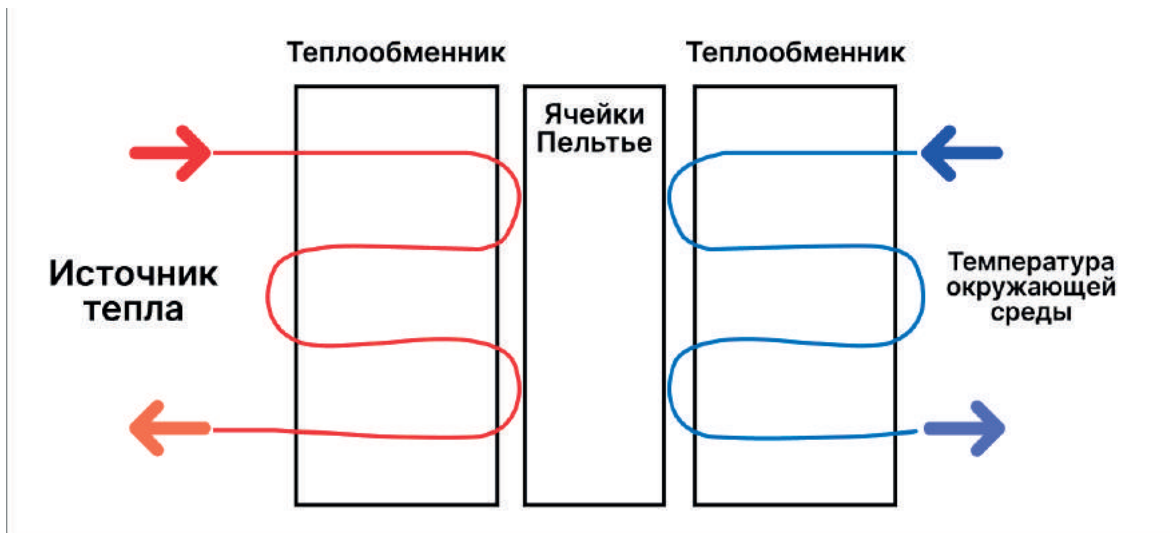


Рисунок 1. Технологическая схема системы теплопередачи

Figure 1. Technological diagram of the heat transfer system

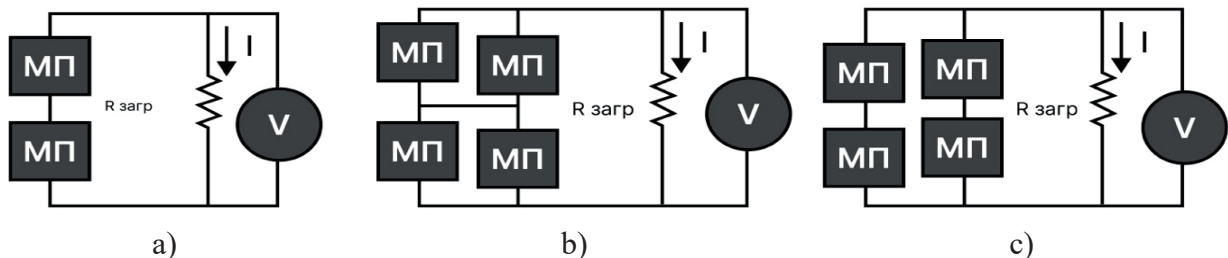


Рисунок 2. Варианты соединения ячеек Пельтье: последовательное соединение (а); комбинированно параллельно-последовательное соединение ячеек Пельтье (b); комбинированно последовательно-параллельное соединение ячеек Пельтье (с)

Figure 2. Configuration of Peltier cell: serial connection (a); combined parallel-series connection of Peltier cells (b); combined series-parallel connection of Peltier cells (c)

вании элементов Пельтье [6]. Величина напряжения, возникающего на клеммах элемента, определяется с помощью следующего уравнения:

$$\Delta E = \alpha \Delta T, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент Зеебека, который определяет величину напряжения, создаваемого на единицу температурного градиента в 1 К. Этот коэффициент зависит от материалов, используемых для изготовления элемента;

$\Delta T$  представляет собой разность температур между двумя сторонами каждого элемента.

Важно отметить, что коэффициент Зеебека  $\alpha$  не является статическим и изменяется в зависимости от темпера-

турного градиента, что описывается следующей формулой:

$$E = \int_{T_c}^{T_h} \alpha(T) dT, \quad (2)$$

где  $T_c$  — температура на холодной стороне элемента;

$T$  — средняя температура, полученная путем усреднения температур на горячей ( $T_h$ ) и холодной ( $T_c$ ) сторонах.

Таким образом, если температурный градиент стремится к нулю, значение коэффициента Зеебека  $\alpha$  может также уменьшаться до нуля.

Ток, который генерируется на клеммах элемента в результате приложенного температурного градиента, рассчитывается согласно уравнению:

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R_{TE} + R_e}, \quad (3)$$

где  $R_{TE}$  — электрическое сопротивление термоэлектрического генератора;

$R_e$  — сопротивление внешней нагрузки.

Мощность, которая подается на эту нагрузку, вычисляется с использованием следующего уравнения:

$$P = I^2 R_e = \frac{\alpha^2 \Delta T^2 R_e}{(R_{TE} + R_e)^2} \alpha T^2, \quad (4)$$

где для максимальной передачи мощности должно выполняться условие  $R_{TE} = R_e$ .

Следовательно, максимальная мощность, подаваемая на нагрузку, определяется как:

$$P = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{4R_{TEmax}}. \quad (5)$$

В выражении (5) эксплуатационные свойства материалов учитываются через коэффициент термоэлектрической эффективности  $ZT$ , имеющий размерность (1/К). Этот коэффициент определяет, насколько эффективно материал может преобразовывать тепловую энергию в электрическую при условии, что температурный градиент составляет 1 К:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T, \quad (6)$$

где  $\sigma$  — электропроводность;

$k$  — теплопроводность.

Высокие значения  $\alpha$ ,  $\sigma$  и низкие значения  $k$  позволяют получить высокий  $ZT$  и, следовательно, высокий КПД элементов Пельтье.

Условия окружающей среды ячейки определяются температурами на горячей, холодной и боковой поверхностях; последняя предполагает отсутствие теплопередачи, поэтому не учитывается при расчете. Температура на горячей стороне описывается синусоидальной функцией:

$$T_h = T_{h,\beta=0} + \beta_h \sin\left(\frac{2\pi T}{\lambda_h}\right), \quad (7)$$

где  $T_{h,\beta=0}$  — температура на горячей поверхности в момент, когда амплитуда равна нулю;

$\beta$  — амплитуда температуры (К);

$t$  — время, мин;

$\lambda$  — период, мин [7].

Синусоидально изменяющаяся температура холодной поверхности задается формулой:

$$T_c = T_{c,\beta=0} + \beta_c \sin\left(\frac{2\pi T}{\lambda_c} + \omega\right), \quad (8)$$

где  $\omega$  — фазовый угол изменения температуры между двумя поверхностями. Экспериментально доказано, что чем больше фазовый угол  $\omega$ , тем больше разница амплитуд между  $T_h$  и  $T_c$ , и, следовательно, будет выше КПД выработки электроэнергии [7]. КПД ТЭГ выражается следующей формулой:

$$\eta = \frac{(T_h - T_c)(\gamma - 1)}{T_c + \gamma T_h}, \quad (9)$$

где  $\gamma$  — параметр, изменяющийся в зависимости от средней температуры  $T$  [8]. КПД модуля является важным фактором, особенно когда доступное тепло ограничено, максимальный КПД преобразования определяется по следующему отношению:

$$\eta = \frac{P_{max}}{Q_{hot}}, \quad (10)$$

где  $Q_{hot}$  — тепловой поток через горячую сторону элемента;

$P_{max}$  — измеренная мощность при определенной нагрузке.

Для оценки потенциала использования геотермальной энергии был выбран Камчатский край.

В этой местности находятся горячие источники, среднегодовая температура составляет около 5 °С, как указано на рисунке 3. Температура термальных вод варьируется от 30 °С до 70 °С, что позволяет определить температурную разницу для тестирования КПД генерации энергии с использованием термоэлектрического генератора на основе элементов Пельтье [9].

### Результаты исследования потенциала использования геотермальной энергии

Для подтверждения эффективности процесса в экспериментальных условиях система оборудована теплогенератором, способным увеличивать температурный градиент до  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  [10–12]. Это позволяет оценить максимально достижимое напряжение на выходе системы. В тестируемом модуле термоэлектрического генератора используются элементы ТЕС1-12706, состоящие из 104 пар, соединённых смешанным образом, что обеспечивает генерацию напряжения и тока, необходимых для работы электрических устройств [8, 13, 14].

Экспериментальное поведение термодинамической системы, наблюдаемое в ячейках Пельтье, показывает, что электрический ток является функцией квадрата разности температур:

$$I = 0,0032(\Delta T)^2 - 0,0613\Delta T + 0,0713. \quad (11)$$

Для определения максимального КПД системы созданы специальные экспериментальные условия, при которых температура окружающей среды поддерживается на уровне  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как максимальная температура может дости-

гать  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Важно отметить, что за счет эффекта теплопроводности конечная температура на холодной поверхности поднялась до  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  и не изменялась до окончания эксперимента.

На рисунке 4 представлена зависимость вырабатываемой мощности от тока нагрузки, демонстрирующая полностью линейный тренд, начиная от тока  $50\text{ mA}$ .

Представленные на рисунке 4 результаты измерения мощности соответствуют параллельно-последовательной схеме включения элементов Пельтье, выявлено, что зависимость можно считать линейной при токах нагрузки от  $50$  до  $1500\text{ mA}$ .

На рисунке 5 отображена зависимость напряжения холостого хода от перепада температур  $\Delta T$ , измерения производились без подключения внешнего сопротивления. Из полученных данных следует, что максимальное напряжение наблюдается при окружающей температуре  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температуре термальной воды  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Нужно отметить, что при более низкой температуре окружающей среды КПД ячейки Пельтье увеличивается, как видно из рисунка 6.

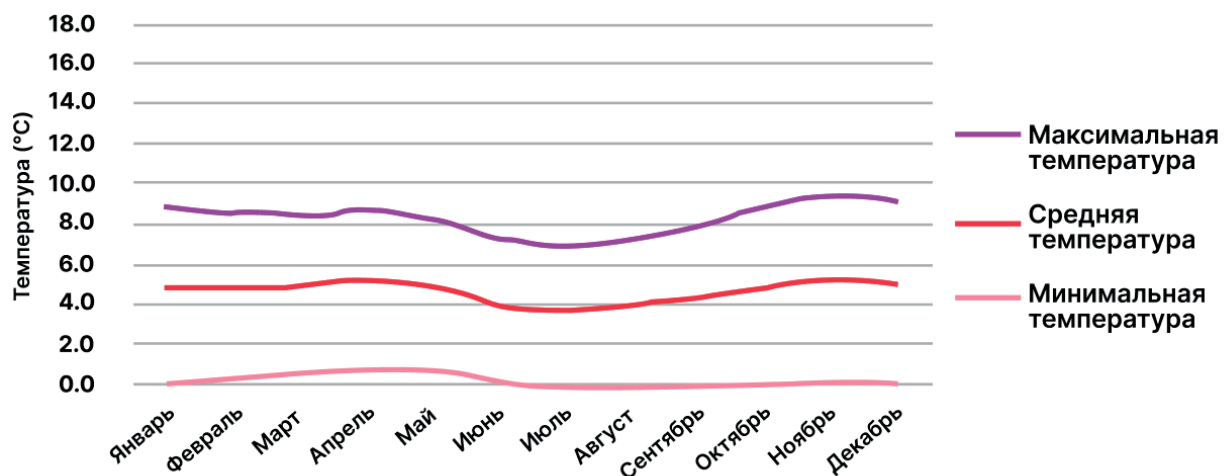
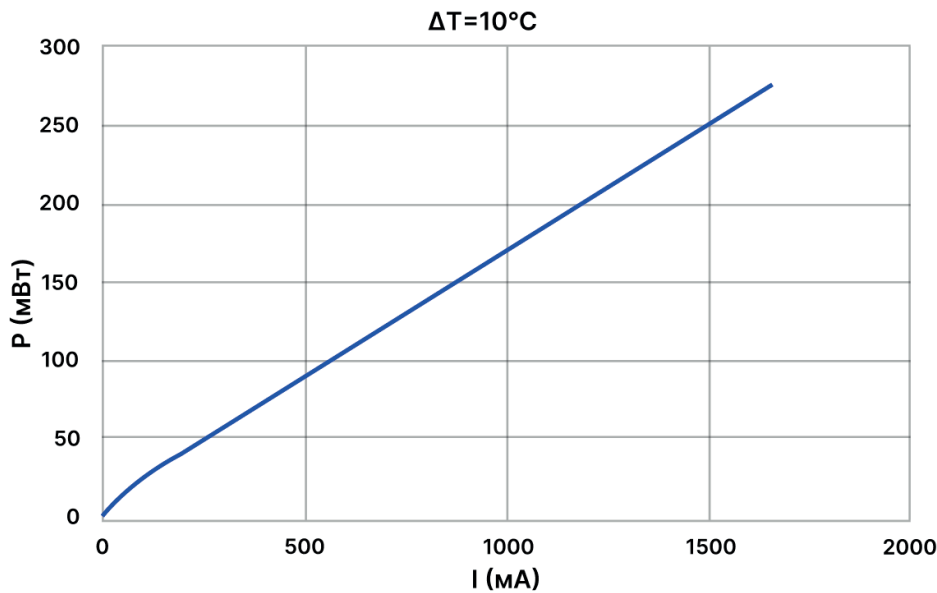


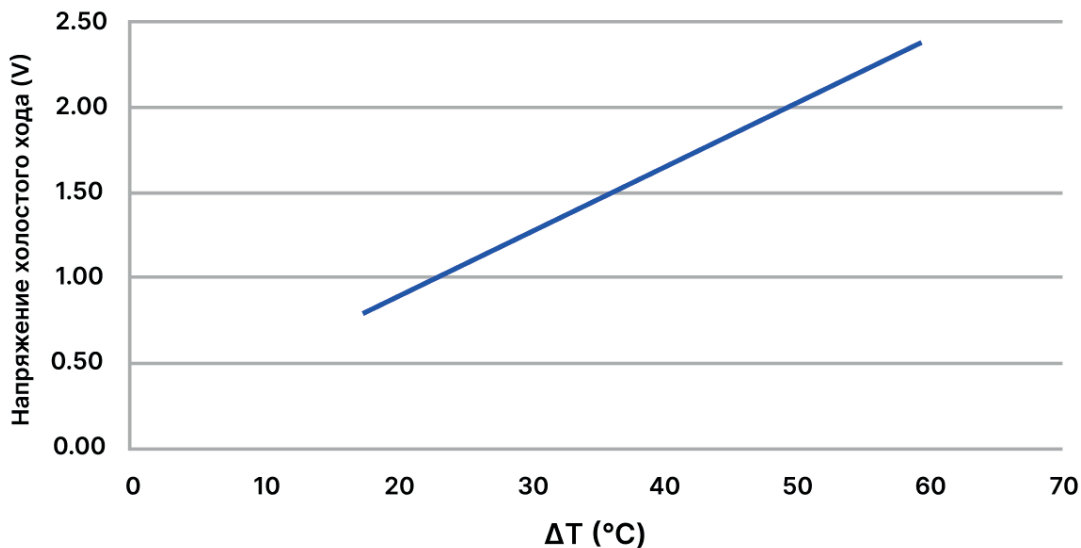
Рисунок 3. Годовые графики минимальной, средней и максимальной температур в Камчатском крае

Figure 3. Annual graphs of minimum, average and maximum temperatures in the Kamchatka Territory



**Рисунок 4.** Результат измерения мощности на элементах Пельтье

**Figure 4.** Result of power measurement on Peltier elements



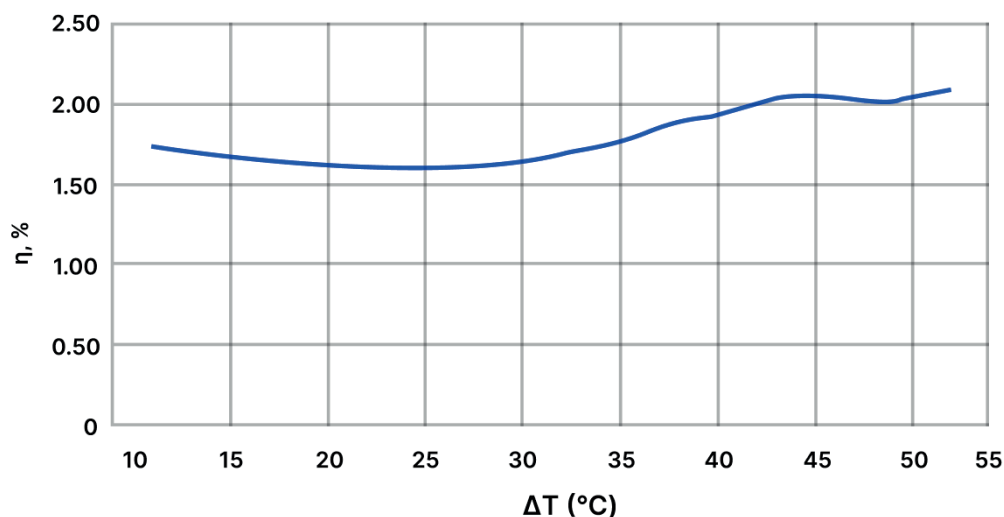
**Рисунок 5.** Зависимость напряжения холостого хода от разницы температур  $\Delta T$

**Figure 5.** Dependence of open circuit voltage on temperature difference  $\Delta T$

Было выявлено, что КПД устройства растет с увеличением разницы температур. Таким образом, при разнице температур около 55 °C КПД составляет примерно 2 %. Несмотря на то, что эти проценты кажутся малыми, основной целью использования пластин Пельтье является не столько генерация энергии, сколько их применение в ином, хотя и схожем по принципу контексте [15].

Хотя по данным графика (рисунок 6) нельзя вывести точное уравнение КПД для каждой разницы температур, он наглядно демонстрирует потенциал использования пластин Пельтье. Отсюда можно заключить, что во всем полезном диапазоне температур КПД устройства будет приблизительно соответствовать указанным значениям [7, 16].





**Рисунок 6.** Зависимость КПД элемента Пельтье от разницы температур  $\Delta T$

**Figure 6.** Dependence of the efficiency of the Peltier element on the temperature difference  $\Delta T$

### Выводы

В рамках проведенного исследования установлено, что в регионах с термальными водами горного массива температурные градиенты позволяют осуществлять генерацию электричества для его последующего преобразования в другие виды энергии в устройствах малой мощности или для накопления. Экспериментальный модуль теплопередачи вместе с системой термоэлектрического генератора позволил выявить диапазоны

температурных градиентов, пригодных для генерации энергии, что открывает возможности для адаптации и оптимизации условий работы в реальных сценариях использования как с естественными, так и с искусственными источниками тепла.

Разработка математической модели процесса дает возможность определить идеальные условия, при которых ячейки Пельтье могут работать с максимальной эффективностью в реальных условиях.

### Список источников

1. Соловьев Б.А., Гамисония Г.К., Димукашева Г.Е., Коломеец Д.А. Применение термоэлектрического модуля Пельтье в технологиях охлаждения и генерации электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 127–136. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-127-136. EDN: LUATMW.
2. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические генераторы промышленного применения. Часть 1 // Современная электроника. 2016. Т. 1. № 1. С. 2.
3. Романов К.В., Моторин А.В., Соломин Е.В., Ковалёв А.А., Дьяченко И.И., Галеев Р.Г. Моделирование термоэлектрического модуля Пельтье в режиме генерации электроэнергии в среде ANSYS Workbench // Вестник Магнитогорского государственного технического университета

им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 4. С. 57–64. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64. EDN: JUVQPL.

4. Синицин А.М., Уланов В.А. Измерительная камера прибора контроля основных характеристик материалов, используемых в термоэлектрических генераторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 110–115. EDN: WMCDHD.

5. Хвесюк В.И., Останко Д.А., Скрыбин А.С., Цыганков П.А., Челмодейев Р.И., Чирков А.Ю. Предельная эффективность термоэлектрического преобразования теплоты в высокотемпературных энергоустановках // Машиностроение и компьютерные технологии. 2016. № 3. С. 81–105. DOI: 10.7463/0316.0835477.

6. Марков О.И. Влияние вида распределения концентрации носителей заряда на термоэлектрическую эффективность // Термоэлектрики и их применения. 2015. С. 262–267. EDN: YPAILB.

7. Леонтьев А.И., Онищенко Д.О., Арутюнян Г.А. Выбор оптимального метода интенсификации теплообмена для повышения эффективности термоэлектрического генератора // Тепло-физика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 5. С. 779–787. EDN: WWDCPF.

8. Habibullah, Hastuti, Muhammad T., Putra D.S., Sardi J. Portable Thermal Electricity Generator Using the Seebeck Effect of Peltier as an Alternative Energy // 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA). Surabaya, Indonesia, 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427831.

9. Новицкий А.П., Ховайло В.В., Мори Т. Современные разработки и достижения в области термоэлектрических материалов на основе BiCuSeO // Российские нанотехнологии. 2021. Т. 16. № 3. С. 324–338. DOI: 10.1134/S1992722321030158. EDN: LJLBTТ.

10. Артюхов Д.И. Исследование влияния концентрации электролита на параметры термоэлектрoхимической ячейки // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19. № 4. С. 212–222. DOI: 10.18500/1608-4039-2019-19-4-212-222. EDN: BRFDBM.

11. Коротков А.С., Лобода В.В. Моделирование и экспериментальное исследование термоэлектрических генераторов // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2016. № 1. С. 53–57. EDN: WDLEEF.

12. Бурцев А.П. Использование термоэлектрического источника электроснабжения для обеспечения автономной работы теплогенераторов // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее: сб. науч. ст. 5-й Всеросс. науч. конф.: в 4 т. Курск, 20–21 октября 2022 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. Т. 3. С. 337–341. EDN: BCVQFL.

13. Nesarajah M., Frey G. Thermoelectric Power Generation: Peltier Element Versus Thermoelectric Generator // IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy, 2016. P. 4252–4257. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793029.

14. Skala A., Waradzyn Z. Investigation and Determination of Efficiency of the Waste Heat Recovery System Using Peltier Modules // 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS). Kielce, Poland, 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/EPMCCS.2018.8596493.

15. Шостаковский П. Современные термоэлектрические источники питания электронных

устройств // Компоненты и технологии. 2015. № 1. С. 90–95. EDN: THVGMT.

16. Симкин А.В., Бирюков А.В., Репников Н.И., Ховайло В.В. Термоэлектрическая эффективность низкотемпературных генераторных материалов, возможности ее повышения // Вестник Челябинского государственного университета. 2015. № 7 (362). С. 21–29. EDN: TYIEPT.

## References

1. Solov'ev B.A., Gamisoniya G.K., Dimukasheva G.E., Kolomeets D.A. Primenenie termoelektricheskogo modulya Pel't'e v tekhnologiyakh okhlazhdeniya i generatsii elektroenergii [Application of Peltier Thermoelectric Module in Cooling and Electric Power Generation Technologies]. *Elektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Complexes and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 127–136. Doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-127-136. EDN: LUATMW. [in Russian].

2. Shostakovskiy P.G. Termoelektricheskie generatory promyshlennogo primeneniya. Chast' 1 [Industrial Usage Generators. Part 1]. *Sovremennaya elektronika — Modern Electronics*, 2016, Vol. 1, No. 1, pp. 2.

3. Romanov K.V., Motorin A.V., Solomin E.V., Kovalyov A.A., D'yachenko I.I., Galeev R.G. Modelirovanie termoelektricheskogo modulya Pel't'e v rezhime generatsii elektroenergii v srede ANSYS [Workbench Simulating the Peltier Thermoelectric Module in the Electricity Generation Mode in the ANSYS Workbench Environment]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova — Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2018, Vol. 16, No. 4, pp. 57–64. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64. EDN: JUVQPL. [in Russian].

4. Sinitsin A.M., Ulanov V.A. Izmeritel'naya kamera pribora kontrolya osnovnykh kharakteristik materialov, ispol'zuemykh v termoelektricheskikh generatorakh [The Measuring Chamber of the Device Controlling the Basic Characteristics of the Materials Used in Thermoelectric Generators]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki — News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2016, No. 5–6, pp. 110–115. EDN: WMCDDH. [in Russian].

5. Khvesyuk V.I., Ostanko D.A., Skryabin A.S., Tsygankov P.A., Chelmodeev R.I., Chirkov A.Yu. Predel'naya effektivnost' termoelektricheskogo preobrazovaniya teploty v vysokotemperaturnykh energoustanovkakh [Maximum Efficiency of Thermoelectric Heat Conversion in High-

Temperature Power Devices]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii — Mechanical Engineering and Computer Technologies*, 2016, No. 3, pp. 81–105. DOI: 10.7463/0316.0835477. [in Russian].

6. Markov O.I. Vliyanie vida raspredeleniya koncentratsii nositeley zaryada na termoelektricheskuyu effektivnost' [Influence of the Type of Charge Carrier Concentration Distribution on Thermoelectric Efficiency]. *Doklady mezhdunarstvennot konferentsii «Termoelektriki i ikh primeneniya»* [Materials of Interstate Conference «Thermoelectrics and Their Applications»]. 2015, pp. 262–267. EDN: YPAILB. [in Russian].

7. Leont'ev A.I., Onishhenko D.O., Arutyunyan G.A. Vychor optimal'nogo metoda intensivatsii teploobmena dlya povysheniya effektivnosti termoelektricheskogo generatora [Selecting the Optimum Method of Heat Transfer Intensification to Improve Efficiency of Thermoelectric Generator]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, Vol. 23, No. 5, pp. 779–787. EDN: WWDCPF. [in Russian].

8. Habibullah, Hastuti, Muhammad T., Putra D. S., Sardi J. Portable Thermal Electricity Generator Using the Seebeck Effect of Peltier as an Alternative Energy. *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA)*, Surabaya, Indonesia, 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427831.

9. Novickij A.P., Hovajlo V.V., Mori T. Sovremennye razrabotki i dostizheniya v oblasti termoelektricheskikh materialov na osnove BiCuSeO [Modern Developments and Achievements in the Field of Thermoelectric Materials Based on BiCuSeO]. *Rossiyskie nanotekhnologii — Rossiyskie Nanotekhnologii*, 2021, Vol. 16, No. 3, pp. 324–338. DOI: 10.1134/S1992722321030158. EDN: LJLBTT. [in Russian].

10. Artyukhov D.I. Issledovanie vliyaniya kontsentratsii elektrolita na parametry termoelektrokhimicheskoy yacheyki [Investigation of the Influence of the Electrolyte Concentration on the Parameters of the Thermoelectrochemical Cell]. *Elektrokhimicheskaya energetika — Electrochemical Energetics*, 2019, Vol. 19, No. 4, pp. 212–222. DOI: 10.18500/1608-4039-2019-19-4-212-222. EDN: BRFDBM. [in Russian].

11. Korotkov A.S., Loboda V.V. Modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie termoelektri-

cheskikh generatorov [Simulation and Experimental Investigation of Thermoelectric Generators]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroelektronika — Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics*, 2016, No. 1, pp. 53–57. EDN: WDLEEF. [in Russian].

12. Burtsev A.P. Ispol'zovanie termoelektricheskogo istochnika elektrosnabzheniya dlya obespecheniya avtonomnoy raboty teplogeneratorov [Use of Thermoelectric Power Supply Source to Ensure Autonomous Operation of Heat Generators]. *Sbornik nauchnykh statey 5-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya Rossii: Molodezhnyj vzglyad v budushchee». V 4 t. Kursk, 20–21 oktyabrya 2022 goda* [Collection of Scientific Articles of the 5th All-Russian Scientific Conference «Problems and Prospects of Russia's Development: Youth View of the Future»: in 4 Vol.]. Kursk, Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2022, Vol. 3, pp. 337–341. EDN: BCVQFL. [in Russian].

13. Nesarajah M., Frey G. Thermoelectric Power Generation: Peltier Element Versus Thermoelectric Generator. *IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 4252–4257, DOI: 10.1109/IECON.2016.7793029.

14. Skala A., Waradzyn Z. Investigation and Determination of Efficiency of the Waste Heat Recovery System Using Peltier Modules. *2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS)*, Kielce, Poland, 2018, pp. 1–5, DOI: 10.1109/EPMCCS.2018.8596493.

15. Shostakovskiy P. Sovremennye termoelektricheskie istochniki pitaniya elektronnykh ustroystv [Modern Thermoelectric Power Supplies for Electronic Devices]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2015, No. 1, pp. 90–95. EDN: THVGMT. [in Russian].

16. Simkin A.V., Biryukov A.V., Repnikov N.I., Khovaylo V.V. Termoelektricheskaya effektivnost' nizkotemperaturnykh generatornykh materialov, vozmozhnosti ee povysheniya [Figure of Merit of Materials for Low-Temperature Thermoelectric Generators and the Ways to Its Enhancements]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta — Bulletin of Chelyabinsk State University*, 2015, No. 7 (362), pp. 21–29. EDN: TYIEPT. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 02.04.2024; принята к публикации 04.04.2024.

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 02.04.2024; accepted for publication 04.04.2024.

Научная статья

УДК 681.51

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-65-74

## СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОДАЧИ И ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

**Павел Витальевич Зыкин****Pavel V. Zykin**

аспирант кафедры «Электроэнергетика»,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия

**Рустам Нуриманович Хамитов****Rustam N. Khamitov**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника»,  
Омский государственный технический университет, Омск, Россия;  
профессор кафедры «Электроэнергетика»,  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Сергей Николаевич Жеребцов****Sergey N. Zherebtsov**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электроэнергетика»,  
Тюменский индустриальный университет,  
Тюмень, Россия

**Лидия Сергеевна Ганичева****Lidia S. Ganicheva**

магистрант факультета инфокоммуникационных технологий (ФИКТ),  
Национальный исследовательский университет ИТМО,  
Санкт-Петербург, Россия

### Актуальность

Современные требования к уровню шероховатости поверхности деталей при токарной обработке постоянно возрастают. Для того чтобы обеспечить их, помимо использования современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и оснастки требуется минимизировать величины отклонений полученной шероховатости от заданной в технологическом процессе обработки детали. На данный момент без применения специализированных систем управления шероховатость Ra 6,3 обработки поверхности детали с квалите-

### Ключевые слова

система управления,  
токарный станок с ЧПУ,  
деталь, система  
управления  
электроприводами,  
шероховатость,  
функции принадлежности



том IT 10 обеспечивается с погрешностью  $\pm 0,12$  мм. Данная задача может быть выполнена за счет специализированных следящих систем управления электроприводом токарного станка с ЧПУ. Применение системы управления позволит управлять недетерминированными параметрами резания (скорость резания, подача режущего инструмента, глубина резания шероховатость) и, в конечном итоге, обеспечить величину шероховатости, заданную технологическим процессом обработки детали.

#### **Цель исследования**

Разработать модель следящей системы управления параметрами электропривода подачи и главного движения токарного станка с ЧПУ.

#### **Методы исследования**

Синтез модели системы управления выполнен при помощи программы MATLAB SIMULINK.

#### **Результаты**

В рамках проведенного исследования использовался программный пакет MATLAB SIMULINK, позволяющий моделировать схемы электроустановок, станков с ЧПУ, а также при помощи данного программного обеспечения выполнена разработка модели следящей системы управления электроприводом подачи и электроприводом главного движения токарного станка с ЧПУ. В результате работы следящей системы управления появилась возможность определять величины недетерминированных параметров резания, которые позволят обеспечить точность механической обработки поверхностей заготовки с минимальной величиной погрешности. К таким параметрам относятся точность размеров заготовки, шероховатость ее поверхности.

**Для цитирования:** Зыкин П. В., Хамитов Р. Н., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С. Синтез следящей системы управления электроприводами подачи и главного движения токарного станка с числовым программным управлением // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 65-74. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-65-74>.

Original article

## **SYNTHESIS OF FUZZY LOGIC ROUGHNESS CONTROL SYSTEM BY MATLAB SIMULINK SOFTWARE PACKAGE**

#### **Relevance**

Modern requirements for turning accuracy of parts during turning are constantly increasing. In order to provide them, in addition to using modern CNC machines and tooling, it is necessary to minimize errors arising during the operation of the machine drives (main and feed drives), as well as the cutting tool that is used during the process. This task can be carried out using specialized tracking systems for controlling the electric drive of a CNC lathe. The use of the control system allows you to control non-deterministic cutting parameters and ultimately provide the required amount of roughness.

#### **Aim of research**

The main aims of the research develop a model of the tracking system for controlling the feed and main motion of the CNC lathe.

#### **Research methods**

The control system model is synthesized using the MATLAB SIMULINK program.

#### **Keywords**

control system, CNC lathe, part, electric drive control system, roughness, belonging functions



## Results

As part of the study, the MATLAB SIMULINK software package was used to develop a model of the tracking system for controlling the feed motors and the main motion of the CNC lathe. As a result of the operation of the servo control system, it has become possible to determine the values of non-deterministic cutting parameters, which will ensure the accuracy of processing the surfaces of the workpiece with a minimum error value.

**For citation:** Zykin P. V., Khamitov R. N., Zherebtsov S. N., Ganicheva L. S. Sintez sledyashchei sistemy upravleniya elektroprivodami podachi i glavnogo dvizheniya tokarnogo stanка s chislovyim programmnyim upravleniem [Synthesis of Fuzzy Logic Roughness Control System by MATLAB SIMULINK Software Package]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 65-74 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-65-74>.

## Введение

Современные требования к точности точения деталей при токарной обработке постоянно возрастают [1, 2]. Для того чтобы их обеспечить помимо использования современных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и оснастки требуется минимизировать величины отклонений полученной шероховатости от заданной в технологическом процессе обработки детали [2, 3]. В ходе обработки заготовки традиционными методами точения на обрабатываемой поверхности радиальные неровности различной величины, которые влияют на размер шероховатости.

Представленные выше продольные неровности возникают по причине несоответствия требуемым значениям недетерминированных параметров резания, таких как скорость резания, сила резания, глубина резания [1, 3].

Отсутствие возможности регулировать значения данных показателей влечет за собой снижение точности обработки заготовки, в результате чего полученные значения величины шероховатости не будут соответствовать требуемым. Наиболее эффективный способ решения выше описанной проблемы — это применение в процессе обработки следящей системы управления электроприводами подачи и главного движения токарного станка с ЧПУ [2, 4]. Электронный блок со следящей системой управления разра-

ботан на базе токарного станка с ЧПУ JSK-1620 CNC с ЧПУ SIEMENS 808DA.

## Синтез следящей системы управления электроприводами подачи и главного движения токарного станка с ЧПУ

Для моделирования системы управления приняты следующие параметры:

*Обрабатываемое изделие* — вал диаметром 100 мм и длиной обрабатываемой части изделия 1000 мм выполнен из конструкционной углеродистой стали марки 40 ХН. Химический состав стали: Si — 0,17–0,37 %; Mn — 0,5–0,8 %; Ni — 1,0–1,4 %; S — до 0,035 %; P — до 0,035 %; Cr — 0,45–0,75 %; Cu — до 0,3 %; Fe —  $\approx 96$  %. Механические свойства:  $\sigma_B = 980$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 785$  МПа;  $\delta_5 = 11$  %;  $\psi = 45$  %;  $K_{CU} = 690$  кДж/м<sup>2</sup>, HRC = 25–30 ед. согласно ГОСТ 4543-71.

Модель следящей системы управления электроприводами подачи главного движения токарного станка с ЧПУ имеет многокомпонентную структуру, в состав которой входит несколько взаимосвязанных подсистем.

Модель системы управления состоит из двух взаимосвязанных подсистем: 1-ая модель подсистемы привода подачи резца вдоль обрабатываемого изделия и 2-ая модель электропривода главного движения электродвигателя токарного станка с ЧПУ. В качестве двигателя главного движения применяется электродви-

гатель SIMOTICS S-1PH8 мощностью 7,5 кВт с частотным регулятором марки ACS880 [5].

Подсистема привода подачи осуществляет регулирование показателей скорости подачи режущего инструмента и состоит из следующих функциональных блоков: блока хранения входных параметров шероховатости [6]; блоков вывода числовых параметров на экран [4] (Score 2); сумматоров; блока нечеткой логики, осуществляемого регулирование величины скорости подачи режущего инструмента; блока «Transfer Fcn1», который моделирует процесс резания обработки и блока «Transfer Fcn6», хранящего в себе передаточную функцию электрического сигнала для регулирования системы слежения.

Подсистема привода главного движения электродвигателя осуществляет регулирование показателей резания за счет определения вспомогательных величин, таких как угловая скорость вращения вала электродвигателя. Подсистема состоит из таких блоков, как «Transfer Fcn3» [4, 7], обеспечивающего работу частотного преобразователя напряжения в процессе вращения вала электродвигателя.

Кроме того, в структуре подсистемы присутствуют функциональный блок «Transfer Fcn2», который моделирует пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор тока в контуре тока следящей системы главного движения, и функциональный блок «Transfer Fcn4», который моделирует асинхронный двигатель главного привода.

Входной параметр системы управления — это величина заданной величины шероховатости, числовое значение которой устанавливается в функциональном блоке «Ra<sub>зад</sub>».

Данная величина пересчитывается в величину подачи движения режущего инструмента посредством передаточной

функции, представленной в виде формулы [8]:

$$S_{\text{зад}} = (Ra_{\text{зад}} \cdot \frac{r^{0,97}}{43,9})^{1,88}. \quad (1)$$

Формула (1) выведена из математической зависимости, которая позволяет определять величину средней шероховатости [8]:

$$(Ra) = (\frac{43,9 \cdot S^{1,88}}{r^{0,97}}), \quad (2)$$

где  $Ra$  — средняя шероховатость обработанной поверхности изделия, мкм;

$S$  — подача, мм/об;

$r$  — радиус при вершине режущей пластины резца, мм.

Система управления следит за изменениями величины скорости подачи, после чего выполняется расчет скорости подачи.

Далее система управления следит за изменениями величины скорости подачи, после чего фактическое значение данного параметра используется при определении конечных показателей таких параметров, как подача режущего инструмента, сила и мощность резания.

В целом данная следящая система является трехконтурной, она включает в себя:

1. Контур тока: функции данного контура [9] в системе управления выполняет блок «Transfer Fcn6»;

2. Контур скорости электродвигателя продольной подачи в его структуру [10] входит пропорциональный регулятор. Кроме того, в структуру контура скорости входит интегрирующий блок, который позволяет определять величину угловой скорости вращения двигателя и величину обратной связи этого контура с учетом момента механической части инерции данного механизма (винт гайка; коробка передач; ременная передача двигателя);

3. Контур положения: данный контур входит в состав блока «Исполнительный механизм» [9, 10], который

посредством линии обратной связи замыкает данный контур на сумматоре, на второй вход которого поступает сигнал заданной величины скорости подачи режущего инструмента вдоль главной линии обработки. Схема блоков управления электроприводами подачи главного двигателя токарного станка представлена на рисунке 1.

Процесс регулирования параметров резания осуществляет блок «Регулятор Нечеткой логики» [5]. На вход регулятора параллельно по величине тока поступают два сигнала: сигнала рассогласования (ошибки регулирования) и производной рассогласования, которые преобразуются посредством функционального блока «Преобразователь функции 5», после чего поступают в блок регулирования. Сигнал рассогласования отображается в системе управления по треугольному закону распределения, а его производная — по сигмоидальному закону распределения [11]. Графики функций принадлежности регулирования сигнала представлены на рисунках 2 и 3.

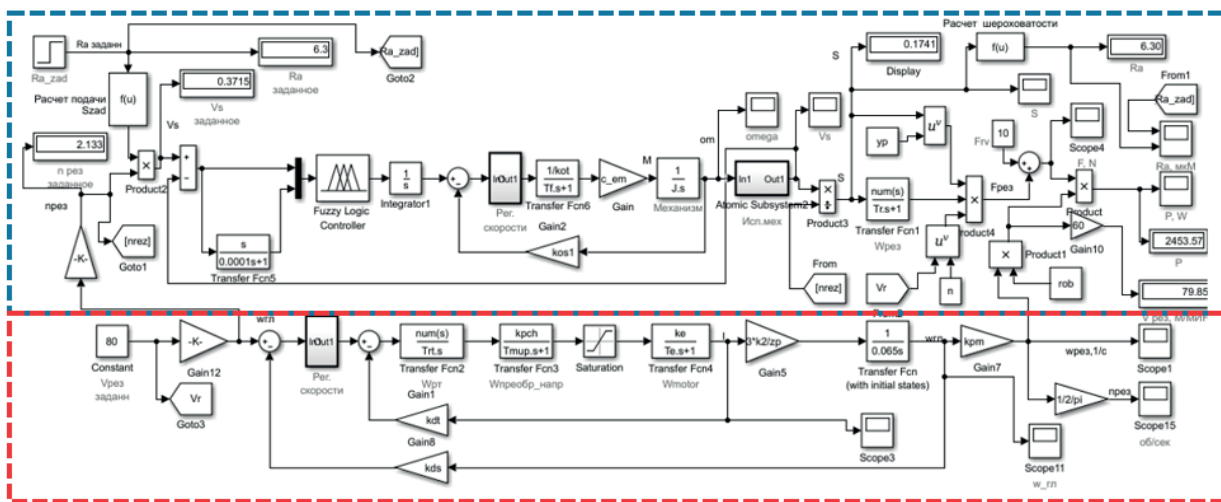
Треугольный закон распределения — это математическая функция, описываю-

щая вероятность различных значений случайной величины, представленной в виде треугольника. Функции принадлежности [7], используемые в разработанной системе управления, представлены на рисунках 2, 3 [12].

На рисунках 2, 3 графики показывают используемые термы показателей сигналов. Они показывают, по какому алгоритму (функции принадлежности) будет осуществлять регулирование следящая система управления, так  $BN$  — это большое отрицательное значение отклонения;  $N$  — отрицательное значение;  $Z$  — нулевое значение;  $P$  — положительное значение отклонения;  $BP$  — большое положительное значение. Каждый из используемых термов имеет числовой промежуток. В случае, если значение регулируемой величины в него попадет, следящая система управления выполнит регулирование именно по этому терму.

Функции принадлежности [7], на основе которых будет формироваться значение величины шероховатости после регулирования подачи режущего инструмента, представлены на рисунке 4.

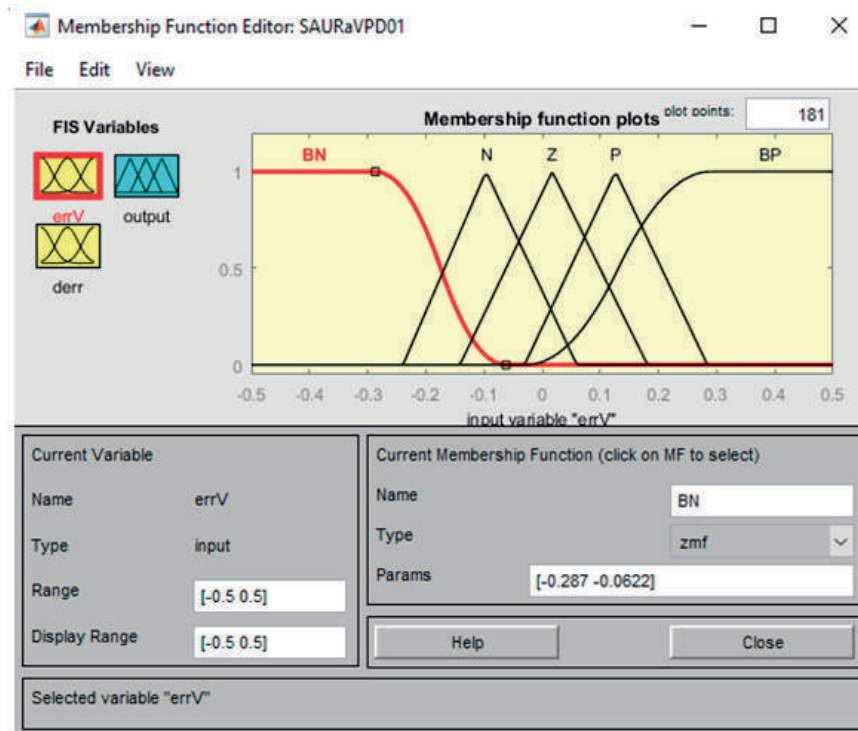
Привод подачи



Привод главного движения

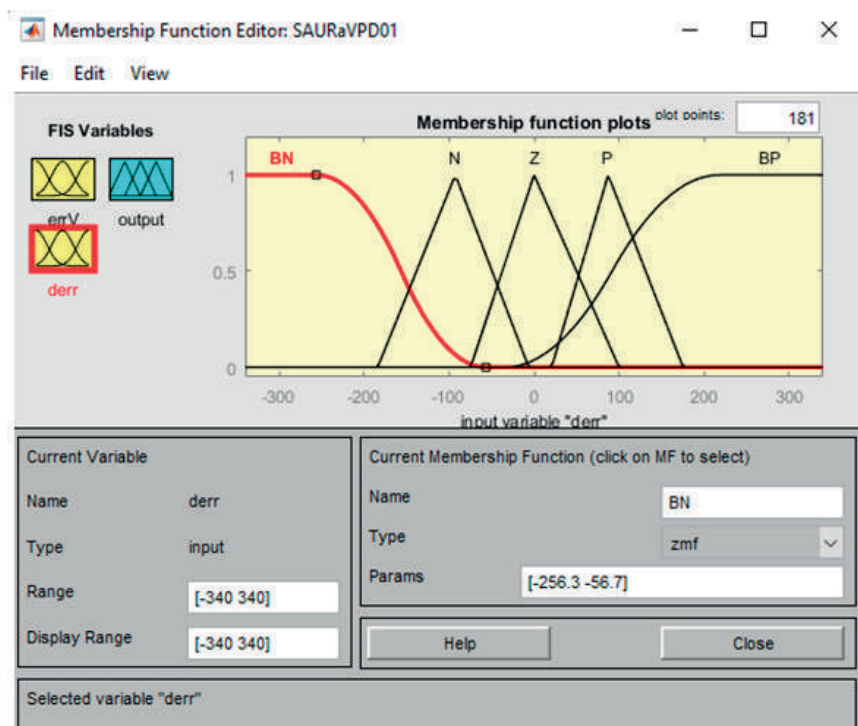
**Рисунок 1.** Принципиальная схема блоков управления электроприводами подачи главного движения токарного станка с ЧПУ

**Figure 1.** Schematic diagram of main motion motor drive control system model for CNC lathe



**Рисунок 2.** Функции принадлежности регулирования сигнала рассогласования «err»

**Figure 2.** Control function of error signal «err»



**Рисунок 3.** Функции принадлежности регулирования производной сигнала рассогласования «der»

**Figure 3.** Function of control of derivative of error signal «der»

Стоит отметить возможность следящей системы управления посредством функционального блока «Transfer Fcn1» моделировать процесс резания, определять величину силы резания.

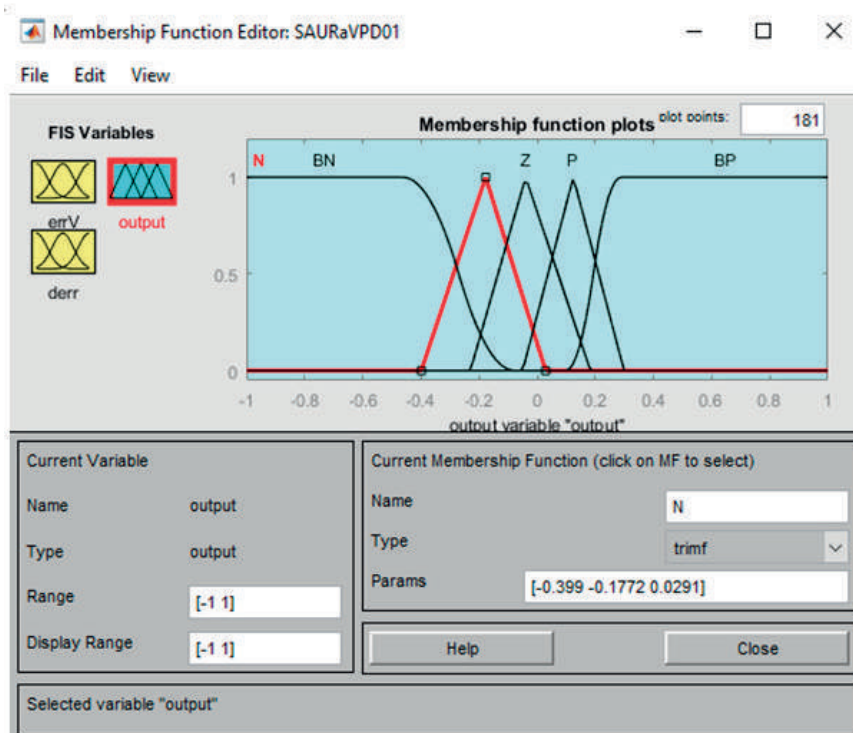
Величина силы резания определяется в системе управления посредством вычислений, проводимых блоком «Product4», в него заложены математические зависимости коэффициента пере-

дачи Р-регулятора, входящего в структуру контура скорости перемещения резца.

Модель привода главного движения системы управления посредством блока «Gain12» позволяет определять величину угловой скорости [10] за счет пересчета изначально заданной величины скорости резания.

Значение угловой скорости — это задающее значение следящей системы,





**Рисунок 4.** Функции принадлежности регулирования шероховатости поверхности

**Figure 4.** Surface roughness control belonging functions

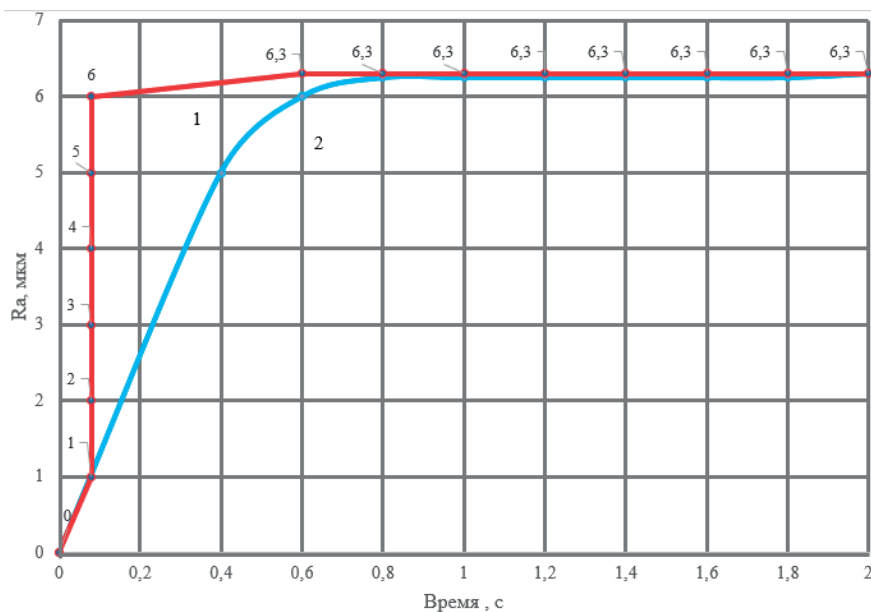
базирующейся на модели асинхронного электродвигателя.

В разработанной системе управления в контур скорости помимо контура тока входит блок «Gain5», посредством которого есть возможность определять величину угловой скорости вращения вала электродвигателя.

Результат функционирования системы управления [6–8] отображается в виде

графиков изменения шероховатости при механической обработке поверхности вала резцом, изменения силы резания при точении; изменения мощности резания токарного станка с ЧПУ. Результаты измерения полученной величины шероховатости поверхности вала после обработки резцом представлены на рисунке 5.

На рисунке 5 график 1 — величина шероховатости, которую требуется полу-



**Рисунок 5.** График изменения показателя шероховатости при механической обработке поверхности вала резцом

**Figure 5.** Graph of roughness index change during machining of shaft surface by cutter



чить по технологическому процессу обработки детали, а график 2 — величина шероховатости, полученная в ходе работы следящей системы управления.

Также следящая система управления [5, 11, 12] позволяет оценить изменения величины силы резания; так, шероховатость поверхности 6,3 мкм обеспечивается при силе резания 1850 Н. Время регулирования находится в диапазоне 0,8–1,2 с. График изменения величины силы резания представлен на рисунке 6.

График, представленный на рисунке 6, показывает, что требуемая величина

шероховатости обрабатываемой поверхности обеспечивается при силе резания, равной 1850 Н.

Анализ графика на рисунке 7 показывает, что переходный процесс в системе подачи, установление параметра шероховатости выполняется за 0,8 с, а требуемая величина шероховатости обрабатываемой поверхности обеспечивается при мощности резания, равной 2300 Вт.

Процессы, отражающие регулирование показателей электродвигателя главного движения, имеют длительность

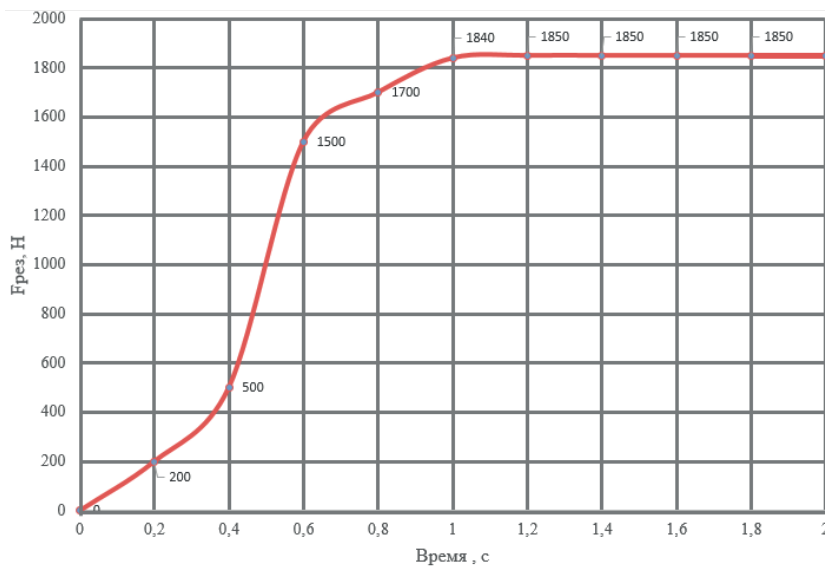


Рисунок 6. График изменения силы резания при точении

Figure 6. Plot of the Change in Turning Cutting Force

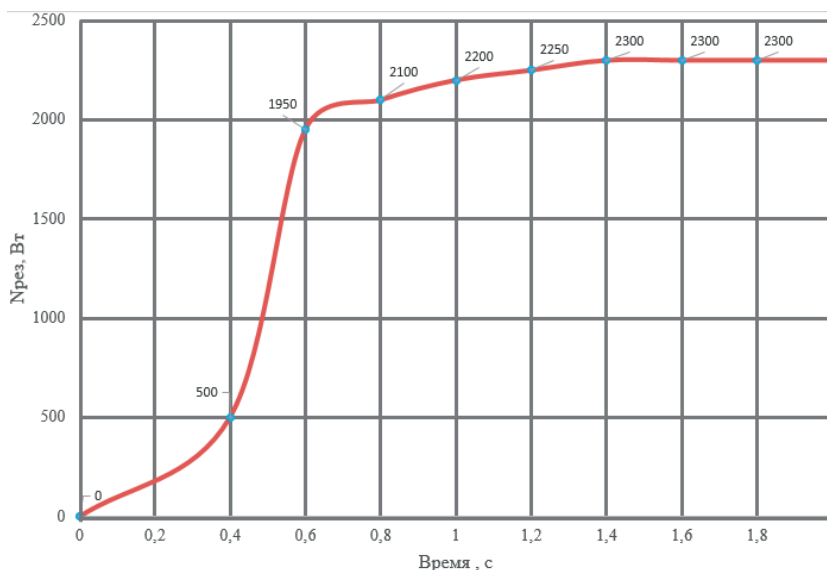


Рисунок 7. График изменения мощности резания токарного станка

Figure 7. CNC Lathe Cutting Power Change Plot

переходного процесса равного 0,8–1,2 с (рисунок 7),

Таким образом, следящая система обеспечивает обработку изделия с заданной точностью IT 10±0,12 мм с шероховатостью поверхности вала Ra 6,3.

### Выводы

В рамках выполненного исследования получены следующие результаты

1. Разработана схема следящей системы управления электроприводами подачи и главного движения токарного станка с ЧПУ. Модель позволит оценивать, анализировать изменения параметров механической обработки изделия в ходе технологического процесса, адаптироваться к изменениям без потери точности обработки поверхности детали.

2. Определены и построены графики функций принадлежности сигнала рассогласования, а также производной рассогласования, на основе которых будет функционировать следящая система управления, так, величины функции принадлежности регулирования сигнала

рассогласования и производной функционируют по законам распределения сигмоидальным (BN — большее отрицательное; BP — большее положительное), законам распределения треугольника (Z — нулевое; P — положительное). Функции принадлежности регулирования шероховатости поверхности функционируют также по сигмоидальным законам распределения (BN — большее отрицательное; BP — большее положительное) и законам распределения треугольника (Z — нулевое; P — положительное).

3. Получен график, показывающий, что переходный процесс в системе подачи, установление параметра шероховатости составляет 0,8 с. Процессы, отражающие главное движение электродвигателя токарного станка, имеют длительность переходного процесса равного 0,8–1,2 с. Таким образом, следящая система управления обеспечивает обработку изделия с заданной точностью IT 10 ± 0,12 с шероховатостью Ra 6,3.

4.

5. Носиров И.С. Построение автоматизированных электроприводных систем металлорежущих станков с нейронными сетями: дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2019. 138 с.

6. Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С. Разработка нечеткой системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на основе совместно используемых функций принадлежности // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 3-4. С. 82-91. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-82-91. EDN: BHNAEE.

7. Enayati M., Derakhshan G., Hakimi S.M. Optimal Energy Scheduling of Storage-Based Residential Energy Hub Considering Smart Participation of Demand Side // Journal of Energy Storage. 2022. No. 49. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104062>.

8. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdulateef J., Hasan A., Mohamad A. An Analysis of Photovoltaic/Supercapacitor Energy System for Improving Self-Consumption and Self-Sufficiency // Energy Reports. 2022. No. 8. P. 680–695. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.021>.

### Список источников

1. Гаврилова С.В. Улучшение динамических характеристик электротехнического многодвигательного судоподъемного комплекса «СЛИП»: дис. ...канд. техн. наук. Ульяновск, 2019. 138 с.

2. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems with Disturbance Observer // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2022. No. 138. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.

3. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2022. P. 137. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.

4. Li D., Deng X., Li C., Zhang X., Fang E. Study on the Space Vector Modulation Strategy of Matrix Converter under Abnormal Input Condition // Alexandria Engineering Journal. 2022. No. 61 (6). P. 4595–4605. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.020>.

9. Li J., Ma J., Sun L., Liu X., Liao H., He D. Mechanistic Insight into the Biofilm Formation and Process Performance of a Passive Aeration Ditch (PAD) for Decentralized Wastewater Treatment // *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2022. No. 16 (7). <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1494-3>.

10. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического регулирования. Киев: Радиомотор, 2008. 972 с. ISBN: 978-966-96178-2-0.

11. Брюханов В.Н., Косов М.Г. Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 2018. 268 с. ISBN 5-217-01484-9.

12. Анухин И.В., Анухин В.И., Любомудров С.А., Мурашкин С.Л. Выбор режимов резания труднообрабатываемых жаропрочных интерметаллидных сплавов тепловизионным методом // *СТИН: научно-технический журнал*. 2015. № 1. С. 16-20. EDN: UMUONZ.

### References

1. Gavrilova S.V. *Uluchshenie dinami-cheskikh kharakteristik elektrotekhnicheskogo mnogodvigatel'nogo sudopod'emnogo kompleksa «SLIP»: dis. ...kand. tekhn. nauk* [Improvement of Dynamic Characteristics of the Electrical Multi-Engine Ship Lifting System «SLIP». Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ul'yanovsk, 2019. 138 p. [in Russian].

2. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems with Disturbance Observer. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022. No. 138. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.

3. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, pp. 137. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.

4. Li D., Deng X., Li C., Zhang X., Fang E. Study on the Space Vector Modulation Strategy of Matrix Converter under Abnormal Input Condition. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, No. 61 (6), pp. 4595–4605. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.020>.

5. Nosirov I.S. *Postroenie avtomatizirovannykh elektroprivodnykh sistem metallo-rezhushchikh stankov s neyronnymi setyami: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Construction of Automated Motor-Operated Systems of Metal Cutting

Machines with Neural Networks. Cand. Engin. Sci. Diss.]. Saint-Petersburg, 2019. 138 p. [in Russian].

6. Khamitov R.N., Zykin P.V., Glazyrin A.S. Razrabotka nechetkoy sistemy upravleniya privodom prodol'noy podachi tokarnogo stanka s ChPU na osnove sovместno ispol'zuemykh funktsiy prinadlezhnosti [Development of Fuzzy CNC Lathe Drive Control System Based on Shared Accessory Functions]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Complexes and Systems*, 2021, No. 3-4, pp. 82-91. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-82-91. EDN: BHNAEE. [in Russian].

7. Enayati M., Derakhshan G., Hakimi S.M. Optimal Energy Scheduling of Storage-Based Residential Energy Hub Considering Smart Participation of Demand Side. *Journal of Energy Storage*, 2022, No. 49. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104062>.

8. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdulateef J., Hasan A., Mohamad A. An Analysis of Photovoltaic/Supercapacitor Energy System for Improving Self-Consumption and Self-Sufficiency. *Energy Reports*, 2022, No. 8, pp. 680–695. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.021>.

9. Li J., Ma J., Sun L., Liu X., Liao H., He D. Mechanistic Insight into the Biofilm Formation and Process Performance of a Passive Aeration Ditch (PAD) for Decentralized Wastewater Treatment. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2022, No. 16 (7). <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1494-3>.

10. Gostev V.I. Nечеткие регуляторы в системах автоматического регулирования [Fuzzy Regulators in Automatic Control Systems]. Kiev, Radiomotor, 2008. 972 p. ISBN 978-966-96178-2-0. [in Russian].

11. Bryukhanov V.N., Kosov M.G. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2018. 268 p. ISBN 5-217-01484-9. [in Russian].

12. Anukhin I.V., Anukhin V.I., Lyubomudrov S.A., Murashkin S.L. Vybór rezhimov rezaniya trudnoobrabatyvaemykh zharoprochnykh intermetallidnykh splavov teplovizionnym metodom [Selection of Cutting Modes of Hard-To-Process Heat-Resistant Intermetallic Alloys by Thermal Imaging Method]. *STIN — Russian Engineering Research*, 2015, No. 1, pp. 16-20. EDN: UMUONZ. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 26.03.2024; принята к публикации 04.04.2024.*

*The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 26.03.2024; accepted for publication 04.04.2024.*

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-75-89

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МАЛОЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ

**Фанис Фанилович Сираев****Fanis F. Siraev**

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

**Роман Вячеславович Кириллов****Roman V. Kirillov**

доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

**Регина Тагировна Хазиева****Regina T. Khazieva**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

О важности использования нетрадиционных источников энергии свидетельствует решение о предоставлении субсидий из федерального бюджета на государственную поддержку технологического присоединения генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В рамках государственной политики, направленной на повышение энергетической эффективности и развитие использования возобновляемых источников энергии, предусмотрены механизмы поддержки стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования ВИЭ.

### Цель исследования

В данной статье осуществляется разработка и исследование силового преобразователя для ветроэнергетики, соответствующего требованиям высокоэффективных альтернативных источников энергии. Разработанный преобразователь может быть использован производителями ветроэнергетических установок для создания эффективных и развивающихся моделей. Статья посвящена анализу слабых мест

### Ключевые слова

ветроустановка,  
ветроэнергетика,  
возобновляемые  
источники энергии,  
преобразователь  
постоянного напряжения



традиционных силовых преобразователей и разработке решений, позволяющих повысить их эффективность и надежность работы.

#### Методы исследования

Эта работа заключается в создании компьютерной модели для системы ветровой энергии в программе Matlab/Simulink. Модель ориентирована на характеристики определенного ветрогенератора и включает в себя элементы для преобразования и управления электроэнергией, такие как генератор, выпрямитель и инвертор, а также компонент, имитирующий физическую работу ветряка. Выбранные компоненты позволяют точно моделировать как электрическую, так и механическую части ветровой энергосистемы.

#### Результаты

Авторами рассматривается возможность разработки силового преобразователя для ветроэнергетики, соответствующего требованиям высокоэффективных альтернативных источников энергии. Выполнено математическое и компьютерное моделирование преобразователя для малой ветроустановки. В данной статье приведены результаты расчета и выбора элементов электрической принципиальной схемы разработанного и исследованного преобразователя малой ветроустановки. По результатам исследования, выполненного с помощью компьютерного моделирования преобразователя для малой ветроустановки с источником питания от ветрогенератора, построены и проанализированы графики токов и напряжения преобразователя.

**Благодарности:** Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022-2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

**Для цитирования:** Сираев Ф. Ф., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т. Математическое и компьютерное моделирование преобразователя для малой ветроустановки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 75-89. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-75-89>.

Original article

## MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING CONVERTER FOR A SMALL WIND TURBINE

#### Relevance

The importance of using non-traditional energy sources is evidenced by the decision to provide subsidies from the federal budget for state support for technological connection of generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources (RES). As part of the state policy aimed at improving energy efficiency and developing the use of renewable energy sources, mechanisms are provided to support the stimulation of electric energy production by generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources.

#### Aim of research

In this paper, the development and research of a power converter for wind energy that meets the requirements of highly efficient alternative energy sources is carried out. The developed converter can be used by

#### Keywords

wind turbine, wind power, renewable energy sources, DC voltage converter

manufacturers of wind power plants to create efficient and developing models. The article is devoted to the analysis of the weaknesses of traditional power converters and the development of solutions to improve their efficiency and reliability.

### Research methods

This work consists in creating a computer model for the wind energy system in the Matlab/Simulink program. The model is focused on the characteristics of a specific wind turbine and includes elements for converting and controlling electricity, such as a generator, rectifier and inverter, as well as a component that simulates the physical operation of a windmill. The selected components make it possible to accurately simulate both the electrical and mechanical parts of the wind power system.

### Results

The authors consider the possibility of developing a power converter for wind energy that meets the requirements of highly efficient alternative energy sources. Mathematical and computer modeling of a converter for a small wind turbine has been performed. The novelty of the work consists in the development of a model in the Simulink program of the Matlab converter software package for a small wind turbine, taking into account the parameters of a WH8-10000W type wind generator and consisting of a virtual PMGM, a rectifier, a pulse inverting stabilizer, an inverter, which were taken from the Specialized Power Systems library, as well as a system simulating the mechanical part of a wind generator. This article presents the results of the calculation and selection of the elements of the electrical schematic diagram of the developed and investigated converter of a small wind turbine. Based on the results of a study performed using computer simulation of a converter for a small wind turbine with a power source from a wind generator, graphs of converter currents and voltages were constructed and analyzed.

**Acknowledgments:** The research was carried out using a grant from the President of the Russian Federation in 2022-2024 for young scientists and graduate students carrying out promising scientific research and development in priority areas of modernization of the Russian economy. Grant recipient is Regina Tagirovna Khazieva.

The priority direction of modernization of the Russian economy (direction of competition No. SP-2022 of the Grant Council of the President of the Russian Federation) is «Energy Efficiency and Energy Saving, Including Issues of Developing New Types of Fuel». Research topic: «Development and Research of a Filter Compensating Device to Improve the Quality of Electricity».

**For citation:** Siraev F. F., Kirillov R. V., Khazieva R. T. Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie preobrazovatelya dlya maloi vetroustanovki [Mathematical and Computer Modeling Converter for a Small Wind Turbine]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 75-89 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-75-89>.

### Введение

Ветроэнергетика давно используется в качестве источника энергии для многих областей применения, таких как привод парусных кораблей, помол зерна и накачивание воды. Одним из первых применений ветра для генерации электроэнергии была ветряная турбина, созданная датчанином Поулом Ла Куром в 1891 году

[1]. Развитие использования ветроэнергетики было медленным до 1990-х гг. Однако, начиная с 1990-х гг., технологии ветроэнергетики начали активно развиваться, особенно в Дании, Германии и Испании [2], и ежегодный темп роста увеличился до 20 % по всему миру [2].

О важности использования нетрадиционных источников энергии свидетель-

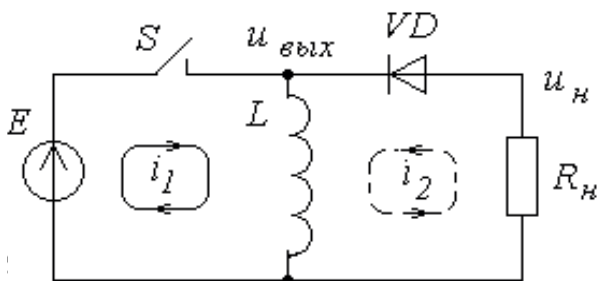
ствует решение о предоставлении субсидий из федерального бюджета на государственную поддержку технологического присоединения генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В целях реализации поставленных задач в основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования ВИЭ на период до 2024 года задач Федеральным законом от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» [3] предусмотрены механизмы поддержки стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования ВИЭ.

### Импульсный стабилизирующий преобразователь

Этот тип преобразователя, называемый также преобразователем с параллельным индуктивным накопителем, представлен на рисунке 1.

Такое название обусловлено схемой включения реактора. Реактор  $L$  накапливает энергию при включенном состоянии ключа  $S$ , передает ее в нагрузку  $R_n$  [4].

Диаграммы токов и напряжений в схеме представлены на рисунке 2. При включенном ключе к реактору  $L$  прило-



**Рисунок 1.** Схема силовых цепей импульсного стабилизирующего преобразователя постоянного напряжения

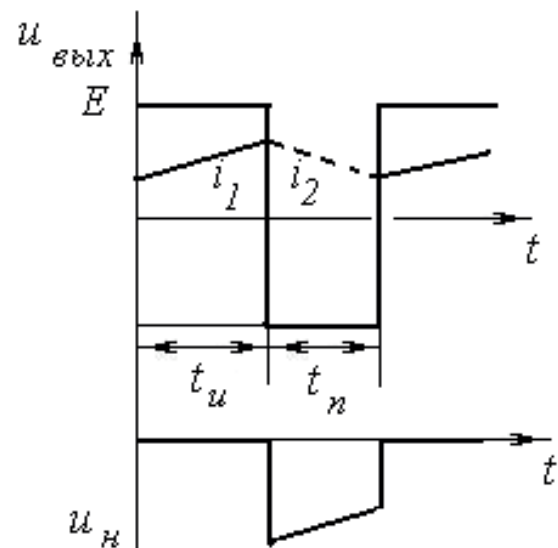
**Figure 1.** Scheme of power circuits pulse stabilizing DC voltage converter

жено напряжение  $E$ , и он накапливает энергию за счет протекания тока  $i_1$ .

В повышающих преобразователях амплитуда импульса напряжения на нагрузке стремится к бесконечности, но следует отметить, что в реальных схемах потери мощности ограничивают выходное напряжение, но не устраняют опасность выхода из строя элементов под воздействием повышенного напряжения. Неблагоприятным в этом отношении является режим холостого хода, когда нагрузка отсутствует.

Для уменьшения пульсаций в схемах повышающих преобразователей параллельно нагрузке включают емкостный фильтр [5].

После преобразователя для  $DC$ -звена следует инвертор [6]. Функция инвертора — изменять входное постоянное напряжение на симметричное переменное напряжение с желаемой амплитудой и частотой. Выходное напряжение может быть фиксированным или изменяемым на фиксированной или переменной частоте.



**Рисунок 2.** Диаграмма работы силовых цепей повышающего преобразователя постоянного напряжения

**Figure 2.** Diagram of the operation of the power circuits of the DC boost converter

Изменяемое выходное напряжение можно получить путем изменения входного постоянного напряжения и поддержания усиления инвертора. Идеальные инверторы должны производить синусоидальную выходную волну постоянной амплитуды. Однако практические инверторы производят несинусоидальные волны, которые содержат определенные гармоники. В случае синусоидальных выходных сигналов магнитуда, частота и фаза должны быть контролируемы [7]. Инверторы обычно используют управляющие сигналы ШИМ для производства переменного напряжения на выходе. В зависимости от типа выходной волны эти топологии могут рассматриваться как инверторы напряжения, где независимо управляемым переменным напряжением является форма напряжения. На рисунке 3 представлена схема однофазного инвертора.

Диаграммы токов и напряжений в схеме представлены на рисунке 2. При включенном ключе (интервал I) к реактору  $L$  приложено напряжение.

**Расчет силовой части преобразователя**

Расчет параметров сети и нагрузки сводится к выбору элементов для схемы

проектированного преобразователя для ветроустановки [8].

В начале расчета определены допустимые изменения качества выработанного ветрогенератором электрической энергии, максимальное и минимальное генерируемое напряжение ветроустановкой:

$U_{ном.} = 220 \text{ В}$  — фазное напряжение сети,

$$U_{max} = 1,20 \cdot U_{ном.}; \tag{1}$$

$$U_{min} = 0,8 \cdot U_{ном.} \tag{2}$$

Максимальное и минимальное напряжения:

$U_{н.} = 220 \text{ В}$  — номинальное напряжение нагрузки,

$$U_{н. max} = 1,10 \cdot U_{н.}; \tag{3}$$

$$U_{н. min} = 0,9 \cdot U_{н.} \tag{4}$$

Находятся минимальное напряжение и ток нагрузки:

$$I_{н. max} = \frac{P}{U_{н. min}}; \tag{5}$$

$$I_{н. min} = \frac{P}{U_{н. max}}. \tag{6}$$

Вычисляется номинальный ток на нагрузке:

$$I_{н.} = \frac{P}{U_{н.}}. \tag{7}$$

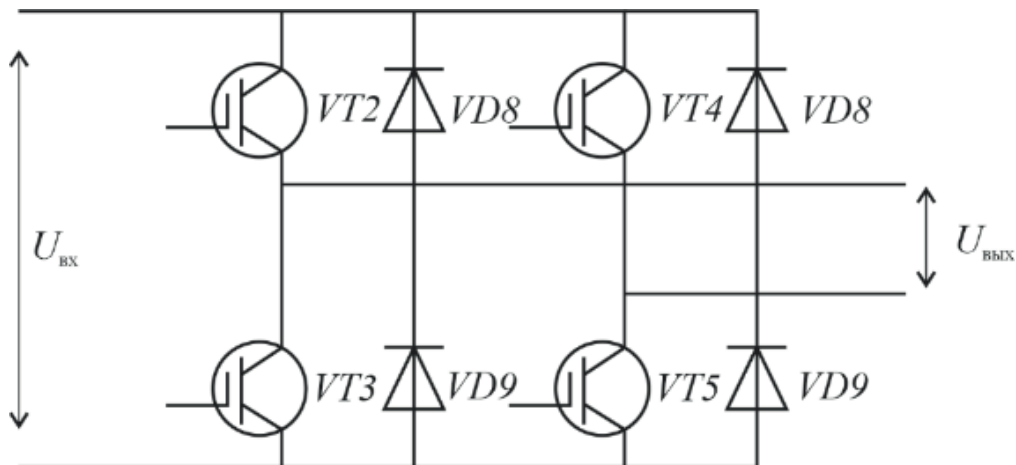


Рисунок 3. Схема инвертора

Figure 3. Inverter circuit



### Расчет инвертора напряжения

При проектировании инвертора необходимо определить параметры, которые помогут выбрать подходящие транзисторы и диоды [9]. Это включает расчет максимальных значений тока коллектора, напряжения на коллекторе, а также учет коэффициента запаса. Обычно для коэффициента запаса принимается значение в 1,5 раза больше расчетного значения, чтобы учесть возможные непредвиденные факторы, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации [10].

По рассчитанным параметрам выбирается *IGBT* модуль, собранный по мостовой схеме, который имеет встроенный диод и обладает следующими характеристиками:  $U_{обр.} = 650$  В,  $I_{к.мах} = 150$  А.

### Расчет Г-образного фильтра на выходе инвертора

Для того чтобы обеспечить высокое качество электрической энергии на выходе инвертора, необходимо установить фильтр. Г-образный фильтр является хорошим выбором для того, чтобы фильтровать первую гармонику и подавлять высшие гармоники. Рисунок 4 демонстрирует принципиальную схему Г-образного фильтра.

Согласно расчету, выбирается конденсатор со следующими характеристиками:  $C_{ном.} = 30$  мкФ,  $U_{ном.} = 800$  В.

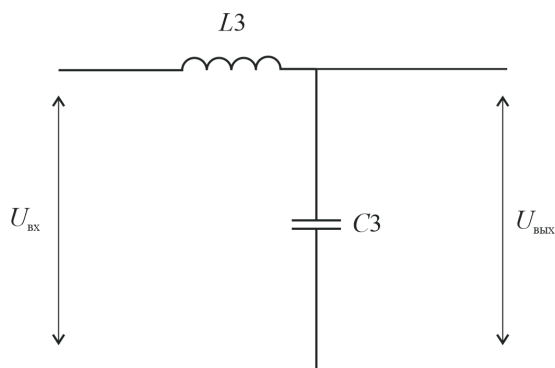


Рисунок 4. Г-образный фильтр на выходе инвертора

Figure 4. L-shaped filter at the output of the inverter

### Расчёт преобразователя постоянного напряжения

Для обеспечения выходного напряжения, которое может быть как меньше, так и больше входного напряжения, используется преобразователь постоянного напряжения [11].

По получившимся результатам в ходе расчета выбирается *IGBT* модуль, который имеет встроенный диод и обладает следующими характеристиками:  $U_{обр.} = 650$  В,  $I_{к.мах} = 150$  А.

Параметры диода:  $U_{обр.} = 600$  В,  $I_{пр.мах} = 96$  А.

Параметры выбранного конденсатора:  $C_{ном.} = 3$  мкФ,  $U_{ном.} = 600$  В.

### Расчёт выпрямителя

Расчет выпрямителя заключается в определении максимального тока, проходящего через диоды, и обратного напряжения на диодах. Основные характеристики выбранного диода:  $I_{пр.} = 40$  А,  $U_{обр.} = 600$  В.

### Расчет сглаживающего фильтра на выходе выпрямителя

Для уменьшения пульсаций после выпрямителя применяем Г-образный LC-фильтр. Схема LC-фильтра была приведена на рисунке 4.

Выбирается конденсатор с номинальной емкостью  $C_{ном.} = 820$  мкФ,  $U_{ном.} = 550$  В.

### Компьютерная модель преобразователя для ветроустановки малой мощности

Выполненные расчеты и формулы проверялись с помощью имитационного моделирования в *MatLab Simulink*. На рисунке 5 показана разработанная компьютерная модель преобразователя для ветрогенератора малой мощности [12].

Модель состоит из блока имитации ветроустановки, выпрямителя, Г-образ-

ного фильтра, выполненного на элементах  $L$  и  $C$ , которые снижают пульсацию после выпрямления. Источником питания является ветроустановка малой мощности технические характеристики, которой приведены в таблице 1 [13].

На рисунке 6 представлена система создания ветра, которая преобразуется в скорость генератора [14]. В первом испытании будет использоваться постоянная скорость, равная 6 м/с. Во втором испытании будет использоваться блок, создающий среднеслучайные значения скорости, которые были представлены в первом испытании.

На рисунке 7 представлен преобразователь постоянного напряжения, кото-

рый нужен для повышения или понижения уровня напряжения на входе инвертора, также он нужен для стабилизации выходного сигнала на выходе преобразователя постоянного напряжения (ППН). Преобразователь выполнен на следующих элементах  $L, C, VD, VT$ .

Транзистор  $VT$ , управляемый с помощью блока системы управления ППН, представленной на рисунке 8, размыкается и запирается с заданной частотой управления, которая приходит с системы управления. Транзистор  $VT$  открывается с заданной частотой преобразования, которая задается с помощью блока системы управления, представленной на рисунке 8.

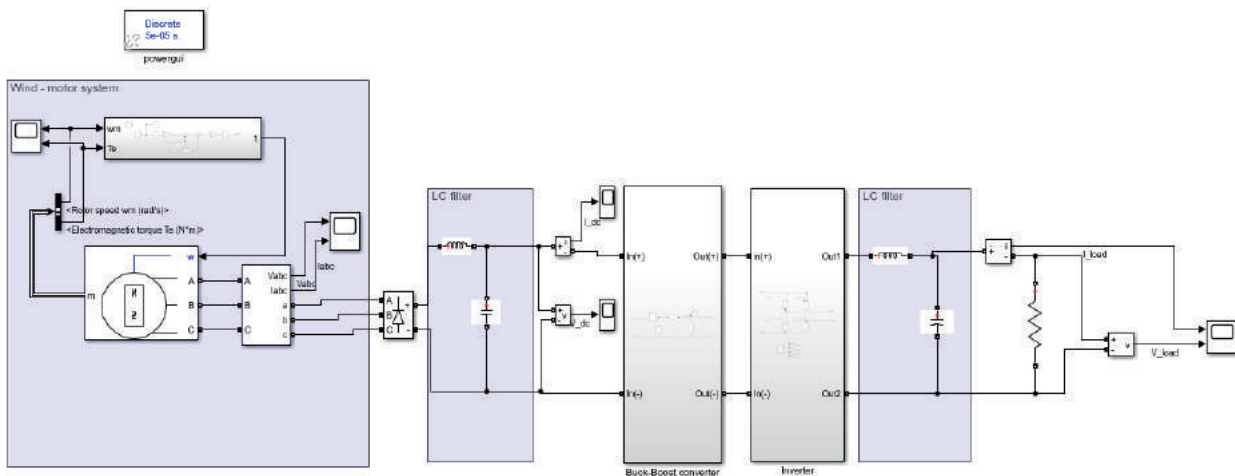


Рисунок 5. Имитационная модель преобразователя для малой ветроустановки

Figure 5. Simulation model of a converter for a small wind turbine

Таблица 1. Технические характеристики ветрогенератора WH8-10000W

Table 1. Specifications of the wind turbine WH8-10000W

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность $P_{ном}$	кВт	10
Максимальная мощность $P_{max}$	кВт	12,5
Номинальное напряжение $U_{ном}$	В	380
Номинальная скорость ветра $V_{ном}$	м/с	12
Диаметр ветроколеса $D$	м	10
Количество лопастей $i$	шт.	3
Номинальная частота вращения $n_{ном}$	об/мин	250
Максимальная скорость ветра $V_{max}$	м/с	20
Момент инерции ветроустановки $J$	кг·м <sup>2</sup>	6,8

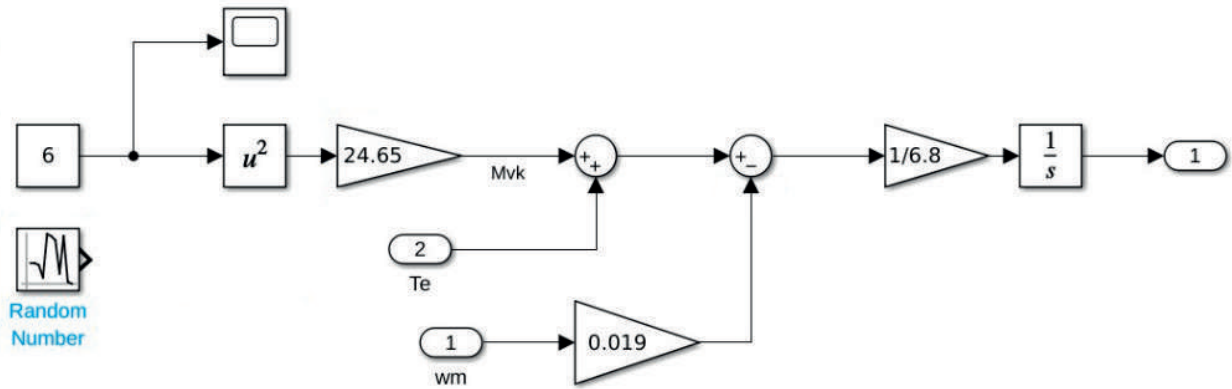


Рисунок 6. Блок создания ветра

Figure 6. Wind creation block

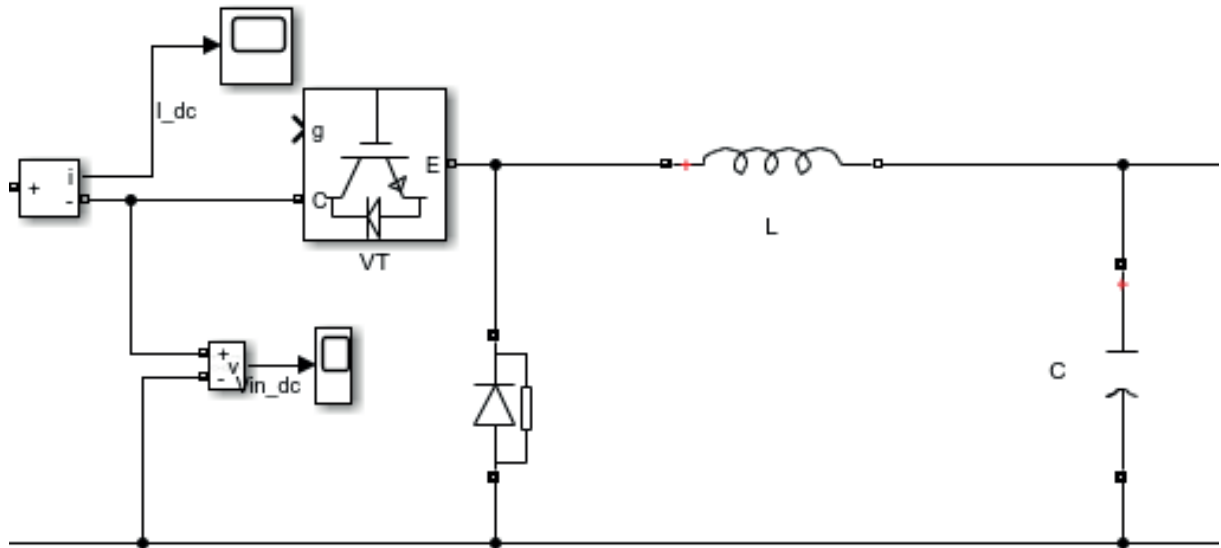


Рисунок 7. Модель преобразователя постоянного напряжения

Figure 7. DC/DC converter model

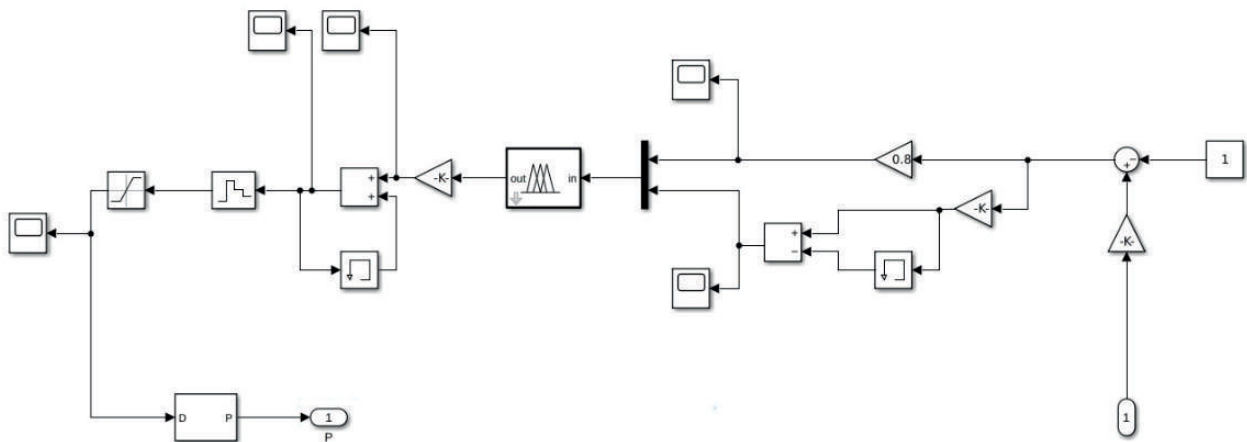


Рисунок 8. Система управления преобразователя постоянного напряжения

Figure 8. DC/DC converter control system

На рисунке 9 показан инвертор напряжения, выполненный на *IGBT*-модулях  $VT_1$ ,  $VT_2$ ,  $VT_3$ ,  $VT_4$ , который управляется системой управления, представленной на рисунке 10 в виде блока «*Inverter control system*».

Автономный инвертор напряжения (АИН) преобразует постоянное напряжение на входе в переменное с помощью *IGBT*-транзисторов, которые управляются широтно-импульсной модуляцией [15]. Внутри системы управления АИН происходит сравнение синусоидального

сигнала с пилообразным сигналом. Если пилообразный сигнал больше или равен синусоидальному, открываются транзисторы  $VT_1$  и  $VT_4$ , а если пилообразный сигнал ниже, открываются транзисторы  $VT_3$  и  $VT_2$ .

Система управления обеспечивает стабильный уровень переменного напряжения. Синусоидальный сигнал проходит через сглаживающий *LC*-фильтр, который состоит из элементов *L* и *C*, чтобы уменьшить пульсации высших гармоник тока и напряжения.

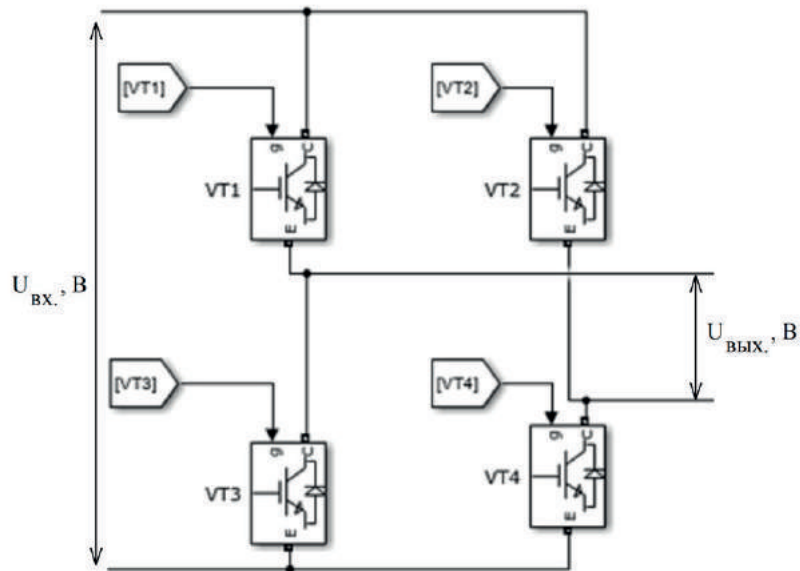


Рисунок 9. Модель инвертора

Figure 9. Inverter model

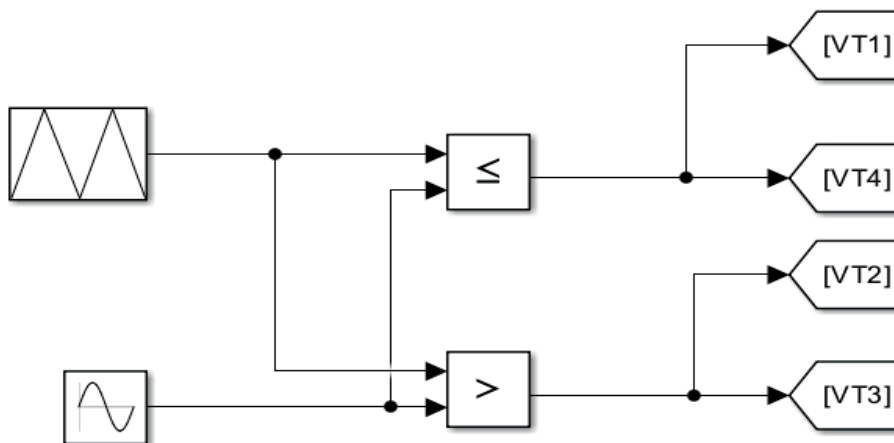


Рисунок 10. Модель системы управления инвертором

Figure 10. Inverter control system model

### Исследование модели при постоянной скорости ветра

Проведено исследование модели при постоянной скорости ветра для того, чтобы понять, как работает преобразователь при стабильных условиях [16]. Для этого рассмотрены изменения параметров работы системы на различных участках преобразователя. В процессе исследования измерены выходные параметры и выполнено их сравнение с расчетными значениями [17]. Полученные результаты позволят более глубоко понять особенности работы преобразователя при стабильных условиях и его возможности в условиях реальных эксплуатационных нагрузок.

На рисунке 11 показаны графики тока и напряжения от ветрогенератора при постоянной скорости ветра 6 м/с.

По графикам (рисунок 11) видно, что все показания стабильные, мощность исследуемой малой ветроустановки достаточна.

На рисунке 12 представлен график напряжения после выпрямителя и преобразователя постоянного напряжения.

По графику (рисунок 12) видно, что значение напряжения на выходе выпрямителя составляет 537 В. На выходе преобразователя постоянного напряжения видно, что он снижает уровень напряжения до 310 В, что соответствует расчету.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что преобразователь стабильно работает при неизменной скорости ветра.

### Исследование модели при переменной скорости ветра

Проведено исследование модели при переменной скорости ветра, чтобы понять, как работает преобразователь в различных условиях [18]. Для этого рассмотрены изменения параметров работы системы на различных участках преобразователя при изменяющейся скорости ветра. В процессе исследования измерены выходные параметры и выполнено их сравнение с расчетными значениями. Полученные результаты способствовали более глубокому пониманию особенностей работы преобразователя в перемен-

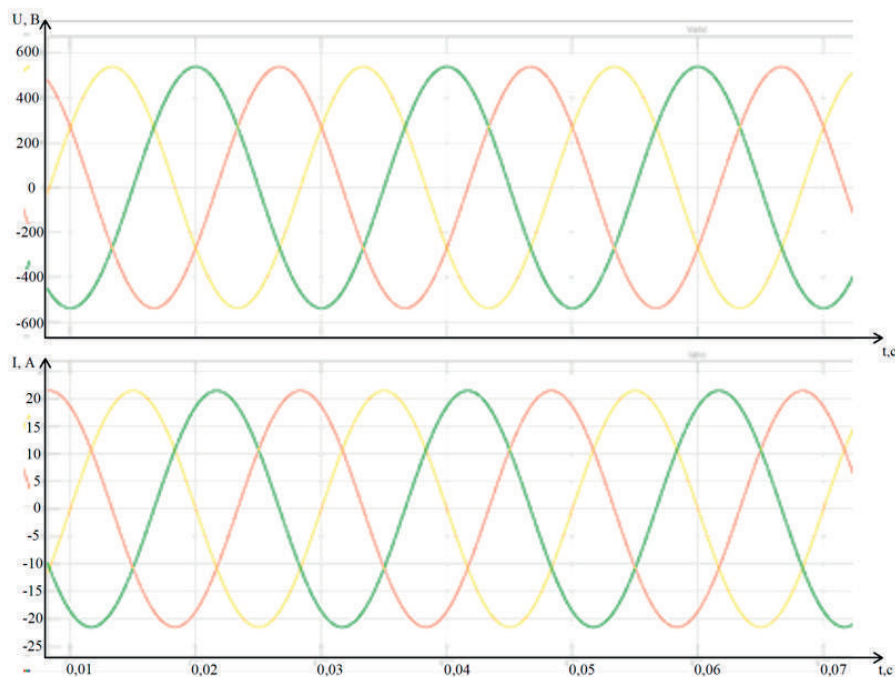
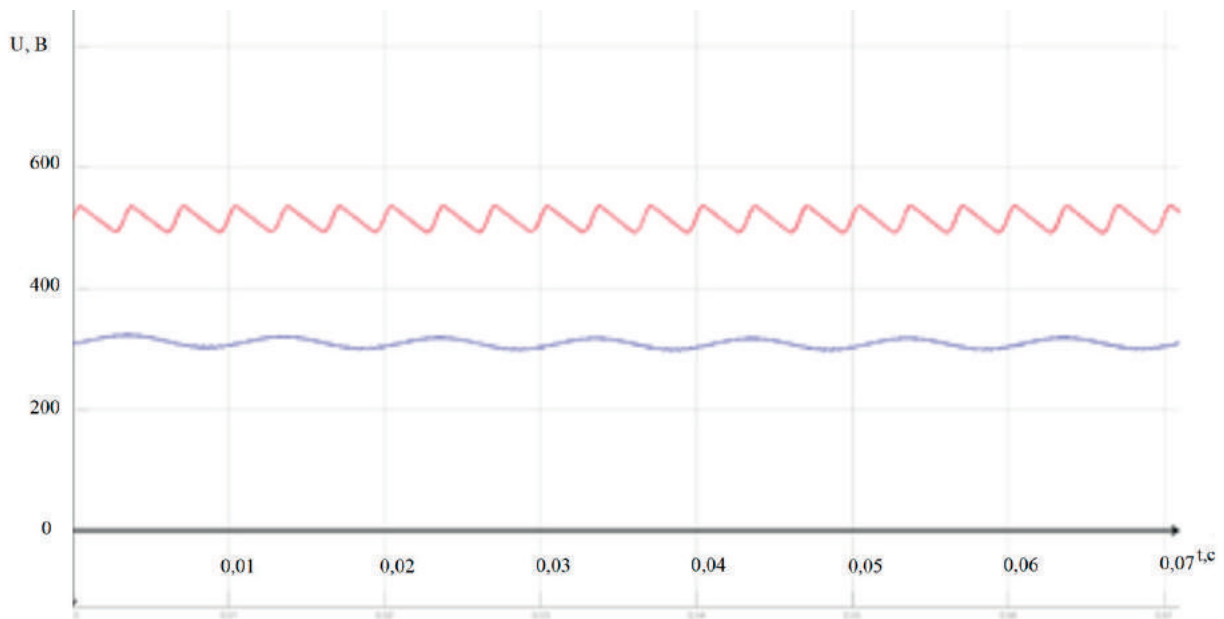


Рисунок 11. Графики напряжения и тока ветрогенератора

Figure 11. Wind generator voltage and current graphs





**Рисунок 12.** График напряжения после выпрямителя и преобразователя постоянного напряжения

**Figure 12.** Voltage graph after the rectifier and DC voltage converter

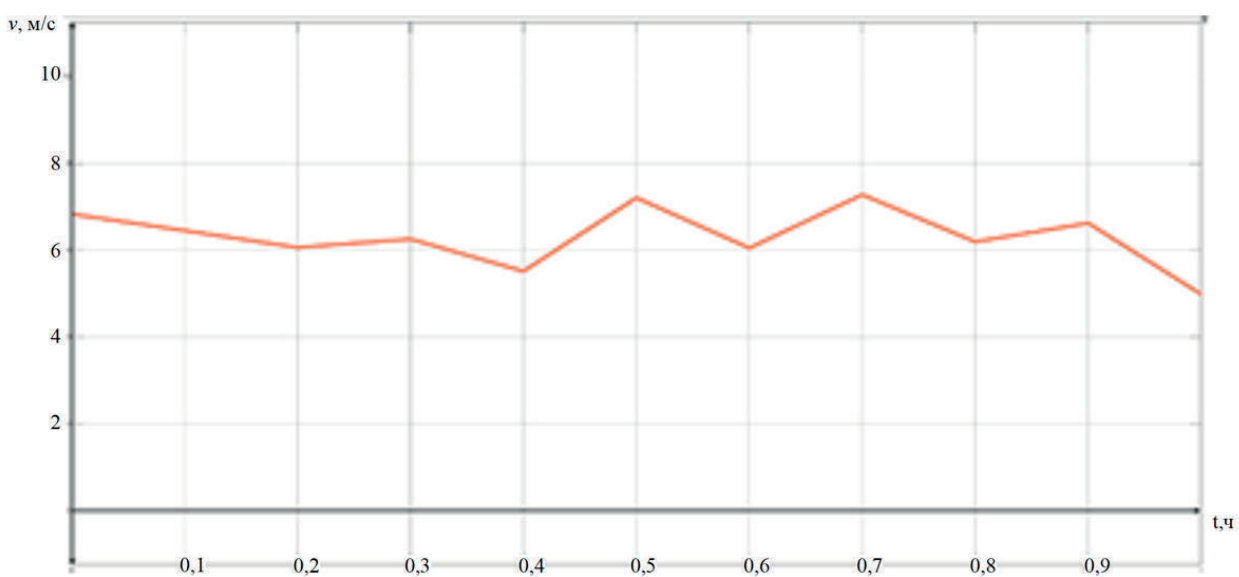
ных условиях и его возможности в реальных эксплуатационных нагрузках [19].

На рисунке 13 показан график изменения скорости ветра. Изменение скорости ветра задано в диапазоне 5–7 м/с.

На рисунке 13 показан график изменения скорости. Максимальное отклонение скорости от 6 м/с составило 0,7 м/с, что составляет 11,7 %.

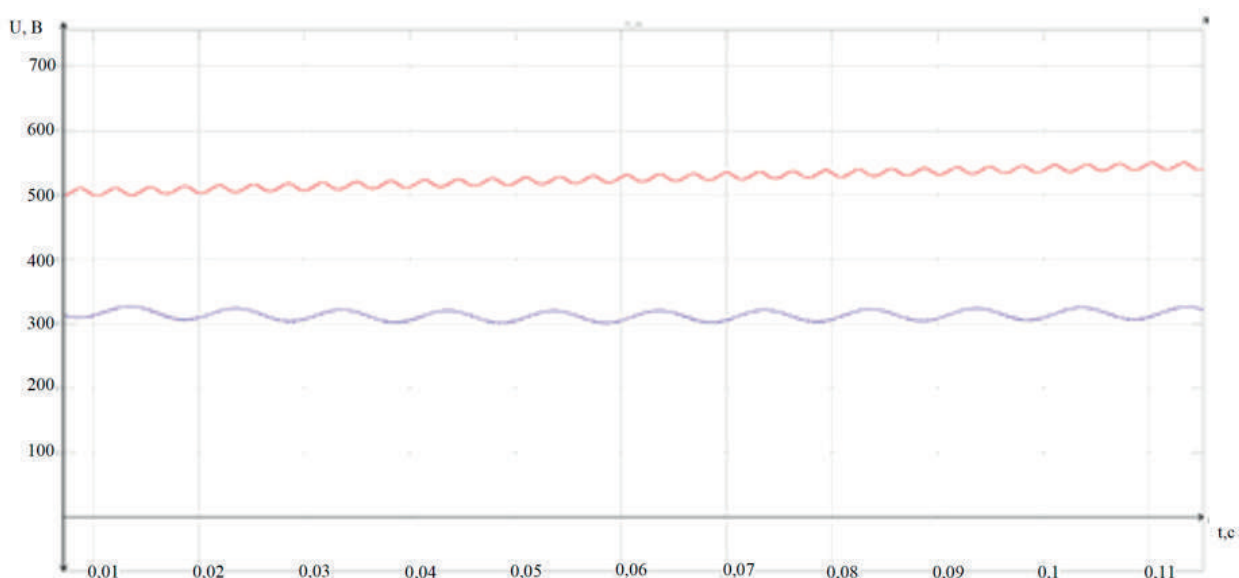
На рисунке 14 представлен график напряжения после выпрямителя и преобразователя постоянного напряжения. По графику (рисунок 14) видно, что в выбранный период времени скорость ветра возрастала.

В зависимости от изменения скорости вращения ротора ветрогенератора преобразователь снижает и стабилизирует



**Рисунок 13.** График зависимости скорости ветра от времени

**Figure 13.** Graph of wind speed versus time



**Рисунок 14.** График напряжения после выпрямителя и преобразователя постоянного напряжения

**Figure 14.** Voltage graph after the rectifier and DC voltage converter

амплитудное значение выходного напряжения до 310 В, что соответствует техническим характеристикам.

По графику видно, что амплитудное значение напряжения на нагрузке составляет 310 В, тока — 64 А, частота — 50 Гц, нагрузка — 10 кВт. Все показания стабильные.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что преобразователь стабильно работает при переменной скорости ветра. Однако при переменной скорости ветра преобразователь уменьшает свою эффективность в зависимости от амплитуды и частоты колебаний скорости ветра [20].

#### Список источников

1. Gilbert M. Masters. The Electric Power Industry // Renewable and Efficient Electric Power Systems. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2004, pp.107-168.
2. Thomas Howard Blair. Solar and Wind Energy // Energy Production Systems Engineering. IEEE, 2017. С. 663–679. DOI: 10.1002/9781119238041.ch28.
3. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35 «Об электроэнергетике» [Электронный ресурс].

#### Выводы

В данной статье приведены результаты расчета и выбора элементов электрической принципиальной схемы разработанного и исследованного преобразователя малой ветроустановки [21]. По результатам исследования, выполненного с помощью компьютерного моделирования преобразователя для малой ветроустановки с источником питания от ветрогенератора, построены и проанализированы графики токов и напряжения преобразователя. Анализ графиков показал, что спроектированный преобразователь может применяться для преобразования энергии от ветрогенератора малой мощности.

URL: <https://base.garant.ru/185656/> (дата обращения: 23.06.2023).

4. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника. Челябинск: Издательский Центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
5. Liu Z., Liu C., Ding Y., Li G. Transient Stability Studies of Power System with shared Transmission of Wind Power and Thermal Power // 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013). Beijing, 2013, pp. 1-4. DOI:10.1049/cp.2013.1755.

6. Каргиев В.М., Мартиросов С.Н., Муругов В.П., Пиноа А.Б., Сокольский А.К., Харитонов В.П. Ветроэнергетика руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. М.: АНО «ИНТЕРСОЛАР-ЦЕНТР», 2001. 62 с.

7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (введен 01.07.2014 г.). М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

8. Яшин А.Н., Бодылев А.С., Хазиева Р.Т., Хакимьянов М.И. Лабораторная установка для исследования применения возобновляемых источников энергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18. № 2. С. 82-97. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-82-97. EDN: LOVYYY.

9. Monteiro A., Ribeiro E., Cardoso A.J.M., Boccaletti C. Power Control of a Small-Scale Standalone Wind Turbine for Rural and Remote Areas Electrification // 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Ischia, Italy, 2014, pp. 889-894. DOI:10.1109/SPEEDAM.2014.6872093.

10. Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Казакбаев В.М. Оптимальное проектирование безредукторной машины с переключением потока для ветрогенератора // Известия ТПУ, 2020. № 5, Т. 331. 12 с. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/62000>.

11. Pathmanathan M., Tang C., Soong W. L., Ertugrul N. Comparison of Power Converters for Small-Scale Wind Turbine Operation // 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference. Sydney, NSW, Australia, 2008, pp. 1-6.

12. Нурахмет Е.Е., Гафаров А.А., Бенке М.С. Выбор электрогенераторов для ветроэнергетических установок // Молодой ученый. 2016. № 28-2(132). С. 68-79. EDN: XEOOYZ.

13. Вертикальный ветрогенератор BF-H-10K [Электронный ресурс]. URL: <https://yashel.shop/product/vertikalnyy-vetrogenerator-bf-h-10k> (дата обращения: 23.06.2023).

14. Пат. 2168062 РФ, МПК F 03 D 9/00. Ветрогенератор / Д.А. Ивашинцов, А.М. Рыжов, М.В. Кузнецов, В.Н. Крывой, Н.В. Зуев. 99125638/06, Заявлено 07.12.1099; Опубл. 27.05.2001. № 15. 7 с.

15. Прокопеня И.Н., Петровская Т.А. Нетрадиционные источники энергии. Минск: БНТУ, 2021. Ч. 1: Ветроэнергетика, 2021. 41 с. ISBN 978-985-583-613-2.

16. Суржикова О.А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения уда-

ленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. 2012. № 3(4). С. 103-108.

17. Саттаров Р.Р., Хазиева Р.Т., Хабибуллин Т.Р., Горшенин А.И. Исследование понижающего преобразователя на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электротехнические комплексы и системы: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2021. С. 71-77. EDN: NTPDAN.

18. Грозных В.А., Бурунбаев А.И. Преимущества и недостатки эксплуатации ветроустановок малой и средней мощности // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: сб. матер. XI Междунар. науч.-практ. интернет-конф. Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. С. 67-69. EDN: WGNILJ.

19. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. тех. ун-т, 2004. 519 с. ISBN 966-662-079-0.

20. Yang J.M., Cheng K.W.E., Wu J., Dong P., Wang B. The Study of the Energy Management System Based on Fuzzy Control for Distributed Hybrid Wind-Solar Power System // Proceedings 2004 First International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2004. Hong Kong, China, 2004, pp. 113-117.

21. Горшенин А.И., Хазиева Р.Т. Применение ветроустановки малой мощности для электроснабжения дома // Матер. 74-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. Уфа, 2023. С. 535. EDN: UZIIGI.

## References

1. Gilbert M. Masters. The Electric Power Industry. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2004, pp.107-168.

2. Thomas Howard Blair. Solar and Wind Energy. *Energy Production Systems Engineering*. IEEE, 2017, pp.663-679. DOI: 10.1002/9781119238041.ch28.

3. *Federal'nyy zakon ot 26.03.2003 № 35 «Ob elektroenergetike»* [Federal Law of March 26, 2003 No. 35 «On the Electric Power Industry»] [Electronic Resource]. URL: <https://base.garant.ru/185656/> (accessed 23.06.2023). [in Russian].

4. Gel'man M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskiy K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika* [Converting Technology]. Chelyabinsk, Izdatel'skiy Tsentr YuUrGU, 2009. 425 p. [in Russian].

5. Liu Z., Liu C., Ding Y., Li G. Transient Stability Studies of Power System with Shared Transmission of Wind Power and Thermal Power.

2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013). Beijing, 2013, pp. 1-4. DOI:10.1049/cp.2013.1755.

6. Kargiev V.M., Martirosov S.N., Murugov V.P., Pinoa A.B., Sokol'skiy A.K., Kharitonov V.P. *Vetroenergetika rukovodstvo po primeniyu vetroustanovok maloy i sredney moshchnosti* [Wind Power Industry Guide to the Use of Wind Turbines of Small and Medium Power]. Moscow, ANO «INTERSOLARTsENTR», 2001. 62 p. [in Russian].

7. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems] (Introduced 01.07.2014). Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p. [in Russian].

8. Yashin A.N., Bodylev A.S., Khazieva R.T., Khakim'yanov M.I. Laboratornaya ustanovka dlya issledovaniya primeneniya vozobnovlyаемых istochnikov energii [Laboratory Facility for Studying the Application of Renewable Energy Sources]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Complexes and Systems*, 2022, Vol. 18, No. 2, pp. 82-97. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-82-97. EDN: LOVYYY. [in Russian].

9. Monteiro A., Ribeiro E., Cardoso A.J.M., Boccaletti C. Power Control of a Small-Scale Standalone Wind Turbine for Rural and Remote Areas Electrification. *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. Ischia, Italy, 2014, pp. 889-894. DOI:10.1109/SPEEDAM.2014.6872093.

10. Prakht V.A., Dmitrievskiy V.A., Kazakbaev V.M. Optimal'noe proektirovanie bezreduktornoy mashiny s pereklyucheniem potoka dlya vetrogeneratora [Optimal Design of a Gearless Machine with Flow Switching for a Wind Generator]. *Izvestiya TPU — Izvestia TPU*, 2020, No. 5, Vol. 331. 12 p. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/62000>. [in Russian].

11. Pathmanathan M., Tang C., Soong W. L., Ertugrul N. Comparison of Power Converters for Small-Scale Wind Turbine Operation. *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, Sydney, NSW, Australia, 2008, pp. 1-6.

12. Nurakhmet E.E., Gafarov A.A., Benke M.S. Vybor elektrogeneratorov dlya vetroenergeticheskikh ustanovok [The Choice of Electric Generators for Wind Power Plants]. *Molodoy uchenyy — Young*

*Scientist*, 2016, No. 28-2 (132), pp. 68-79. EDN: XE00YZ. [in Russian].

13. *Vertikal'nyy vetrogenerator BF-H-10K* [Vertical Wind Generator BF-H-10K] [Electronic Resource]. URL: <https://yashel.shop/product/vertikalnyy-vetrogenerator-bf-h-10k> (accessed 23.06.2023). [in Russian].

14. Ivashintsov D.A., Ryzhov A.M., Kuznetsov M.V., Kryvoy V.N., Zuev N.V. *Vetrogenerator* [Wind Generator]. Patent RF, No. 2168062, 2001. [in Russian].

15. Prokopenya I.N., Petrovskaya T.A. *Netraditsionnye istochniki energii* [Non-Traditional Energy Sources]. Minsk, BNTU, 2021. Ch. 1: *Vetroenergetika*, 2021. 41 p. ISBN 978-985-583-613-2. [in Russian].

16. Surzhikova O.A. Problemy i osnovnye napravleniya razvitiya elektrosnabzheniya udalennykh i malonaseleennykh potrebiteley Rossii [Problems and Main Directions of Development of Power Supply for Remote and Sparsely Populated Consumers in Russia]. *Vestnik nauki Sibiri — Bulletin of Science of Siberia*, 2012, No. 3 (4), pp. 103-108. [in Russian].

17. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Khabibullin T.R., Gorshenin A.I. Issledovanie ponizhayushchego preobrazovatelya na baze mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta [Research of Buck Converter Based on Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy»* [International Scientific and Practical Conference «Electrotechnical Complexes and Systems»]. Ufa, 2021, pp. 71-77. EDN: NTPDAN. [in Russian].

18. Groznykh V.A., Burunbaev A.I. Preimushchestva i nedostatki ekspluatatsii vetroustanovok maloy i sredney moshchnosti [Advantages and Disadvantages of Operating Small and Medium-Sized Wind Turbines]. *Sbornik materialov XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy Internet-Konferentsii «Energо- i resursosberezhenie — XXI vek»* [Collection of Materials of the XI International Scientific and Practical Internet Conference «Energy and Resource Saving — XXI Century»]. Orel, Gosuniversitet-UNPK, 2013, pp. 67-69. EDN: WGNILJ. [in Russian].

19. Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. *Neischerpaemaya energiya* [Inexhaustible Energy]. Khar'kov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t»; Sevastopol', Sevast. nats. tekhn. un-t, 2004. 519 p. ISBN 966-662-079-0. [in Russian].

20. Yang J.M., Cheng K.W.E., Wu J., Dong P., Wang B. The Study of the Energy Management System Based on Fuzzy Control for Distributed

Hybrid Wind-Solar Power System. *Proceedings. 2004 First International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2004*. Hong Kong, China, 2004, pp. 113-117.

21. Gorshenin A.I., Khazieva R.T. *Primenenie vetroustanovki maloy moshchnosti dlya elektrosnabzheniya doma* [The Use of a Low-Power

Wind Turbine for Power Supply at Home]. *Materialy 74-oy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh UGNTU* [Materials of 74th Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists of USPTU]. Ufa, 2023, pp. 535. EDN: UZHGI. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 22.01.2024; одобрена после рецензирования 29.01.2024; принята к публикации 21.02.2024.*  
*The article was submitted 22.01.2024; approved after reviewing 29.01.2024; accepted for publication 21.02.2024.*



Научная статья

УДК 621.316

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-90-96

## БЕЗДАТЧИКОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

**Ильдар Ирекович Хайдаров****Ildar I. Khaydarov***ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия***Рустам Радикович Шарипов****Rustam R. Sharipov***старший преподаватель «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

Для измерения скорости вращения электродвигателей и определения положения ротора используются датчики положения ротора. Благодаря таким датчиком появляется возможность контролировать скорость и положения ротора как в пусковом режиме электродвигателя, так и в нормальном режиме работы. В то же время существуют технологические механизмы, в которых использование датчиков положения практически невозможно. Наличие датчиков скорости ротора в синхронных двигателях значительно снижает их надежность и удорожает систему управления.

### Цель исследования

Разработка алгоритма вычисления скорости ротора синхронного двигателя. Создание имитационной модели устройства, реализующего разработанный алгоритм, и последующая оценка работы алгоритма на основе результатов имитационного моделирования.

### Методы исследования

Исследование разработанного метода выполнено в программном комплексе Matlab Simulink.

### Результаты

Представлен и подробно описан алгоритм вычисления скорости ротора синхронного двигателя. Проведенные исследования разработанного алгоритма с помощью имитационного моделирования показали высокую точность вычисления емкостных токов в режиме однофазного замыкания на землю.

### Ключевые слова

бездатчиковая система управления, синхронный двигатель, система управления, датчик скорости, частотный пуск, асинхронный пуск, бесщеточные электродвигатели, STD-8000

**Для цитирования:** Хайдаров И. И., Шарипов Р. Р. Бездатчиковая система управления синхронным двигателем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 90-96. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-90-96>.

## SENSORLESS SYNCHRONOUS MOTOR CONTROL SYSTEM

### Relevance

Rotor position sensors are used to measure the transmission speed of electric motors and determine rotor positions. Thanks to this sensor, it becomes possible to control the speed and rotor both in the starting mode of the electric motor and in normal operation. At the same time, the presence of technological mechanisms when using position sensors is practically impossible; the presence of rotor speed sensors in synchronous motors significantly increases its reliability and increases the cost of the control system.

### Aim of research

The main aim of the research. Development of an algorithm for calculating the rotor speed of a synchronous motor. Creation of a simulation model of a device that implements the developed algorithm, and subsequent evaluation of the algorithm's performance based on the results of the simulation.

### Research methods

The study of the developed method was carried out in the Matlab Simulink software package.

### Results

An algorithm for calculating the rotor speed of a synchronous motor is presented and described in detail. Studies of the developed algorithm using simulation have shown high accuracy in calculating capacitive currents in the mode of a single-phase ground fault.

### Keywords

sensorless control system, synchronous motor, control system, speed sensor, frequency starting, asynchronous starting, brushless electric motors, STD-8000

**For citation:** : Khaydarov I. I., Sharipov R. R. Bezdatchikovaya sistema upravleniya sinkhronnym dvigatelem [Sensorless Synchronous Motor Control System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 90-96 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-90-96>.

### Введение

Наличие датчика положения ротора в синхронных двигателях (СД) значительно снижает надежность из-за необходимости введения дополнительных элементов внутрь корпуса СД. Для создания системы управления без датчика положения ротора используются системы, в которых измеренные величины тока и напряжения  $dq$  вводятся в математическую модель для контроля величины тока и скорости.

В данной статье рассматривается бездатчиковая система управления синхронным двигателем, которая может использоваться как при пуске, так и в нормальном режиме работы СД [1–5].

Математическая модель синхронного двигателя описывается уравнениями

Парка-Горева и с учетом допущений приведенных в [1–15].

Полная система уравнений Парка-Горева:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q + R_s \cdot I_d, \\ U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \cdot \Psi_d + R_s \cdot I_q, \\ 0 = \frac{d\Psi_{kd}}{dt} + R_{kd} \cdot I_{kd}, \\ 0 = \frac{d\Psi_{kq}}{dt} + R_{kq} \cdot I_{kq}, \\ 0 = \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f \cdot I_f, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{m_{эм} - m_c}{J}, \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_0 - \omega, \\ m_{эм} = \Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d, \\ U_d = U \cdot \cos\theta, \\ U_q = U \cdot \sin\theta, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $U_d, U_q$  — напряжения по продольной и поперечной оси соответственно;

$I_d, I_q$  — токи статора по продольной и поперечной оси соответственно;

$I_{kd}, I_{kq}$  — токи массивного ротора по продольной и поперечной оси соответственно;

$I_f$  — ток обмотки возбуждения;

$\Psi_d, \Psi_q$  — магнитные потоки, создаваемые продольным и поперечным током статора соответственно;

$\Psi_{kd}, \Psi_{kq}$  — магнитные потоки, создаваемые продольным и поперечным током ротора соответственно;

$\Psi_f$  — магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения;

$R_s$  — активное сопротивление статора;

$R_{kd}, R_{kq}$  — активное сопротивление ротора по продольной и поперечной оси соответственно;

$R_f$  — активное сопротивление обмотки возбуждения;

$\omega_0$  — скорость холостого хода;

$\omega$  — угловая скорость вращения ротора;

$m_{эм}$  — электромагнитный вращающий момент;

$m_c$  — момент сопротивления;

$J$  — момент инерции;

$\theta$  — угол нагрузки.

Векторное уравнение магнитных потоков

$$\bar{\Psi} = \bar{L} \times \bar{I}, \quad (2)$$

$$\bar{\Psi} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_{kd} \\ \Psi_{kq} \end{bmatrix}, \quad \bar{I} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_{kd} \\ I_{kq} \end{bmatrix}.$$

Для создания системы управления без датчика положения ротора используются системы, в которых измеренные величины тока и напряжения  $dq$  вводятся в математическую модель для контроля величины тока и скорости [2, 4]. На осно-

вании этих данных вычисляются магнитный поток и скорость двигателя.

Распишем вывод формул для предлагаемого варианта системы управления без датчика положения ротора, которая может применяться как для двигателя с бесщеточной системой возбуждения (необходимо знать изменения напряжения обмотки возбуждения от скольжения от скорости вращения ротора), так и классического двигателя с контактными кольцами при асинхронном пуске.

Входными для данной системы являются величины, которые могут быть измерены: ток и напряжение статора, ток и напряжение обмотки возбуждения.

Из уравнения магнитного потока статора по оси  $d$   $\psi_d$  из (2) выражается ток демпферного контура  $I_{kd}$ :

$$I_{kd} = \frac{\psi_d - L_d I_d - L_{ad} I_f}{L_{ad}}. \quad (3)$$

Выражение (3) подставляется в уравнение магнитного потока ротора по оси  $d$   $\psi_{kd}$  из (2):

$$\begin{aligned} \psi_{kd} &= \frac{L_{kd}}{L_{ad}} \left( \psi_d - L_d I_d - \right. \\ &\left. - L_{ad} I_f + \frac{L_{ad}^2}{L_{kd}} I_d + \frac{L_{ad}^2}{L_{kd}} I_f \right) = \\ &= \frac{L_{kd}}{L_{ad}} (\psi_d - I_d a - I_f b), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $a = L_d - \frac{L_{ad}^2}{L_{kd}};$  (5)

$$b = L_{ad} - \frac{L_{ad}^2}{L_{kd}}. \quad (6)$$

Производная по времени магнитного потока ротора по оси  $d$ :

$$\frac{d\psi_{kd}}{dt} = \frac{L_{kd}}{L_{ad}} \left( \frac{d\psi_d}{dt} - a \frac{dI_d}{dt} - b \frac{dI_f}{dt} \right). \quad (7)$$

Производная по времени магнитного потока ротора по оси  $d$  из уравнений напряжений системы (1):

$$\frac{d\psi_{kd}}{dt} = -R_{kd} I_{kd}. \quad (8)$$

(3) и (8) подставляются в (7):

$$\begin{aligned} -R_{kd} (\psi_d - L_d I_d - L_{ad} I_f) = \\ = L_{kd} \left( \frac{d\psi_d}{dt} - a \frac{dI_d}{dt} - b \frac{dI_f}{dt} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Производная магнитного потока статора по оси  $d$  от времени:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = a \frac{dI_d}{dt} + b \frac{dI_f}{dt} - \frac{R_{kd}}{L_{kd}} \psi_d + \frac{L_d I_d R_{kd}}{L_{kd}} + \frac{L_{ad}}{L_{kd}} R_{kd} I_f. \quad (10)$$

Полученное дифференциальное уравнение для определения магнитного потока статора по оси  $d$   $\psi_d$  записано относительно тока статора  $I_d$  и тока обмотки возбуждения  $I_f$ .

Можно исключить ток возбуждения  $I_f$  из входных величин, используя преобразования.

Для этого (3) подставляется в уравнение магнитного потока обмотки возбуждения из (2):

$$\begin{aligned} \psi_f &= L_f I_f + L_{ad} I_d + \psi_d - L_d I_d - L_{ad} I_f = \\ &= (L_f - L_m) I_f + (L_m - L_d) I_d + \psi_d. \end{aligned} \quad (11)$$

Производная по времени магнитного потока возбуждения

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_f}{dt} &= (L_f - L_m) \frac{dI_f}{dt} + \\ &+ (L_m - L_d) \frac{dI_d}{dt} + \frac{d\psi_d}{dt}. \end{aligned} \quad (12)$$

Производная по времени магнитного потока возбуждения из уравнения напряжений системы (1):

$$\frac{d\psi_f}{dt} = -R_f I_f + U_f. \quad (13)$$

(13) подставляется в (12):

$$\begin{aligned} -R_f I_f + U_f &= (L_f - L_m) \frac{dI_f}{dt} + \\ &+ (L_m - L_d) \frac{dI_d}{dt} + \frac{d\psi_d}{dt}. \end{aligned} \quad (14)$$

Производная тока возбуждения по времени:

$$\begin{aligned} \frac{dI_f}{dt} &= \frac{(L_d - L_m)}{(L_f - L_m)} \frac{dI_d}{dt} - \frac{R_f I_f}{(L_f - L_m)} + \\ &+ \frac{U_f}{(L_f - L_m)} - \frac{1}{(L_f - L_m)} \frac{d\psi_d}{dt}. \end{aligned} \quad (15)$$

Использование дифференциального уравнения (15) совместно с уравнением (11) позволяет исключить ток возбуждения из входных величин.

Аналогичные преобразования выполняются для уравнений по оси  $q$ .

Из уравнения магнитного потока статора по оси  $q$   $\psi_q$  из (2) выражается ток демпферного контура  $I_{kq}$ :

$$I_{kq} = \frac{\psi_q - L_q I_q}{L_{aq}}. \quad (16)$$

(16) подставляется в уравнение магнитного потока ротора по оси  $q$   $\psi_{kq}$  из (2):

$$\begin{aligned} \psi_{kq} &= \frac{L_{kq}}{L_{aq}} \left( \psi_q - L_q I_q + \frac{L_{aq}^2}{L_{kq}} I_q \right) = \\ &= \frac{L_{kq}}{L_{aq}} (\psi_q - I_q c), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{где } c = L_q - \frac{L_{aq}^2}{L_{kq}}. \quad (18)$$

Производная по времени магнитного потока ротора по оси  $q$   $\psi_{kq}$  из уравнений напряжений системы (1):

$$\frac{d\psi_{kq}}{dt} = -R_{kq} I_{kq}. \quad (19)$$

(16) и (19) подставляется в (17):

$$-R_{kq} (\psi_q - L_q I_q) = L_{kq} \left( \frac{d\psi_q}{dt} - c \frac{dI_q}{dt} \right). \quad (20)$$

Производная магнитного потока статора по оси  $q$   $\psi_q$  от времени:

$$\frac{d\psi_q}{dt} = c \frac{dI_q}{dt} - \frac{R_{kq}}{L_{kq}} \psi_q + \frac{L_q I_q R_{kq}}{L_{kq}}. \quad (21)$$

Полученное дифференциальное уравнение для определения магнитного потока по оси  $q$   $\psi_{kq}$  записано относительно тока статора по оси  $q$   $I_q$ .

Дополняя уравнения (11) и (21) уравнениями  $dq$  преобразований фазных напряжений и токов [2, 3] и уравнениями напряжений  $U_d$  и  $U_q$  системы (1), получаем уравнения для бездатчиковой системы управления синхронным двигателем. Добавление (15) в систему уравнений (22) исключает ток возбуждения из входных величин.

Система (22) содержит 8 неизвестных: напряжения и токи в  $dq$  координатах  $U_d$ ,  $U_q$  и  $I_d$ ,  $I_q$ ; магнитные потоки статора в  $dq$  координатах  $\psi_d$ ,  $\psi_q$ ; скорость вращения

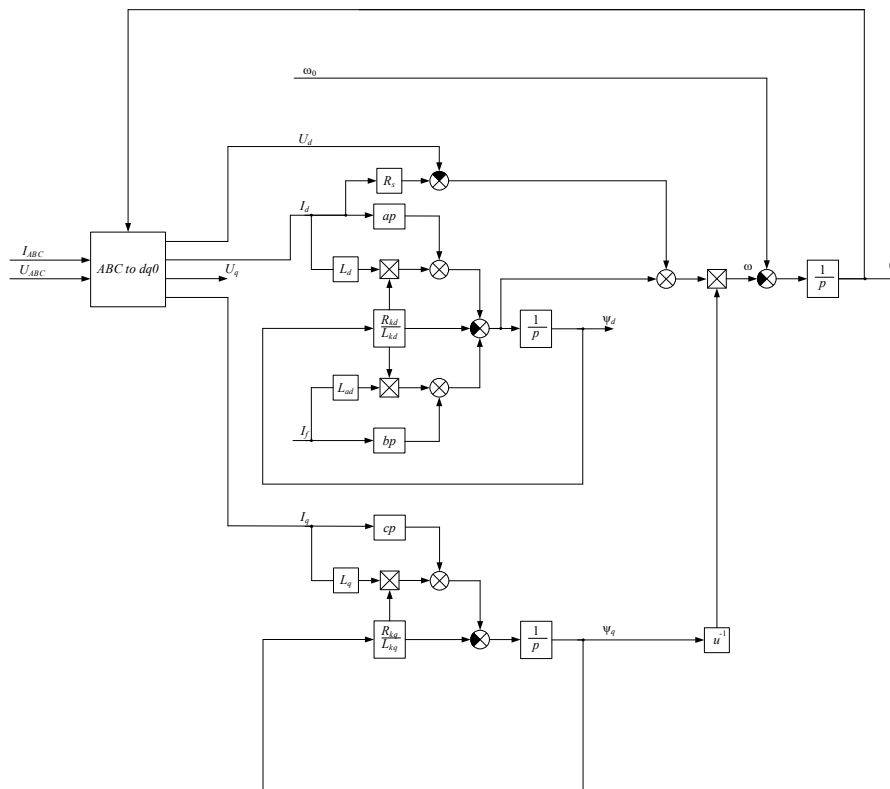
ротора  $\omega$  и угол нагрузки (угол поворота координатных осей)  $\theta$ .

Входными величинами являются токи статора  $I_A, I_B, I_C$  и ток обмотки возбуждения  $I_f$ , напряжения статора  $U_A, U_B, U_C$  и напряжение обмотки возбуждения  $U_f$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = \frac{2}{3} [U_A \cdot \cos \gamma + U_B \cdot \cos(\gamma - 120^\circ) + U_C \cdot \cos(\gamma - 120^\circ)], \\ U_q = -\frac{2}{3} [U_A \cdot \sin \gamma + U_B \cdot \sin(\gamma - 120^\circ) + U_C \cdot \sin(\gamma - 120^\circ)], \\ I_d = \frac{2}{3} [I_A \cdot \cos \gamma + I_B \cdot \cos(\gamma - 120^\circ) + I_C \cdot \cos(\gamma - 120^\circ)], \\ I_q = -\frac{2}{3} [I_A \cdot \sin \gamma + I_B \cdot \sin(\gamma - 120^\circ) + I_C \cdot \sin(\gamma - 120^\circ)], \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_0 - \omega, \\ \frac{d\Psi_q}{dt} = c \frac{dI_q}{dt} - \frac{R_{kq}}{L_{kq}} \Psi_q + \frac{L_q I_q R_{kq}}{L_{kq}}, \\ \frac{d\Psi_d}{dt} = a \frac{dI_d}{dt} + b \frac{dI_f}{dt} - \frac{R_{kd}}{L_{kd}} \Psi_d + \frac{L_d I_d R_{kd}}{L_{kd}} + \frac{L_{ad}}{L_{kd}} R_{kd} I_f, \\ U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q + R_s \cdot I_d, \\ U_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \cdot \Psi_d + R_s \cdot I_q. \end{array} \right. \quad (22)$$

Рассмотрим, как происходит расчет скорости в системе (22). Входные величины фазных токов и напряжений  $I_A, I_B, I_C$  и  $U_A, U_B, U_C$  используются для вычисления токов и напряжений в  $dq$  координатах  $U_d, U_q$  и  $I_d, I_q$  при заданном начальном положении координат ( $\theta = 0$ ). Шестое и седьмое уравнения системы служат для вычисления магнитных потоков в  $dq$  координатах  $\Psi_d, \Psi_q$ . Для вычисления скорости может быть использовано любое из уравнений 8 и 9 системы (22). Далее с помощью пятого уравнения вычисляется угол положения координат  $\theta$ , и снова пересчитываются токи и напряжения в  $dq$  координатах  $U_d, U_q$  и  $I_d, I_q$ .

На рисунке 1 представлена структурная схема бездатчикового определения скорости двигателя.



**Рисунок 1.**  
Структурная схема  
бездатчикового  
определения скорости

**Figure 1.** Block diagram  
of sensorless speed  
detection



**Выводы**

1. Предложен алгоритм вычисления скорости ротора синхронных электродвигателей.
2. Исследования работы алгоритма, выполненное на имитационной модели

в программном комплексе Matlab Simulink, показали высокую точность разработанного алгоритма.

3. Разработанный алгоритм может быть использован в электроприводах с синхронными электродвигателями

**Список источников**

1. Shao L., Zheng Ch., Zhang Ya., Xie G., Hao X., Zheng X. Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Sensorless Control System Based on Integral Backstepping Controller and Enhanced Linear Extended State Observer // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. No. 13 (3). P. 1680. DOI: 10.3390/app13031680.
2. Cui J., Xing W., Qin H., Hua Y., Zhang X., Liu X. Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on Adaptive Kalman Filter // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. No. 12 (10). P. 4944. DOI: 10.3390/app12104944.
3. Ye T., Li Zh., Ke D., Wang F. Research on Complex Vector Quasi-Resonant Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Motor // *Energy Reports*. 2023. No. 9(5). P. 228-235. DOI: 10.1016/j.egy.2023.03.006.
4. Li H., Chen Q., Xie W., Lei Sh. Research on Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2174/1/012073.
5. Liu Zh., Chen W. Research on an Improved Sliding Mode Observer for Speed Estimation in Permanent Magnet Synchronous Motor // *Processes*. 2022. No. 10 (6). P. 1182. DOI: 10.3390/pr10061182.
6. Sun Y., Cui Q., Yuan Y. Research on Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Second-Order Sliding Mode // *Progress in Electromagnetics Research M*. 2019. No. 85. P. 11–20. DOI: 10.2528/PIERM19070201.
7. Wang Ch., Li H., Lu Yu., Song Zh. Research of Controller of Permanent Magnet Linear Synchronous Motors via Model Predictive Direct Thrust Control // *MATEC Web of Conferences*. 2022. No. 363 (7). P. 01014. DOI: 10.1051/mateconf/202236301014.
8. Gong H.-L., Chai F., Cheng S.-K. Research on Inductance Parameters of High Torque Permanent Magnet In-Wheel Motor. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*, 2010.
9. Liu X., Li Yu., Xia L., Tan X., Cao X. Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Algorithm Based on Linear Nonlinear Switching

Self-Disturbance Rejection Control // *Scientific Reports*. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2944882/v1.

10. Zhang H., Chen X., Liu P., Zhao D., Wang B. Research on Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on improved MRAS // *2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 14-16 April 2023. 2023. DOI: 10.1109/ACPEE56931.2023.10135880.
11. Hongbo Qui, Yanqi Wei, Xi Fang Zhao, Cunxiang Yang, Run Yi. Research on the Influence of Rotational Speed on the Performance of High-Speed Permanent-Magnet Generator // *Archives Electrical Engineering*. 2019. No. 68 (1). P. 77-90. DOI: 10.24425/ae.2019.125981.
12. Lu J., Wang W., Zhang Ju., Su J. Research on Sensorless Control of Built-In Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Extended Kalman Filter Algorithm // *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. No. 2479 (1). P. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/2479/1/012063.
13. Guo Sh., Zhao Bo., Zhang C., Lu B., Chu Yu., Yang P. Research on a Limit Analytical Method for a Low-Speed Micro Permanent Magnet Torque Motor with Back Winding // *Energies*. 2022. No. 15 (13). P. 4662. DOI: 10.3390/en15134662.
14. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: Издательство МЭИ, 1997. С. 70-75. ISBN 5-7046-0177-4.
15. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с. ISBN 978-5-7695-4505-4.

**References**

1. Shao L., Zheng Ch., Zhang Ya., Xie G., Hao X., Zheng X. Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Sensorless Control System Based on Integral Backstepping Controller and Enhanced Linear Extended State Observer. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2023, No. 13(3), pp. 1680. DOI: 10.3390/app13031680.
2. Cui J., Xing W., Qin H., Hua Y., Zhang X., Liu X. Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on Adaptive Kalman

Filter. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2022, No. 12 (10), pp. 4944. DOI: 10.3390/app12104944.

3. Ye T., Li Zh., Ke D., Wang F. Research on Complex Vector Quasi-Resonant Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Motor. *Energy Reports*, 2023, No. 9 (5), pp. 228-235. DOI: 10.1016/j.egy.2023.03.006.

4. Li H., Chen Q., Xie W., Lei Sh. Research on Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2174/1/012073.

5. Liu Zh., Chen W. Research on an Improved Sliding Mode Observer for Speed Estimation in Permanent Magnet Synchronous Motor. *Processes*, 2022, No. 10 (6), pp. 1182. DOI: 10.3390/pr10061182.

6. Sun Y., Cui Q., Yuan Y. Research on Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Second-Order Sliding Mode. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2019, No. 85, pp. 11–20. DOI: 10.2528/PIERM19070201.

7. Wang Ch., Li H., Lu Yu., Song Zh. Research of Controller of Permanent Magnet Linear Synchronous Motors via Model Predictive Direct Thrust Control. *MATEC Web of Conferences*, 2022, No. 363 (7), pp. 01014. DOI: 10.1051/mateconf/202236301014.

8. Gong H.-L., Chai F., Cheng S.-K. *Research on Inductance Parameters of High Torque Permanent Magnet In-Wheel Motor*. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao, 2010.

9. Liu X., Li Yu., Xia L., Tan X., Cao X. Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Algorithm Based on Linear Nonlinear Switching Self-Disturbance Rejection Control. *Scientific Reports*, 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2944882/v1.

10. Zhang H., Chen X., Liu P., Zhao D., Wang B. Research on Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on improved MRAS. *2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 14-16 April 2023. 2023. DOI: 10.1109/ACPEE56931.2023.10135880.

11. Hongbo Qui, Yanqi Wei, Xi Fang Zhao, Cunxiang Yang, Run Yi. Research on the Influence of Rotational Speed on the Performance of High-Speed Permanent-Magnet Generator. *Archives Electrical Engineering*, 2019, No. 68 (1), pp. 77-90. DOI: 10.24425/aee.2019.125981

12. Lu J., Wang W., Zhang Ju., Su J. Research on Sensorless Control of Built-In Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Extended Kalman Filter Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, No. 2479 (1), pp. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/2479/1/012063.

13. Guo Sh., Zhao Bo., Zhang C., Lu B., Chu Yu., Yang P. Research on a Limit Analytical Method for a Low-Speed Micro Permanent Magnet Torque Motor with Back Winding. *Energies*, 2022, No. 15 (13), pp. 4662. DOI: 10.3390/en15134662.

14. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. *Perekhodnye protsessy v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya, obuslovlennyye elektrodvigatel'noi nagruzkoi* [Transient Processes in Modern Industrial Power Supply Caused by Electric Motor Control]. Moscow, Izdatel'stvo MEI, 1997, pp. 70-75. ISBN 5-7046-0177-4. [in Russian].

15. Sokolovskii G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Electric Drives with Frequency Regulation]. Moscow, Izdatel'skii tsentr «Akademiya», 2006. 272 p. ISBN 978-5-7695-4505-4. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 24.01.2024; одобрена после рецензирования 11.02.2024; принята к публикации 21.02.2024.*

*The article was submitted 24.01.2024; approved after reviewing 11.02.2024; accepted for publication 21.02.2024.*

Научная статья

УДК 519.71

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-97-105

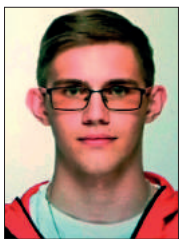
## СИНТЕЗ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ВЕРТОЛЕТА ПО КОМПЛЕКСУ ВНУТРИДВИГАТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

**Алина Александровна Зайцева****Alina A. Zaitseva**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Матвей Владимирович Белявцев****Matvey V. Belyavtsev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Евгений Артемович Зайцев****Evgeny A. Zaitsev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Дмитрий Константинович Кильмаков****Dmitriy K. Kilmakov**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Иван Петрович Силин****Ivan P. Silin**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия



**Владислав Федорович Гаврилов**

**Vladislav F. Gavrilov**

*студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия*

### **Актуальность**

Рассматривается задача синхронизации двигателей в рамках многодвигательной силовой установки вертолета. Актуальность данного исследования состоит в разработке интегрированной системы управления силовой установкой вертолета по комплексу внутривидеометрических параметров, в достаточной степени характеризующих мощность двигателей.

### **Цель исследования**

Цель такой синхронизации состоит в предотвращении недопустимых режимов работы и в обеспечении равномерного расходования ресурса каждым из двигателей.

### **Задачи исследования:**

1. разработка математической модели системы управления силовой установкой вертолета в составе двух турбовальных двигателей ARRIUS 2G с редуктором и двухрядным винтом, позволяющей комплексно оценивать поведение основных газодинамических параметров для автоматического и ручного режимов управления;
2. разработка метода синтеза интегрированной системы управления силовой установкой вертолета с использованием комплекса газодинамических параметров, позволяющих оценивать располагаемые мощности двигателей и выравнивать их значения.

### **Метод исследования**

Поставленные задачи решались с использованием методов системного анализа, теории систем автоматического управления, линейной алгебры, функционального анализа, нечетких множеств, компьютерного моделирования.

### **Результаты**

1. Разработана математическая модель системы управления силовой установкой вертолета в составе двух турбовальных двигателей ARRIUS 2G с редуктором и двухрядным винтом, позволившая обосновать выбор комплекса управляемых параметров, в достаточной степени характеризующих мощность каждого из двигателей.
2. Разработан метод синтеза интегрированной системы управления силовой установкой вертолета, обеспечивающий синхронизацию режимов работы двигателей, что устраняет неравномерную нагрузку на главный редуктор трансмиссии и неравномерную выработку ресурса из-за разницы в мощности, отдаваемой каждым из двигателей.

### **Ключевые слова**

синтез, синхронизация, силовая установка, вертолет

**Для цитирования:** Зайцева А. А., Белявцев М. В., Зайцев Е. А., Кильмаков Д. К., Силин И. П., Гаврилов В. Ф. Синтез интегрированной системы управления многодвигательной силовой установкой вертолета по комплексу внутривидеометрических параметров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 97-105. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-97-105>.



Original article

## SYNTHESIS OF AN INTEGRATED CONTROL SYSTEM FOR A HELICOPTER MULTI-ENGINE POWER PLANT ACCORDING TO A COMPLEX OF INTRA-ENGINE PARAMETERS

### Relevance

The problem of engine synchronization within the framework of a multi-engine helicopter power plant is considered. The relevance of this research lies in the development of an integrated control system for the helicopter power plant based on a set of intra-engine parameters that sufficiently characterize the engine power.

### Aim of research

The aim of such synchronization is to prevent unacceptable operating conditions and to ensure uniform consumption of the resource by each of the engines.

### The objectives of the study are:

1. development of a mathematical model of the helicopter power plant control system consisting of two ARRIUS 2G turboshaft engines with a gearbox and a double-row propeller, which allows for a comprehensive assessment of the behavior of the main gas-dynamic parameters for automatic and manual control modes;
2. a method has been developed for the synthesis of an integrated control system for a helicopter power plant using a set of gas-dynamic parameters that make it possible to estimate the available engine powers and equalize their values.

### Research method

The problems were solved using methods of system analysis, theory of automatic control systems, linear algebra, functional analysis, fuzzy sets, and computer modeling.

### Results

1. A mathematical model of the helicopter power plant control system consisting of two ARRIUS 2G turboshaft engines with a gearbox and a double-row propeller has been developed, which made it possible to justify the choice of a set of controlled parameters that sufficiently characterize the power of each engine.
2. A method has been developed for synthesizing an integrated helicopter power plant control system that ensures synchronization of engine operating modes, which eliminates uneven load on the main transmission gearbox and uneven service life due to the difference in power supplied by each engine.

### Keywords

synthesis, synchronization, power plant, helicopter

**For citation:** Zaitseva A. A., Belyavtsev M. V., Zaitsev E. A., Kilmakov D. K., Silin I. P., Gavrillov V. F. Sintez integrirovannoy sistemy upravleniya mnogodvigatel'noy silovoy ustanovki vertoletov po kompleksu vnutridvigatel'nykh parametrov [Synthesis of an Integrated Control System for a Helicopter Multi-Engine Power Plant According to a Complex of Intra-Engine Parameters]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 97-105. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-97-105>.

Современные тенденции в вертолетостроении связаны с проектом создания высокоскоростного вертолета. Реализация концепции перспективного скоростного вертолета требует разработки высоко-

коэффициентной силовой установки, обеспечивающей высокую скорость и большую дальность полета, а также возможность посадки на неподготовленные площадки. В связи с этим ведутся работы



по созданию перспективного облика силовой установки, который коренным образом будет отличаться от существующих технических схем как по составу двигателей, так и по конструкции трансмиссии. Так, силовые установки вертолета Ка-92 фирмы «Камов» и S-97 фирмы Sikorsky Aircraft, построенные по технологии Х2, включают два турбовальных двигателя и сложную трансмиссию, состоящую из комбинации несущих соосных жестких винтов и хвостового толкающего винта. В свою очередь, в состав трехдвигательной силовой установки вертолета Sikorsky S-69/ХН-59А, а также высокоскоростного вертолета Ка-90 входят два турбовальных двигателя, приводящих в движение несущий винт с жесткими и укороченными лопастями, и турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД). Предполагается, что скорость вертолета Ка-90 в режиме крейсерского полета может достигать 800 км/ч.

Сложный характер взаимодействия двигателей в составе многодвигательной силовой установки, работающих на общую трансмиссию, обуславливает следующие проблемы согласования отдельных контуров управления при изменении режимов работы двигателей:

- неравномерная нагрузка на главный редуктор трансмиссии и неравномерная выработка ресурса из-за разницы в мощности, отдаваемой каждым из двигателей;

- поддержание в заданных пределах требуемых значений основных газодинамических параметров при переходе на ручной режим управления с целью защиты главного редуктора от превышения крутящего момента или двигателя от перегрева.

Чтобы устранить дисбаланс мощностей двигателей в составе силовой установки, в настоящее время применяется способ [1], основанный на использовании

параметров, позволяющих оценивать располагаемые мощности двигателей и выравнивать их значения за счет введения корректирующих сигналов в систему управления силовой установкой вертолета. Согласно рекомендациям ОАО «Камов», в качестве контролируемого параметра целесообразно выбирать частоту вращения ротора турбокомпрессора. Указанный способ имеет существенный недостаток, который заключается в том, что измеряемые частоты вращения лишь косвенно связаны с мощностью, поэтому согласование режимов работы двигателей по частотам вращения в общем случае не обеспечивает равенства их мощностей. При этом уровень согласования последних зависит от индивидуальных характеристик двигателей и внешних условий, что предполагает экспериментальную настройку структуры и параметров системы управления при стендовых испытаниях двигателя.

Силовая установка современного вертолета строится, как правило, по двухдвигательной схеме, когда два турбовальных двигателя со свободными турбинами нагружены на общую механическую трансмиссию, которая приводит во вращение несущие винты вертолета. На систему управления силовой установкой возлагается задача поддержания постоянной частоты вращения винтов во всех рабочих режимах. В настоящее время разработаны подсистемы управления параметрами силовых установок [2, 3], обеспечивающие высокую точность и качество управления на заданных режимах работы двигателя и для фиксированного диапазона изменения внешних условий [4–6]. Однако этого оказывается недостаточно для получения высоких показателей при совместном функционировании двух двигателей в рамках интегрированной системы управления. Дело в том, что любое минимальное различие как в параметрах двигателей, так

и в настройках регуляторов частоты вращения может стать причиной значительной разницы в мощности, отдаваемой каждым из двигателей. Это приводит к неравномерной нагрузке на главный редуктор трансмиссии и неравномерной выработке ресурса двигателей.

Следовательно, при построении интегрированной системы управления силовой установкой вертолета возникает задача согласования отдельных подсистем с учетом глобальной цели функционирования всей системы при одновременном поддержании в заданных пределах требуемых значений основных газодинамических параметров [7, 8].

В данной статье предлагается *метод синтеза интегрированной системы управления многодвигательной силовой установки вертолета* по комплексу внутриводительных параметров, в достаточной степени характеризующих мощность каждого из двигателей. Формирование этого комплекса осуществляется на основе исследования математической модели системы управления силовой установкой вертолета в составе двух турбовальных двигателей ARRIUS 2G с редуктором и двухрядным винтом [9].

Разработка математической модели проводилась в три этапа:

- формирование универсальной поэлементной нелинейной модели, отражающей физическое взаимодействие отдельных агрегатов и внешних устройств;

- построение линеаризованной модели заданной части системы;

- синтез управляющей части системы.

Двигатели семейства ARRIUS относятся к классу турбовальных двигателей с силовой турбиной мощностью 500 кВт, в состав каждого из которых входят следующие агрегаты:

- турбокомпрессор, включающий воздухозаборник кольцевого типа, одно-

ступенчатый центробежный компрессор, кольцевую противоточную камеру сгорания, одноступенчатую осевую турбину;

- силовая турбина, представляющая собой одноступенчатую осевую турбину с соосным валом трансмиссии, заключенным в вал турбокомпрессора;

- выпускной диффузор.

Математическая модель описывает основные физические процессы, сопровождающие работу двигателя: впуск и сжатие воздуха, сгорание топлива, расширение продуктов горения и передача энергии механическому движителю (рисунок 1).

Объединяет все процессы, протекающие в турбокомпрессоре двигателя, уравнение движения ротора турбокомпрессора:

$$J_{T_k} \frac{dn_{T_k}}{dt} = \frac{1}{(\pi/30)^2} \cdot \frac{L_T - L_K}{n_{T_k}}, \quad (1)$$

где  $J_{T_k}$  — полярный момент инерции вращающихся масс ротора турбокомпрессора;

$n_{T_k}$  — частота вращения ротора турбокомпрессора;

$L_T, L_K$  — эффективные мощности соответственно турбины и компрессора.

Передача мощности от силовой турбины к движителю — воздушному винту — происходит через внутренний вал трансмиссии и редуктор.

Вращение основного силового привода через трансмиссию подчиняется следующему уравнению динамики:

$$J_{CT} \frac{dn_{CT}}{dt} = \frac{1}{(\pi/30)^2} \cdot \frac{L_{CT} \eta_{тр} - L_{винт} - L_{агр}}{n_{CT}}, \quad (2)$$

где  $J_{CT}$  — полярный момент инерции силовой турбины;

$n_{CT}$  — частота вращения силовой турбины;

$L_{CT}$  — мощность силовой турбины;

$L_{винт} = C_{винт} \rho_v n_{винт}^3 D^5$  — суммарная мощность соосных винтов;

$C_{винт} = C_{винт}(\varphi_{винт}; \lambda_{винт})$  — коэффициент мощности винтов, который зави-

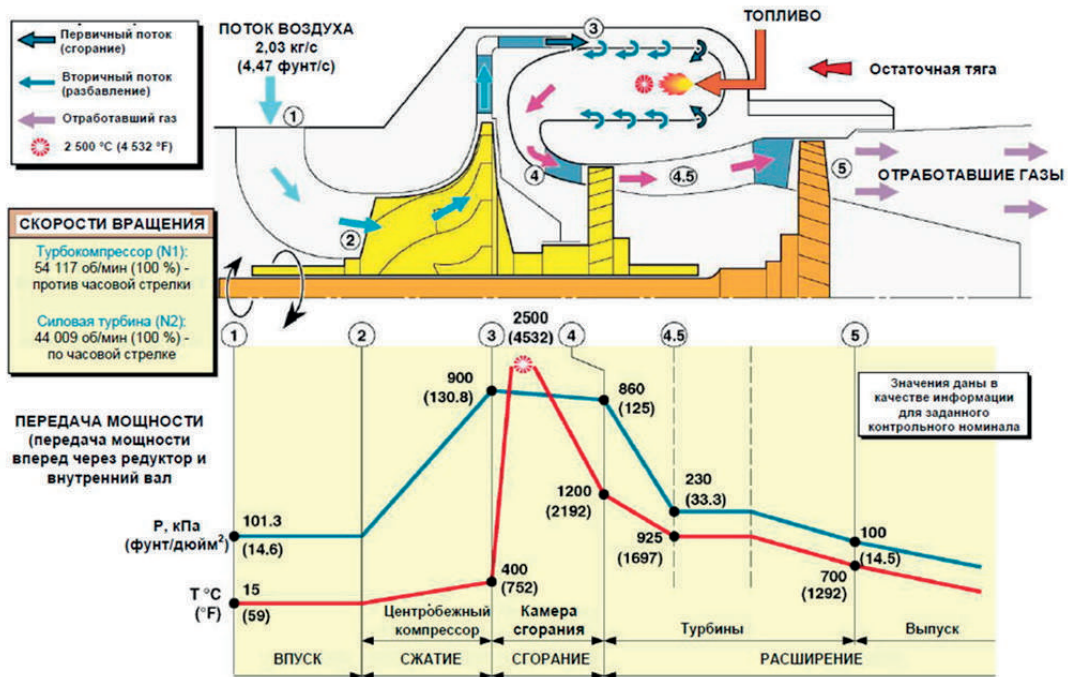


Рисунок 1. Рабочие процессы в двигателе

Figure 1. Working processes in the engine

сит от  $\lambda_{винт} = \frac{V_n}{n_{винт} D}$  — поступи винтов

и  $\phi_{винт}$  — угла установки лопастей винтов;

$n_{винт}$  — частота вращения винтов;

$D$  — диаметр винтов;

$V_n$  — скорость полета вертолета;

$L_{агр}$  — мощность, идущая на привод агрегатов;

$\eta_{тр}$  — КПД трансмиссии.

Линеаризация уравнений (1), (2) позволяет получить следующую модель для одного двигателя, в которой фигурируют относительные отклонения соответствующих переменных:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{n_{Тк}} &= \beta_{1,1}x_{n_{Тк}} + \beta_{1,2}x_{G_m} ; \\ \dot{x}_{n_{СТ}} &= \beta_{2,1}x_{n_{Тк}} + \beta_{2,2}x_{n_{СТ}} + \beta_{2,3}x_{G_m} . \end{aligned} \quad (3)$$

Система линеаризованных уравнений позволяет также сформировать комплекс параметров, характеризующих величины мощностей турбокомпрессора  $x_{L_T}^{(i)}$  и силовой турбины  $x_{L_{CT}}^{(i)}$  для каждого из двигателей ( $i=1, 2$ ):

$$x_{L_T}^{(i)} = c_{1,1}^{(i)}x_{n_{Тк}}^{(1)} + c_{1,2}^{(i)}x_{n_{СТ}}^{(i)} ;$$

$$x_{L_{CT}}^{(i)} = c_{2,1}^{(i)}x_{n_{Тк}}^{(1)} + c_{2,2}^{(i)}x_{n_{СТ}}^{(i)} . \quad (4)$$

Объединяя системы уравнений состояния (3) для каждого из двух двигателей и уравнения (4), получаем систему уравнений силовой установки вертолета в стандартной форме записи:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x(t) = \begin{bmatrix} x_{n_{Тк}}^{(1)} ; x_{n_{СТ}}^{(1)} ; x_{n_{Тк}}^{(2)} ; x_{n_{СТ}}^{(2)} \end{bmatrix}^T$ ,

$$y(t) = \begin{bmatrix} x_{L_T}^{(1)} ; x_{L_{CT}}^{(1)} ; x_{L_T}^{(2)} ; x_{L_{CT}}^{(2)} \end{bmatrix}^T$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} x_{G_m}^{(1)} ; x_{G_m}^{(2)} \end{bmatrix}^T$$

— векторы переменных состояния, выходных координат и управляющих воздействий.

На основе полученной модели предлагается метод синтеза интегрированной системы управления силовой установкой по комплексу внутрдвигательных параметров  $y(t)$ , обеспечивающий синхрони-

зацию режимов работы двигателей с учетом требований к устойчивости и качеству процессов управления. Метод предусматривает измерение параметров, позволяющих оценивать располагаемые мощности двигателей и выравнять их значения за счет введения корректирующих сигналов в систему управления силовой установкой вертолета. С этой целью требуется найти закон управления по выходу

$$u(t) = g(t) - Ky(t), \quad (6)$$

где  $K$  — действительная постоянная матрица, обеспечивающая желаемый закон  $Z^*$  распределения корней характеристического полинома замкнутой системы

$$\dot{x}(t) = (A - BKC)x(t) + Bg(t). \quad (7)$$

Основная идея предлагаемого метода основана на декомпозиции задачи синтеза [10], позволяющей свести решение исходной нелинейной задачи параметрического синтеза высокой размерности к последовательности линейных задач убывающей размерности. Это достигается за счет изменения базиса исходной модели и представления матрицы замкнутой системы в блочном виде:

$$A_C = \left[ \begin{array}{c|c} a_{11} - B_1 R_1 & A_{12} - B_1 R_2 \\ \hline A_{21} - B_2 R_1 & A_{22} - B_2 R_2 \end{array} \right],$$

здесь  $A_{12}$  — вектор-строка матрицы  $A$  размера  $1 \times (n-1)$  ( $n = \dim A$ );

$A_{21}$  — вектор-столбец той же матрицы размера  $(n-1) \times 1$ ;

$A_{22}$  — квадратная подматрица матрицы  $A$  размера  $(n-1) \times (n-1)$ , соответственно;

$B_1$  и  $R_1$  — первая строка и первый столбец матриц  $B$  и  $R=KC$ .

Переход к новому базису осуществляем с использованием преобразования подобия

$$\tilde{A}_C = P^{-1} A_C P, \quad \text{где} \quad P = \left[ \begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline T & I_{n-1} \end{array} \right];$$

$$P^{-1} = \left[ \begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ \hline -T & I_{n-1} \end{array} \right],$$

$T$  — вектор-столбец размера  $(n-1) \times 1$ .

После преобразования получаем

$$\tilde{A}_C = \left[ \begin{array}{c|c} a_{11} + A_{12}T - B_1F & A_{12} - B_1R_2 \\ \hline -T(a_{11} + A_{12}T - B_1F) + A_{21} + A_{22}T - B_2F & -TA_{12} + A_{22} + (TB_1 - B_2)R_2 \end{array} \right].$$

Полученная форма представления матрицы замкнутой системы позволяет сформировать совокупность систем линейных алгебраических уравнений относительно вспомогательных переменных  $T$  и  $F = (R_1 + R_2T)$ , которые последовательно задают желаемые значения элементам матрицы замкнутой системы, расположенным на главной диагонали, обнуляя одновременно все элементы, расположенные ниже.

*Алгоритм*, реализующий описанную процедуру, можно представить в следующем виде.

*Шаг 1.* Формирование системы уравнений, исходя из требования, чтобы первый столбец матрицы  $\tilde{A}_C$  за исключением его первого элемента был нулевым, а первый элемент был равен заданному значению из множества  $Z^*$ :

$$\begin{aligned} a_{11} + A_{12}T - B_1F &= z_1^*; \\ -Tz_1^* + A_{21} + A_{22}T - B_2F &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

*Шаг 2.* Решение системы (8) обеспечивает следующую структуру матрицы  $\tilde{A}_C$ :

$$\tilde{A}_C = \left[ \begin{array}{c|c} z_1^* & A_{12} - B_1R_2 \\ \hline 0 & -TA_{12} + A_{22} + (TB_1 - B_2)R_2 \end{array} \right].$$

*Шаг 3.* Представляем подматрицу  $\tilde{A}_C^{(1)} = -TA_{12} + A_{22} + (TB_1 - B_2)R_2$  в следующей эквивалентной форме  $\tilde{A}_C^{(1)} = A^{(1)} - B^{(1)}R_2$  и требуем размещения ее характеристических чисел аналогичным способом за счет матрицы  $R_2$ .

*Шаг 4.* Применяем шаг 3 по отношению ко всем оставшимся матрицам  $A^{(k+1)} = -T^{(k)}A_{12}^{(k)} + A_{22}^{(k)}$ ,  $B^{(k+1)} = B_2^{(k)} - T^{(k)}B_1^{(k)}$  и новой совокупности вспомогательных переменных  $T^{(k)}$  и  $F^{(k)}$ .

*Шаг 5.* Восстанавливаем в обратном порядке матрицу  $R$ :

$$R_1^{(k)} = F^{(k)} - R_2^{(k)}T^{(k)}.$$



На первом шаге этого алгоритма формируется первый столбец матрицы. На втором шаге формируется блочная структура матрицы, содержащая подматрицу меньшей размерности, применительно к которой на шаге 3 происходит размещение ее характеристических чисел. На шаге 4 эта процедура повторяется для всех оставшихся подматриц. На завершающем шаге алгоритма происходит восстановление в обратном порядке исходной матрицы параметров.

Существенным преимуществом описанного метода синтеза является возможность использования матрицы параметров управляющей части системы  $K$  полного ранга, что позволяет, в частности, независимо регулировать мощности каждого из двигателей.

### Выводы

В данной статье сформулирована и решена задача построения интегрированной системы автоматического управле-

ния многодвигательной силовой установкой вертолета, обеспечивающей согласование режимов работы двигателей при одновременном поддержании в заданных пределах требуемых значений основных газодинамических параметров.

1. Разработана математическая модель системы управления силовой установкой вертолета в составе двух турбовальных двигателей ARRIUS 2G с редуктором и двухрядным винтом, позволившая обосновать выбор комплекса управляемых параметров, в достаточной степени характеризующих мощность каждого из двигателей.

2. Разработан метод синтеза интегрированной системы управления силовой установкой вертолета, обеспечивающий синхронизацию режимов работы двигателей, что устраняет неравномерную нагрузку на главный редуктор трансмиссии и неравномерную выработку ресурса из-за разницы в мощности, отдаваемой каждым из двигателей.

### Список источников

1. Миргород В.Ф. Математическая модель силовой установки вертолета в составе двух турбовальных двигателей с редуктором и двухрядным винтом: анализ алгоритмов синхронизации // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 7 (64). С. 125–131.

2. Серебряков Н.Н., Шорр Б.Ф., Стадников А.Н., Шадрин Д.В. Экспериментально-расчетные исследования эффективности различных способов демпфирования колебаний рабочих лопаток ГТД // *Основные результаты научно-технической деятельности*. М.: ЦИАМ, 2005. С. 267–268.

3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Санд В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: в 5 т. М.: Машиностроение, 2008. Т. 5. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. 200 с.

4. Григорьев В.А., Калабухов Д.С., Радько В.М. Применение методов нейросетевой аппроксимации при обобщении и представлении характеристик лопаточных машин авиационных ГТД // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2015. № 1. С. 39–43. EDN: UCUIQD.

5. Григорьев В.А., Загребельный А.О. К задаче определения проектных параметров газотурбинного двигателя вертолета // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2014. № 3. С. 41–43. EDN: THURX.

6. Михайлова А.Б. Расчет характеристик осевых компрессоров авиационных ГТД совместно с границей устойчивой работы с помощью расширенной методики обобщенных зависимостей // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2014. № 3. С. 55–59. EDN: CZCRGT.

7. Гаркушенко В.И., Безбрыззов М.В., Баркос Дж. Синтез корректирующего закона управления для повышения качества стабилизации вертолета // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2012. № 3. С. 18–21. EDN: PINQBL.

8. Касумов Е.В. Моделирование динамики поведения вертолета под управляющим воздействием системы стабилизации и управления // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2013. № 3. С. 11–14. EDN: STGINF.

9. Микрюков С.Г., Ефанов В.Н., Зайцева А.А. Синтез системы синхронизации режимов работы двигателей силовой установки вертолета // *Авиакосмическое приборостроение*. 2012. № 11. С. 3–9.



10. Чертовской В.Д., Цехановский В.В. Теория автоматизации процедур управления системами. СПб.: Лань, 2024. 168 с. ISBN 978-5-507-48066-1.

11. Лившиц К.И., Параев Ю.И. Теория управления. СПб.: Лань, 2020. 232 с. ISBN 978-5-8114-4497-7.

## References

1. Mirgorod V.F. Matematicheskaya model' silovoi ustanovki vertoleta v sostave dvukh turboval'nykh dvigatelei s reduktorom i dvukhryadnym vintom: analiz algoritmov sinkhronizatsii [Mathematical Model of a Helicopter Power Plant Consisting of Two Turboshaft Engines with a Gearbox and a Double-Row Propeller: Analysis of Synchronization Algorithms]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aviation and Space Technology and Technique*, 2009, No. 7 (64), pp. 125–131. [in Russian].

2. Serebryakov N.N., Shorr B.F., Stadnikov A.N., Shadrin D.V. Eksperimental'no-raschetnye issledovaniya effektivnosti razlichnykh sposobov dempfirovaniya kolebaniy rabochikh lopatok GTD [Experimental and Computational Studies of the Effectiveness of Various Methods of Damping Vibrations of Gas Turbine Engine Blades]. *Osnovnye rezul'taty nauchno-tekhnicheskoi deyatel'nosti* [Basic Results of Scientific and Technical Activities]. Moscow, TsIAM Publ., 2005, pp. 267–268. [in Russian].

3. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sand V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok: v 5 t.* [Fundamentals of the Design of Aircraft Engines and Power Plants: in 5 Vol.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. Vol. 5. Avtomatika i regulirovanie aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok [Vol. 5. Automation and Regulation of Aircraft Engines and Power Plants]. 200 p. [in Russian].

4. Grigor'ev V.A., Kalabukhov D.S., Rad'ko V.M. Primenenie metodov neirosetevoi approksimatsii pri obobshchenii i predstavlenii kharakteristik lopatochnykh mashin aviatsionnykh [GTD Application of Neural Network Approximation Methods in the Generalization and Presentation of the Aircraft Gas Turbine Engine Turbomachinery Characteristics]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2015, No. 1, pp. 39–43. EDN: UCUIQD. [in Russian].

5. Grigor'ev V.A., Zagrebel'nyi A.O. K zadache opredeleniya proektnykh parametrov gazotur-

binnogo dvigatelya vertoleta [the Problem of Determining the Design Parameters of the Gas Turbine Engine for a Helicopter]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2014, No. 3, pp. 41–43. EDN: THIURX. [in Russian].

6. Mikhailova A.B. Raschet kharakteristik osevykh kompressorov aviatsionnykh GTD sovmestno s granitsej ustoychivoi raboty s pomoshch'yu rasshirennoi metodiki obobshchennykh zavisimostei [Joint Prediction of Aircraft Gas Turbine Engine Axial Flow Compressor Off-Design Performance and Surge Line Based on the Expanded Method of Generalized Functions]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2014, No. 3, pp. 55–59. EDN: CZCRGT. [in Russian].

7. Garkushenko V.I., Bezbryazov M.V., Barakos Dzh. Sintez korrektyruyushchego zakona upravleniya dlya povysheniya kachestva stabilizatsii vertoleta [Synthesis of the Correcting Control Law to Improve the Helicopter Stabilization Quality]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2012, No. 3, pp. 18–21. EDN: PINQBL. [in Russian].

8. Kasumov E.V. Modelirovanie dinamiki povedeniya vertoleta pod upravlyayushchim vozdeistviem sistemy stabilizatsii i upravleniya [Modeling of Helicopter Behavior Dynamics under the Controlling Action of the Stabilization and Control System]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2013, No. 3, pp. 11–14. EDN: STGINF. [in Russian].

9. Mikryukov S.G., Efanov V.N., Zaitseva A.A. Sintez sistemy sinkhronizatsii rezhimov raboty dvigatelei silovoi ustanovki vertoleta [Synthesis of a System for Synchronizing the Operating Modes of Helicopter Power Plant Engines]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrumentation*, 2012, No. 11, pp. 3–9. [in Russian].

10. Chertovskoi V.D., Tsekhanovskii V.V. *Teoriya avtomatizatsii protsedur upravleniya sistemami* [Theory of Automation of Systems Management Procedures]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2024. 168 p. ISBN 978-5-507-48066-1. [in Russian].

11. Livshits K.I., Paraev Yu.I. *Teoriya upravleniya* [Control Theory]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2020. 232 p. ISBN 978-5-8114-4497-7. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 26.03.2024; принята к публикации 04.04.2024.

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 26.03.2024; accepted for publication 04.04.2024.

Научная статья

УДК 681.518.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-106-120

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МАСШТАБИРОВАНИЯ БАЗОВОЙ ФУНКЦИИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА СТЕПЕНЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ В ВЕЙВЛЕТ-КАРТИНАХ



*Марина Михайловна Закирничная*  
*Marina M. Zakirnichnaya*

*доктор технических наук, заведующий кафедрой  
«Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*



*Владимир Александрович Варламов*  
*Vladimir A. Varlatov*

*ведущий специалист отдела анализа и персонифицированного учёта  
медицинской помощи,  
Территориальный фонд обязательного медицинского страхования  
Республики Башкортостан, Уфа, Россия*



*Яна Александровна Палладина*  
*Yana A. Palladina*

*аспирант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

Машины роторного типа, к которым относятся центробежные насосные агрегаты (ЦНА), получили широкое применение в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и представляют собой неотъемлемую часть обеспечения технологических процессов. Поэтому предупреждение их аварийного отказа является важнейшей задачей, которая решается с применением виброакустической диагностики. Службами вибродиагностики отделов технического надзора обработка сигналов проводится в основном с помощью спектрального метода анализа вибросигналов, основанного на преобразовании Фурье. Наряду с неоспоримыми достоинствами, к которым относятся простота программной реализации и допустимость оптимизации для анализа многих функций физических процессов, это преобразование обладает определенными недостатками. Например, ввиду потери информации о временном факторе искажается представление о динамике изменения спектрального состава

### Ключевые слова

вейвлет-преобразование,  
виброакустическая  
диагностика,  
искусственный сигнал,  
центробежный насосный  
агрегат, коэффициент  
масштабирования

сигнала, что не позволяет проводить его всесторонний анализ вибросигнала. В связи с этим возникает необходимость в дополнительных методах цифровой обработки сигналов.

За последние годы в процессе исследований, выполненных в Уфимском государственном нефтяном техническом университете, доказано, что для оценки технического состояния насосно-компрессорного оборудования может применяться метод, основанный на вейвлет-преобразовании вибросигналов. Данный вид преобразования способен распознавать не только периодические составляющие сигнала, но и локальные, определять их временные и частотные характеристики, устанавливать взаимосвязь между уровнями вейвлет-разложения и частотными диапазонами работы вейвлет-фильтров.

Определено, что в качестве критерия очистки вибросигнала ЦНА от шумовой составляющей при наличии неисправностей типа «дисбаланс» и «расцентровка» может быть принят уровень разложения при вейвлет-преобразовании сигнала.

Дискретное вейвлет-преобразование вибросигналов предоставляет возможность определения амплитудной модуляции, вызываемой проявлением неисправностей электромагнитного происхождения и неоднородностью воздушного потока в зазоре между ротором и статором электродвигателя, а также идентификации медленно развивающихся (трендовых) сигналов, связанных с дефектами смазки в подшипниках двигателя центробежных насосных агрегатов.

Вейвлет-картины хранят комплексную информацию о сигнале, однако при сочетании нескольких типов неисправностей или дефектов очень сложно выявить лидирующий и степень его развития, особенно на ранних этапах.

При этом характеристикой степени развития неисправности может служить значение коэффициента масштабирования, так как было установлено, что вейвлет-картины начинают всесторонне различаться при установке коэффициента масштабирования вейвлет-преобразования сигналов, начиная со значения 192, подтверждая наличие аномального сигнала.

#### **Цель исследования**

Повышение точности оценки технического состояния центробежных насосных агрегатов за счёт подбора коэффициента масштабирования базовой функции вейвлет-преобразования вибросигналов.

#### **Методы исследования**

Для практического решения поставленных задач использовались методы и алгоритмы цифровой обработки вибросигналов, основанные на Фурье-преобразовании и вейвлет-преобразовании.

#### **Результаты**

Установлено, что для более точной оценки стадии развития основных неисправностей ЦНА с использованием непрерывного вейвлет-преобразования необходимо использовать значение коэффициента масштабирования базовой вейвлет-функции, равного 512.

**Для цитирования:** Закирничная М. М., Варламов В. А., Палладина Я. А. Оценка влияния коэффициента масштабирования базовой функции вейвлет-преобразования на степень проявления основных неисправностей центробежных насосных агрегатов в вейвлет-картинах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 106-120. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-106-120>.

Original article

# ASSESSING THE INFLUENCE OF THE SCALING FACTOR OF THE BASIC WAVELET TRANSFORM FUNCTION ON THE DEGREE OF MANIFESTATION OF THE MAIN FAULTS OF CENTRIFUGAL PUMPING UNITS IN WAVELET PATTERNS

## Relevance

Rotary-type machines, which include centrifugal pumping units, are widely used in the oil refining and petrochemical industries and represent an integral part of technological processes. Therefore, preventing their emergency failure is the most important task, which is solved using vibroacoustic diagnostics. Vibration diagnostic services of technical supervision departments process signals mainly using the spectral method of vibration signal analysis based on the Fourier transform. Along with the undeniable advantages, which include the simplicity of software implementation and the admissibility of optimization for the analysis of many functions of physical processes, this transformation has certain disadvantages. For example, due to the loss of information about the time factor, the idea of the dynamics of changes in the spectral composition of the signal is distorted, which does not allow for a comprehensive analysis of the vibration signal. In this regard, there is a need for additional methods of digital signal processing.

In recent years, in the process of research carried out at the Ufa State Petroleum Technological University, it has been proven that a method based on wavelet transformation of vibration signals can be used to assess the technical condition of pumping and compressor equipment. This type of transformation is capable of recognizing not only periodic components of the signal, but also local ones, determining their time and frequency characteristics, and establishing the relationship between the levels of wavelet decomposition and the frequency ranges of wavelet filters.

It has been determined that the level of decomposition during the wavelet transform of the signal can be taken as a criterion for clearing the vibration signal of the digital pump from the noise component in the presence of faults such as «imbalance» and «misalignment».

Discrete wavelet transform of vibration signals makes it possible to determine amplitude modulation caused by the manifestation of faults of electromagnetic origin and inhomogeneity of the air flow in the gap between the rotor and stator of an electric motor, as well as to identify slowly developing (trend) signals associated with lubrication defects in the motor bearings of centrifugal pumping units.

Wavelet patterns store complex information about the signal, however, when several types of faults or defects are combined, it is very difficult to identify the leading one and the degree of its development, especially in the early stages.

In this case, the value of the scaling factor can serve as a characteristic of the degree of development of the fault, since it was found that wavelet patterns begin to differ comprehensively when setting the scaling factor of the wavelet transform of signals, starting from a value of 192, confirming the presence of an anomalous signal.

## Aim of research

Increasing the accuracy of assessing the technical condition of centrifugal pumping units by selecting the scaling factor of the basic function of the wavelet transform of vibration signals.

## Keywords

wavelet-transform, vibroacoustic diagnostics, artificial signal, centrifugal pump, scaling factor



### Research methods

To practically solve the problems, methods and algorithms for digital processing of vibration signals based on the Fourier transform and wavelet transform were used.

### Results

It has been established that for a more accurate assessment of the stage of development of the main faults of the digital pump using the continuous wavelet transform, it is necessary to use a scaling factor of the basic wavelet function equal to 512.

**For citation:** Zakirnichnaya M. M., Varlamov V. A., Palladina Ya. A. Otsenka vliyaniya koeffitsienta masshtabirovaniya bazovoy funktsii veyvlet-preobrazovaniya na stepen' proyavleniya osnovnykh neispravnostey tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov v veyvlet-kartinakh [Assessing the Influence of the Scaling Factor of the Basic Wavelet Transform Function on the Degree of Manifestation of the Main Faults of Centrifugal Pumping Units in Wavelet Patterns]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 106-120 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-106-120>.

### Введение

На предприятиях нефтепереработки и нефтехимии основная доля машин роторного типа принадлежит центробежным насосным агрегатам (ЦНА) [1]. В условиях непрерывного технологического процесса отказ насосного агрегата может спровоцировать возникновение аварийной ситуации и, следовательно, внеочередные затраты. На основании этого своевременному выявлению дефектов и развитию неисправностей, предупреждению разрушения деталей и узлов ЦНА уделяется повышенное внимание. Оценка технического состояния ЦНА реализуется на основе периодического контроля параметров вибрации с использованием виброакустической диагностики [2].

К определяющим причинам повышенной вибрации насосно-компрессорного оборудования относятся [3]:

- несоблюдение правил эксплуатации насоса;
- неудовлетворительное состояние (или низкое качество изготовления) соединительной муфты, несоосность отверстий под пальцы или несоосность полумуфт, износ пальцев;
- некорректная центровка с приводимым механизмом (насосом);
- дисбаланс ротора электрического двигателя;

- дисбаланс рабочего колеса (ротора) приводимого насоса, преимущественно часто встречающийся у насосов с высокой частотой вращения или насосов с динамически неотбалансированным рабочим колесом;

- изгиб вала;
- дефекты фундамента и фундаментной рамы агрегата;
- дефект подшипников насоса или электродвигателя;
- неосновательное крепление отдельных деталей насоса и электродвигателя (подшипников, торцевых крышек).

В настоящий момент в измерительных системах динамично находит применение цифровая обработка сигналов для максимизации точности оценки текущего технического состояния машин роторного типа [4]. Вышеупомянутая оценка необходима для принятия незамедлительных управленческих решений.

### Спектральный метод анализа вибросигналов, основанный на преобразовании Фурье

Диагностика ЦНА реализуется путем использования виброанализаторов и последующей обработки сигналов, выполняющейся, в основном, посредством спектрального метода анализа



вибросигналов, основанного на преобразовании Фурье, при котором параметром анализирующей функции является циклическая частота сигнала ( $\omega$ ), анализирующая функция имеет вид  $\exp(-i\omega t)$ .

Функция частоты  $F(\omega)$  вычисляется по формуле:

$$F(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-i\omega t} dt,$$

где  $T$  — длина интервала сигнала.

Преобразование Фурье требуется для выявления гармонических составляющих временного ряда. После этого сравнивается анализируемая выборка и её реакция на гармоническую функцию на основе вычисления корреляции. Если выявляется присутствие корреляции, то это свидетельствует о наличии составляющих выбранной частоты в составе процесса. Далее осуществляется изменение частоты гармонической функции и итерация процедуры сравнения.

Спектральная функция, являющаяся результатом Фурье преобразования, нацелена на перевод первоначального сигнала из временной области в частотную. Стоит заметить, как показывает практика, при проведении цифровой обработки не представляется возможным исследование сигнала на бесконечном интервале. Это является требованием к данному виду преобразования. Существуют методики, модифицирующие преобразование Фурье. Они основаны на оконном преобразовании, в некоторой мере, исключая указанный недостаток. Следует использовать всевозможные подходы для обработки реальных сигналов, для длины которых всегда характерна конечная длительность. Бесконечная область определения сигнала является признаком Фурье-анализа.

Наравне с неопровержимыми преимуществами, к которым относятся простота программной реализации и допустимость оптимизации для анализа мно-

гих функций физических процессов, это преобразование располагает специфическими недостатками. Например, препятствием к осуществлению многогранного анализа вибросигнала предстает искажение представления о динамике изменения спектрального набора сигнала ввиду потери информации о временном факторе.

Гармонические и полигармонические сигналы являются простейшими периодическими, представляющие собой синусоидальные колебания в случае гармонических сигналов или сумму гармонических колебаний в случае полигармонических сигналов. Фактически, все частоты, которые составляют гармонический сигнал, являются целым рядом частот, кратных основной частоте, называемой несущей (в частности, обратной) частотой.

Несущая частота предстает повторяющимся отношением наиболее длинного участка в сигнале частоты. Кратные несущей частоте частоты называются гармониками несущей частоты. Гармоники типично характеризуются порядковым номером от несущей частоты, которая является первой гармоникой.

Причины, вызывающие такие колебания, могут быть крайне разнообразны: дисбаланс или расцентровка ротора, дефекты подшипников качения или рабочих колес насоса, нарушение жесткости опор агрегата и др.

Дисбаланс происходит, когда центр масс различается с центром вращения. Он может быть спровоцирован неправильной сборкой, нарушением геометрии конструкции детали или узла, наростом материала, износом узлов агрегата или сколом рабочего колеса. Его отличительными свойствами являются высокоуровневая радиальная вибрация, установившаяся обратная составляющая. Одновременно с этим наблюдаются рост

амплитуды на оборотной частоте с увеличением скорости вращения вала, низкий уровень на родственных по скорости гармониках, низкоуровневая осевая вибрация [1].

На спектре (рисунок 1), в большинстве случаев, преобладает пик гармоники оборотной частоты ротора ( $F1$ ). На спектре может присутствовать и вторая гармоника от оборотной частоты ротора и несколько гармоник в низкочастотной части спектра, однако все гармоники много меньше по амплитуде оборотной. При этом наиболее часто горизонтальное направление вибрации выше вертикального. Спектр вибрации в осевом направлении может содержать меньший уровень вибрации по сравнению с радиальными направлениями.

Расцентровка — состояние, при котором две связанные технологически машины имеют валы, чьи центральные линии не параллельны необходимой, или когда один из подшипников смещен или разбит. Расцентровка может быть вызвана неправильной сборкой или установкой на вал полумуфт, неправильной посадкой на фундамент агрегата, температурными напряжениями или спаренной муфтой.

В [5] доказано, что неисправности центробежных насосных агрегатов неоднозначно распознаются с помощью спектрального анализа Фурье. Это подтверждается рисунками 1 и 2, на которых показана схожесть диагностических признаков неисправностей типа «дисбаланс» и «расцентровка».

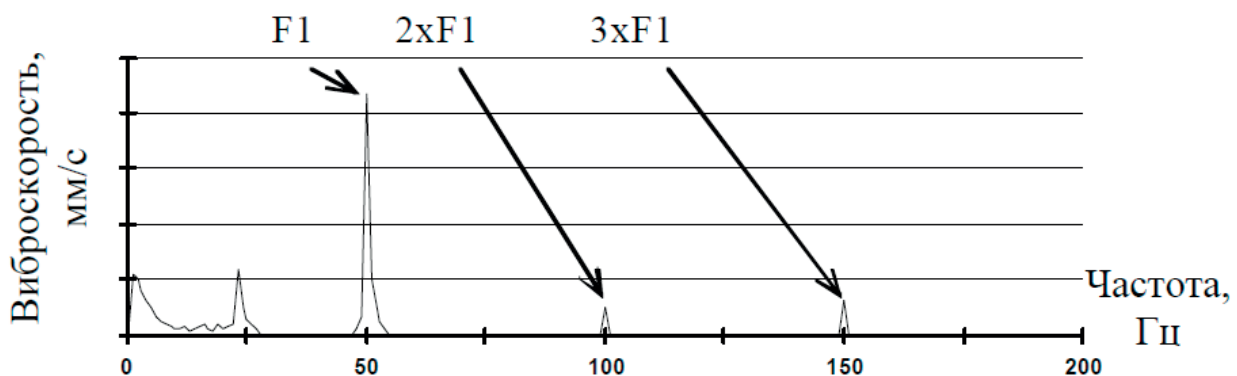


Рисунок 1. Спектр вибрации ротора с неисправностью типа «дисбаланс»

Figure 1. Vibration spectrum of a rotor with an imbalance type fault

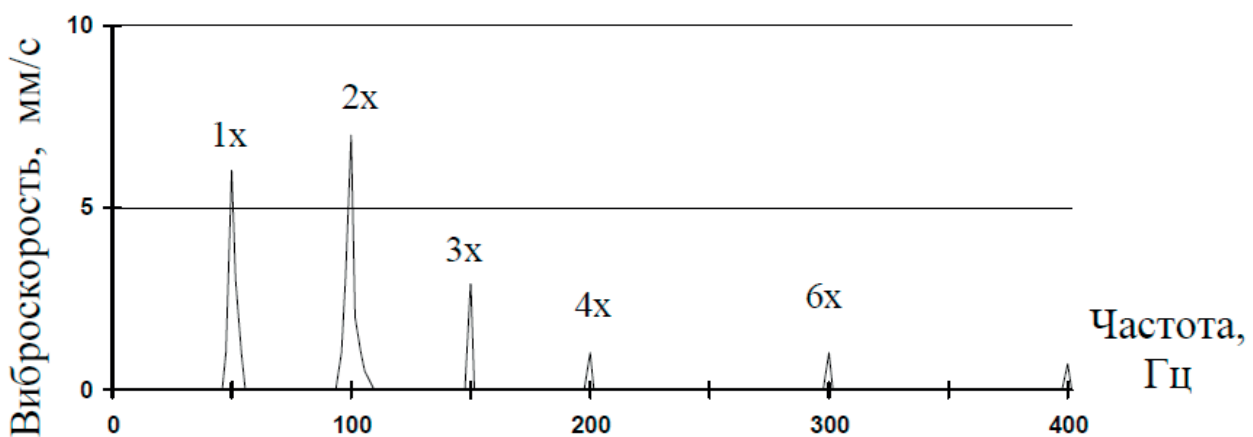


Рисунок 2. Спектр вибрации агрегата с параллельной расцентровкой

Figure 2. Vibration spectrum of a unit with parallel misalignment

Вследствие этого существует необходимость в разработке дополнительных подходов по цифровой обработке сигналов, одним из которых является вейвлет-преобразование [6]. Оно применимо для выделения периодических и локальных составляющих сигнала, установления их временных и частотных характеристик.

### **Применение непрерывного вейвлет-преобразования при моделировании искусственных вибросигналов основных неисправностей центробежных насосных агрегатов**

Вейвлет-преобразование — это такой тип преобразования, который осуществляет перевод сигнала из временного представления в частотно-временное. Воплощается путём вычисления корреляции между временным рядом и базисной функцией.

Вследствие частотно-временного представления сигнала вейвлет-преобразование становится более эффективным, когда анализируются нестационарные сигналы. Вейвлет-базисы, локализованные во временной частоте, являются подходящими при анализе локальных неординарностей сигналов (вплоть до разрывов первого ряда).

Такой вид преобразования позволяет оценить тенденцию изменения вейвлет-картины, чтобы выявить закономерность между уровнями вейвлет-разложения и частотными диапазонами работы вейвлет-фильтров для выявления дефектов и распознавания технического состояния центробежного насосного агрегата. Отработка данного метода осуществлялась с помощью смоделированных искусственных сигналов, для имитации дефекта ЦНА смоделирован негармонический сигнал и внедрен в гармонический. Назовём такой негармонический сигнал аномальным.

Для результатов, полученных на основе вейвлет-анализа, характерны большая информативность и способность обработки таких особенностей данных, которые при традиционном подходе анализировать сложно [7].

Обработка вибросигналов, базирующаяся на вейвлет-преобразовании, предоставляет возможность просчитывать техническое состояние центробежных компрессорных агрегатов. Подобный способ позволяет установить и определить степень развития основных неисправностей центробежных насосных агрегатов, таких как дисбаланс ротора, расцентровка агрегата и ослабление жесткости опор.

Основываясь на вейвлет-анализе, спектральном методе быстрого преобразования Фурье вибросигналов, рассматривается комплексный подход к выявлению дефектов и распознаванию технического состояния центробежного насосного агрегата.

Опираясь на вышеизложенное, приоритетным является повышение точности оценки технического состояния центробежных насосных агрегатов за счёт подбора коэффициента масштабирования (КМ) базовой функции вейвлет-преобразования вибросигналов.

Проведение вейвлет-анализа реализуется посредством использования расширения WAVELET TOOLBOX программного комплекса MATLAB. Пакет MATLAB Wavelet Toolbox представлен несколькими программами, позволяющими выполнять вейвлет-анализ, а также обработку сигналов средствами графического интерфейса пользователя (рисунок 3).

Главное меню — это большой пакет графических сред, практичных для использования масштабного комплекса команд ориентировочно по всем направлениям вейвлет-анализа сигналов.

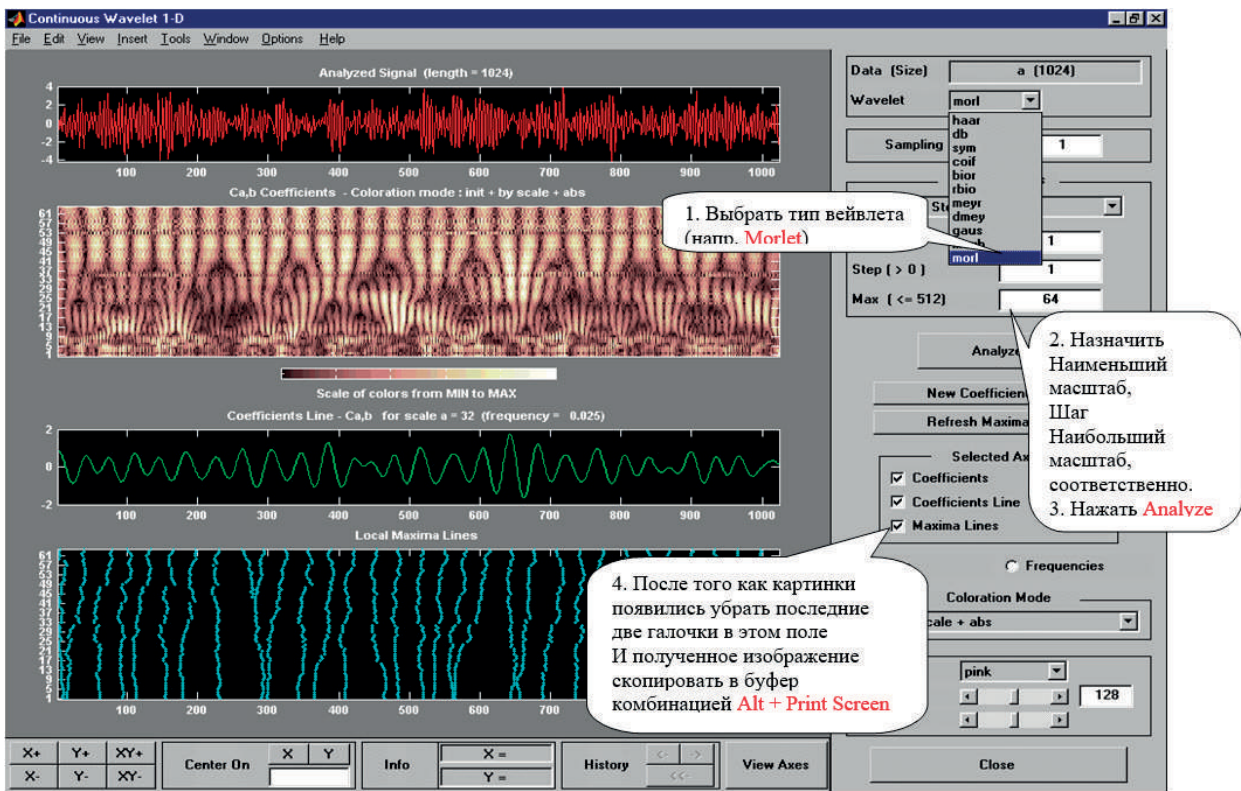


Рисунок 3. Пользовательский интерфейс пакета MATLAB Wavelet Toolbox

Figure 3. MATLAB Wavelet Toolbox user interface

В настоящее время выбор вейвлетов довольно-таки обширен. Так, в пакете WAVELET TOOLBOX представлено около пятнадцати базовых типов вейвлетов и множество вариантов для ряда базовых вейвлетов. При выполнении серьезных задач при обработке сигналов и изображений следует задействовать минимум три-четыре типа вейвлетов, сопоставляя результаты и выбирая наиболее оптимальный из них [8].

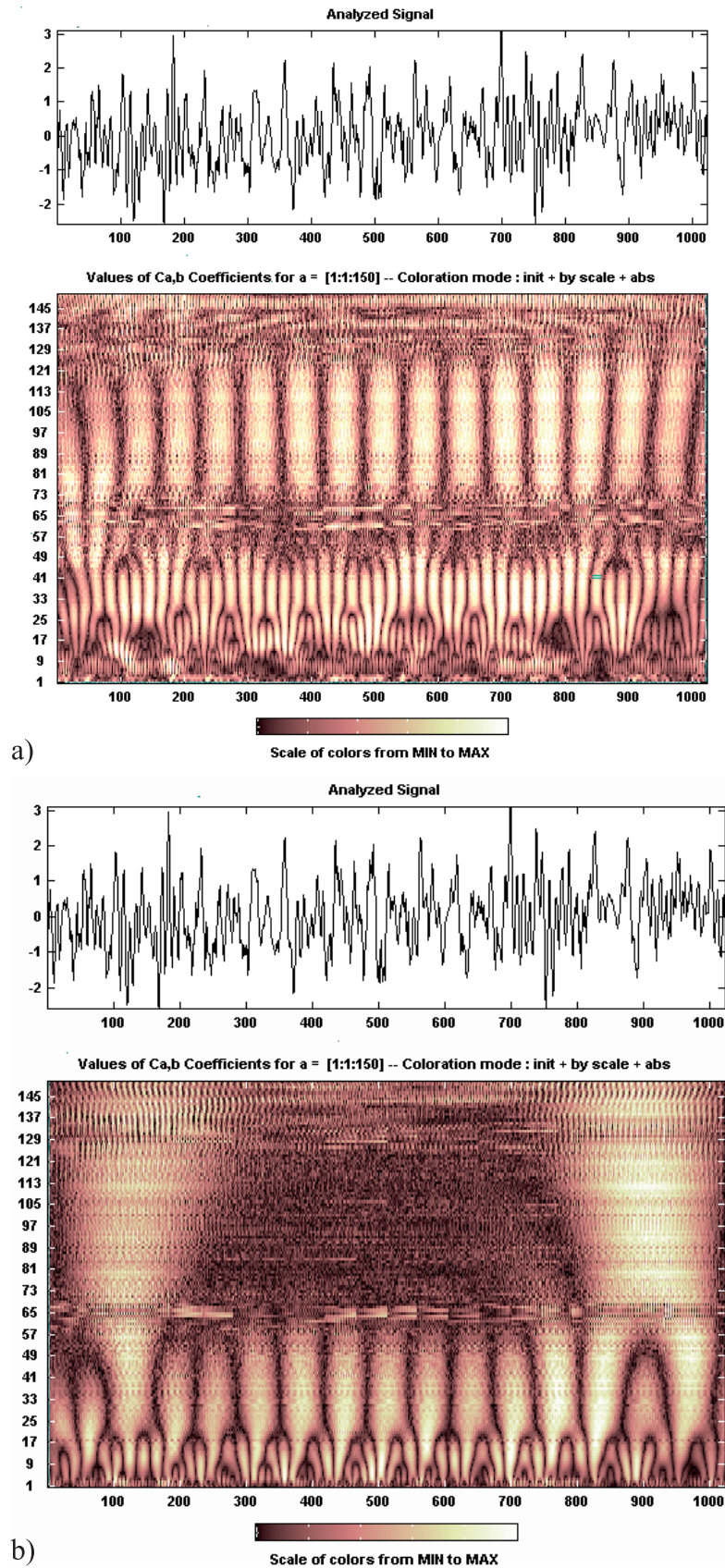
В [5] обосновано использование цифровой обработки на основе вейвлет-преобразований вибросигналов. Также проведён сравнительный анализ функциональности вейвлетов, таких как: вейвлеты Гаусса типа (gaus), Морле (morlet) и Сомбреро (mexihat). Определено, что данные типы наделены минимальными свойствами, которыми должны обладать вейвлеты, обеспечивающие полноценный потенциал в преобразовании сигналов, и относятся к группе грубых вейв-

летов. Анализ с помощью данных вейвлетов не является ортогональным; невозможны стремительные алгоритмы преобразования и усовершенствование, вместе с тем существует возможность непрерывной декомпозиции.

Вейвлет Морле — это перемноженные функции синусоиды и кривой Гаусса. Исходя из этого, речь идёт о подобии по форме волны с искаженной и ограниченной по времени синусоидой, используемой в преобразованиях Фурье. Следующий пример свидетельствует о приоритете вейвлета Морле по сравнению с вейвлетом Сомбреро (рисунок 4).

При изучении одного и того же сигнала с помощью вейвлета Морле картина вейвлет-преобразования иллюстрирует четкие светлые области, воспроизводящие динамику вариативных частот в сигнале, на широких масштабах (M) (рисунок 4). Одновременно с этим, при применении вейвлет-преобразования с базо-





a) при использовании вейвлета Морле; б) при использовании вейвлета Сомбреро

a) using Morlet wavelet; b) using the Sombbrero wavelet

**Рисунок 4.** Результат непрерывного вейвлет-анализа вибросигнала

**Figure 4.** Result of continuous wavelet analysis of vibration signal

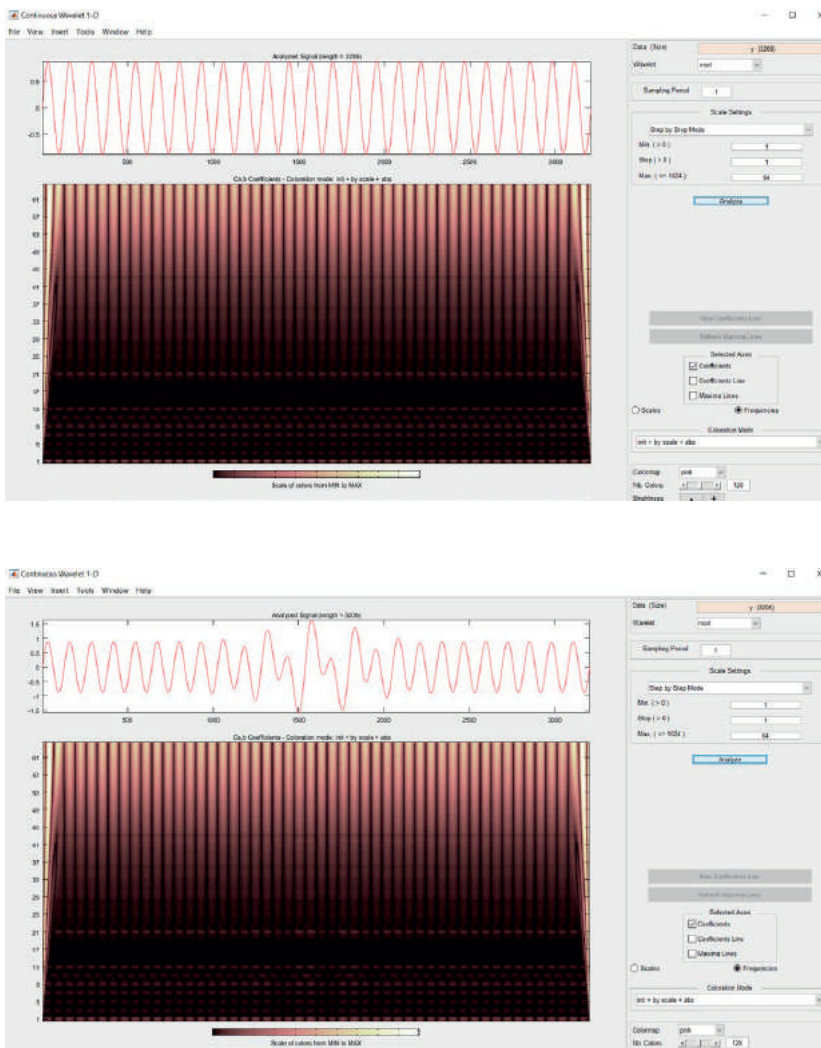
вым вейвлетом типа Сомбреро, несущие частоты образуют светлые области на более низких масштабах, сливаясь между собой [9].

Поэтому для проведения исследования был выбран вейвлет Морле, поскольку его форма волны имеет аналогию с ограниченной по времени синусоидой, и неоднократные эксперименты проработки вибросигналов насосных агрегатов с использованием различных типов вейвлетов показали его эффективность, как наиболее целесообразный для непрерывного вейвлет-преобразования вибросигналов ЦНА. Смоделированные сигналы прорабатывались путем использования непрерывного вейвлет-преобразования. Вводный коэффициент масштабирования выбран равным 64 на основании методики [5].

### Выбор коэффициента масштабирования базовой функции непрерывного вейвлет-преобразования при моделировании искусственных вибросигналов основных неисправностей центробежных насосных агрегатов

Благодаря непрерывному вейвлет-преобразованию получены вейвлет-картины синусоидального сигнала (рисунок 5, а) и синусоидального сигнала с аномальной составляющей (рисунок 5, б). На скейлограмме темным тоном отображаются переходы сигнала через нуль, а светлым тоном — экстремумы.

Видно, что существенных различий в вейвлет-картинах сигналов на рисунке 5 не наблюдается. Исходя из этого, идентификация наличия дефекта усложнена



**Рисунок 5.** Вейвлет-картины сигналов, полученные при установке коэффициента масштабирования, равного 64

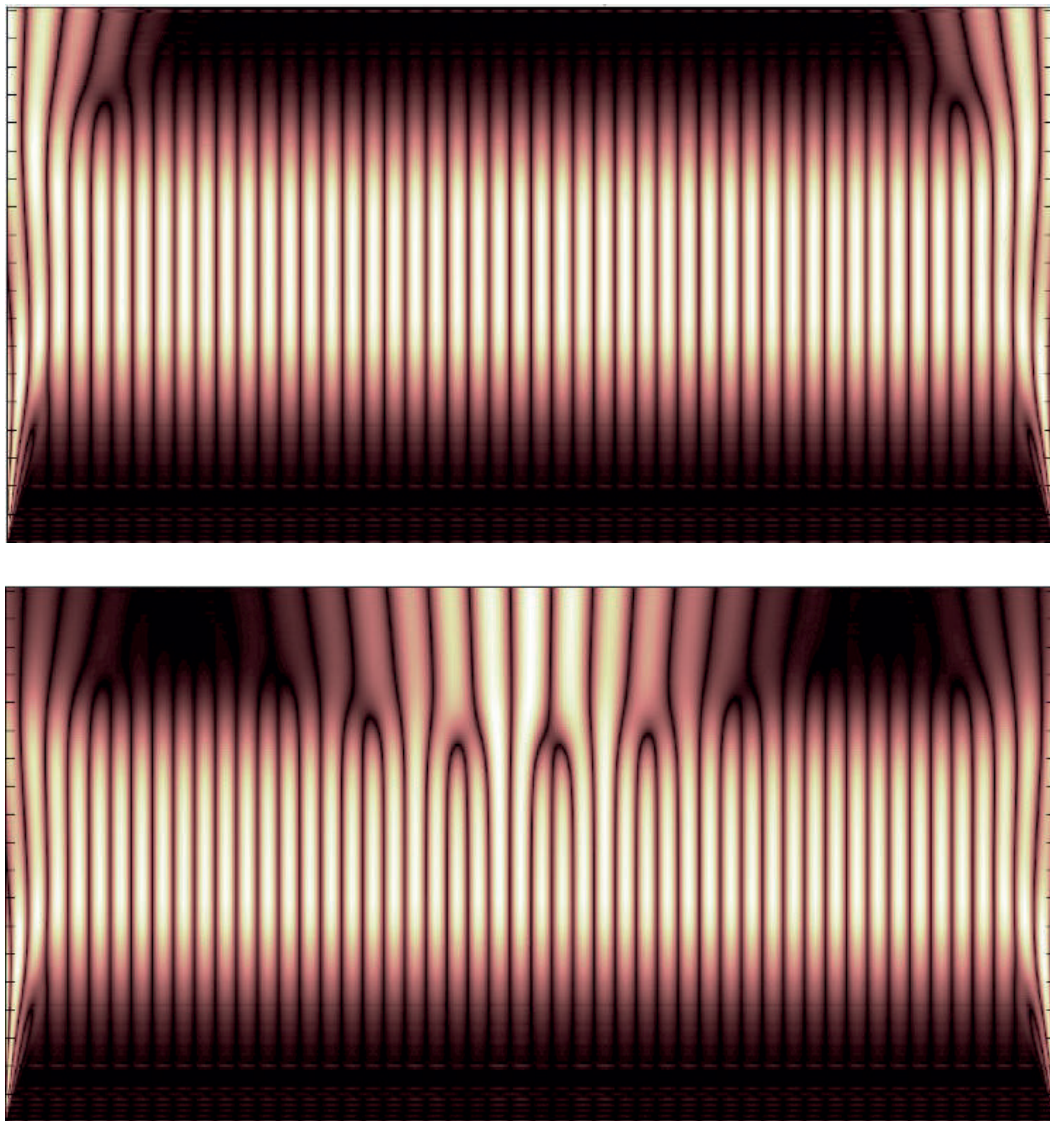
**Figure 5.** Wavelet patterns of signals obtained during installation scaling factor equal to 64

при использовании коэффициента масштабирования, равного 64, базовой функции вейвлет-преобразования вибросигнала. Для выявления различий в сигналах был осуществлён подбор коэффициента масштабирования вейвлет-преобразования и получены вейвлет-картины сигналов.

Для гармонических сигналов, характерных для развития неисправности типа «дисбаланс», различия в вейвлет-картинах становятся заметны, начиная с КМ, равного 192 (рисунок 6) [10]. Для более сложных полигармонических сигналов, как, например, при объединении двух синусоид, имитирующих развитие

неисправности типа «расцентровка», отличия в вейвлет-картинах начинают проявляться при КМ, равном 320 (рисунок 7).

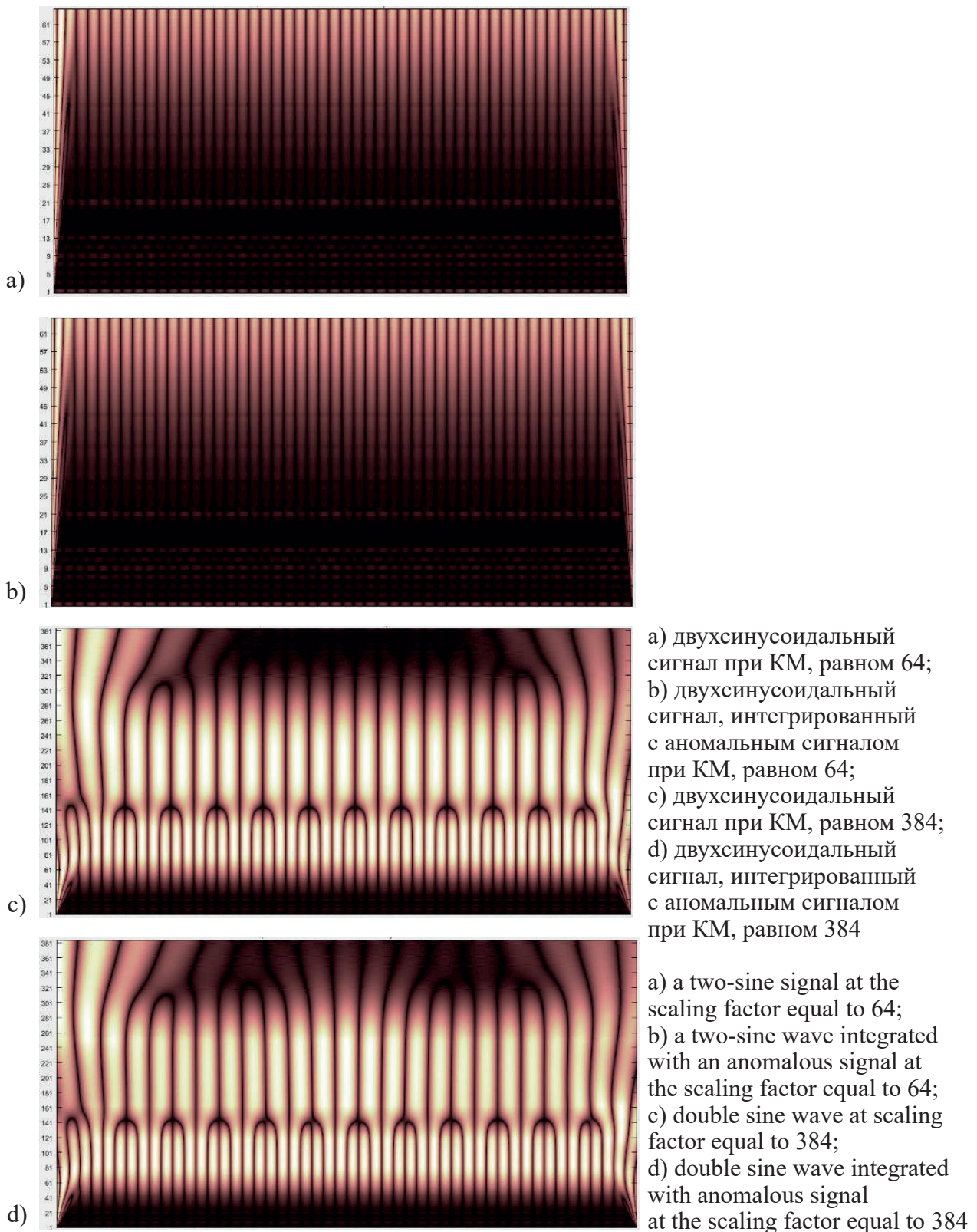
Однако степень развития неисправностей типа «дисбаланс» и «расцентровка» за счет появления различий в цветовой палитре вейвлет-картин начинает проявляться только при значении коэффициента масштабирования, равном 512 (рисунок 8). Таким образом, степень масштабирования при построении вейвлет-картин является немаловажным параметром, способствующим повышению информативности вейвлет-картин.



**Рисунок 6.** Вейвлет-картины сигналов при коэффициенте масштабирования, равном 192

**Figure 6.** Wavelet patterns of signals at the scaling factor equal to 192

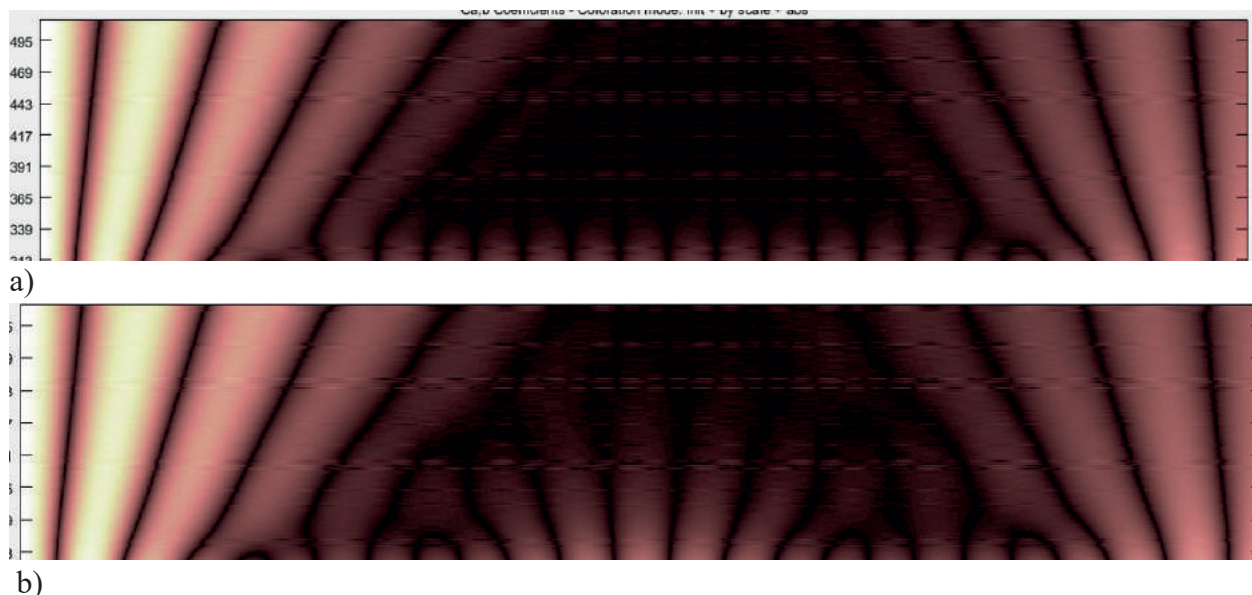




**Рисунок 7.** Вейвлет-картины двухсинусоидального сигнала и двухсинусоидального сигнала, интегрированного с аномальным сигналом, при разных значениях коэффициента масштабирования базовой вейвлет-функции непрерывного вейвлет-преобразования

**Figure 7.** Wavelet patterns of a two-sine signal and a double sine wave integrated with an anomalous signal, for different values of the scaling factor of the basic wavelet function of the continuous wavelet transform





a) верхние части вейвлет-картин двухсинусоидального сигнала без аномальной составляющей; b) верхние части вейвлет-картин двухсинусоидального сигнала с аномальной составляющей

a) the upper parts of the wavelet patterns of a two-sine signal without an anomalous component;  
b) upper parts of wavelet patterns of a double-sine signal with an anomalous component

**Рисунок 8.** Верхние части вейвлет-картин двухсинусоидального сигнала с аномальной составляющей (b) и без неё (a) при коэффициенте масштабирования, равном 512

**Figure 8.** Upper parts of wavelet patterns of a two-sine signal with an anomalous component (b) and without it (a) at a scaling factor equal to 512

### Выводы

Таким образом, посредством непрерывного вейвлет-преобразования, выбрав базисный вейвлет и приняв определенное значение коэффициента масштабирования базовой вейвлет-функции, появляется вероятность идентифицировать нахождение аномальной составляющей в гармоническом, а также полигармоническом сигналах, что не всегда удается осуществить посредством спектрального анализа Фурье.

Установлено, что для более точной оценки стадии развития неисправности ЦНА с использованием непрерывного вейвлет-преобразования необходимо использовать значение коэффициента масштабирования базовой вейвлет-функции, равного 512, при установке которого имеются различия в цветовой

палитре, характеризующие степень развития неисправности и означающие присутствие аномального компонента в сигнале.

Проведён анализ способностей Фурье-преобразования для выявления ведущих неисправностей ЦНА на основе моделирования сигналов, имитирующих простейшие гармонические колебания, с помощью ПК MATLAB. Определено, что использование преобразования Фурье не всегда пригодно для анализа нетривиального состава вибросигнала, идентичного накоплению нескольких типов неисправностей, а также выявления развития дефектов на ранних этапах. Именно поэтому присутствует необходимость в усовершенствовании методик цифровой обработки сигналов, включая

базирующуюся на вейвлет-преобразовании.

Доказана взаимосвязь выбора коэффициента масштабирования базовой функции непрерывного вейвлет-преобразования с использованием непрерывного вейвлет-преобразования при цифровой обработке искусственных сигналов, имитирующих локальную неисправ-

ность ЦНА в виде дисбаланса и расцентровки.

Продемонстрировано существование затруднения визуального различия вейвлет-картин вибросигналов для идентификации неисправностей и дефектов, в связи с чем возникает необходимость в их детальной проработке с подбором коэффициента масштабирования.

### Список источников

1. Колобов А.Б. Вибродиагностика: теория и практика. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 252 с. ISBN 978-5-9729-0272-9.

2. Солодовников Д.С. Вейвлеты и детерминированный хаос при анализе вибросигналов центробежно-компрессорных агрегатов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 1999. 124 с.

3. Белкин А.П., Степанов О.А. Диагностика теплоэнергетического оборудования. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 240 с. SBN 978-5-507-45989-6.

4. Geitner F.K., Bloch H.P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Butterworth Heinemann, 2012. 743 p. DOI:10.1016/C2010-0-67104-5.

5. Корнишин Д.В. Вейвлет-анализ и мультифрактальная параметризация при оценке технического состояния центробежных насосных агрегатов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015. 171 с.

6. Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E., Fioravanti A., Prudenzi A., Mari S. An IoT Condition Monitoring System for Resilience Based on Spectral Analysis of Vibration // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT. IEEE, 2020. P. 38–43. DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138177.

7. Kaplan I. A Linear Algebra View of the Wavelet Transform [Электронный ресурс]. URL: [http://www.bearcave.com/misl/misl\\_tech/wavelets/matrix/](http://www.bearcave.com/misl/misl_tech/wavelets/matrix/) (дата обращения: 28.02.2024).

8. Kelly S. Graham. Advanced Vibration Analysis. 2007. 637 p. ISBN 0849334195.

9. Закирничная М.М., Насырова Э.Р. Необходимость очистки вибросигнала от шумовой составляющей с использованием вейвлет-анализа для раннего выявления неисправностей насосных агрегатов // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспи-

рантов и молодых ученых. Томск, 2022. С. 315-316. EDN: LCKYBX

10. Варламов В.А. Сопоставительный анализ возможностей Фурье- и вейвлет-преобразований при вибродиагностике нестационарных динамических объектов: магист. дисс. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. 123 с.

### References

1. Kolobov A.B. *Vibrodiagnostika: teoriya i praktika* [Vibration Diagnostics: Theory and Practice]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2019. 252 p. ISBN 978-5-9729-0272-9. [in Russian].

2. Solodovnikov D.S. *Veivlety i determinirovannyi kaos pri analize vibrosignalov tsentrobezno-kompressornykh agregatov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Wavelets and Deterministic Chaos in the Analysis of Vibration Signals of Centrifugal Compressor Units: Cand. Engin. Sci. Dis.]. Ufa, Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 1999. 124 p. [in Russian].

3. Belkin A.P., Stepanov O.A. *Diagnostika teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Diagnostics of Thermal Power Equipment]. 3-e izd., ster. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2023. 240 p. SBN 978-5-507-45989-6. [in Russian].

4. Geitner F.K., Bloch H.P. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Butterworth Heinemann, 2012. 743 p. DOI:10.1016/C2010-0-67104-5.

5. Kornishin D.V. *Veivlet-analiz i mul'tifraktal'naya parametrizatsiya pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya tsentrobeznykh nasosnykh agregatov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Wavelet Analysis and Multifractal Parameterization in Assessing the Technical Condition of Centrifugal Pumping Units: Cand. Engin. Sci. Dis.]. Ufa, Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2015. 171 p. [in Russian].

6. Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E., Fioravanti A., Prudenzi A., Mari S. An IoT Condition Monitoring System for Resilience Based on Spectral Analysis of Vibration. *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry*

4.0 & IoT. *IEEE*, 2020. P. 38–43. DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138177.

7. Kaplan I. *A Linear Algebra View of the Wavelet Transform* [Electronic Resource]. URL: [http://www.bearcave.com/misl/misl\\_tech/wavelets/matrix/](http://www.bearcave.com/misl/misl_tech/wavelets/matrix/) (accessed 28.02.2024).

8. Kelly S. Graham. *Advanced Vibration Analysis*. 2007. 637 p. ISBN 0849334195.

9. Zakirnichnaya M.M., Nasyrova E.R. Neobkhodimost' ochistki vibrosignala ot shumovoi sostavlyayushchei s ispol'zovaniem veivlet-analiza dlya rannego vyyavleniya neispravnosti nasosnykh agregatov [The Need to Clear a Vibration Signal from the Noise Component Using Wavelet Analysis for Early Detection of Faults in Pumping Units]. *Sbornik trudov XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i*

*molodykh uchenykh «Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii»* [Collection of Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists «Youth and Modern Information Technologies»]. Tomsk, 2022, pp. 315-316. EDN: LCKYBX. [in Russian].

10. Varlamov V.A. *Sopostavitel'nyi analiz vozmozhnosti Fur'e- i veivlet-preobrazovaniy pri vibrodiagnostike nestatsionarnykh dinamicheskikh ob'ektov: masterskaya dis.* [Comparative Analysis of the Capabilities of Fourier and Wavelet Transforms in Vibration Diagnostics of Non-Stationary Dynamic Objects: Undergraduate Degree Dis.]. Ufa, Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2021. 123 p. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 11.03.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2024; принята к публикации 04.04.2024.*

*The article was submitted 11.03.2024; approved after reviewing 27.03.2024; accepted for publication 04.04.2024.*

Научная статья

УДК 621.311.243

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-121-131

## МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

*Регина Тагировна Хазиева**Regina T. Khazieva**кандидат технических наук, доцент кафедры**«Электротехника и электрооборудование предприятий»,**Уфимский государственный нефтяной технический университет,**Уфа, Россия*

### Актуальность

Обоснование места расположения солнечной электростанции, представленное в данной статье, является актуальной и перспективной задачей для проектирования солнечной электростанции, предназначенной для производства водорода в рамках стратегии декарбонизации и перехода к низкоуглеродной экономике.

### Цель исследования

Целью исследования является поиск и обоснование места расположения солнечной электростанции, предназначенной для производства водорода в рамках стратегии декарбонизации в России.

### Методы исследования

В процессе исследования были использованы различные методы анализа и моделирования, включая систему консультаций SAM и другие программные инструменты.

### Результаты

В статье рассмотрены вопросы выбора оптимального местоположения для установки электростанции, определения ее конфигурации и управления энергией.

Практическая значимость работы заключается в создании основы для проектирования и внедрения эффективных и устойчивых солнечных электростанций для производства водорода, что может способствовать достижению целей декарбонизации в России и повышению энергетической безопасности страны.

### Ключевые слова

солнечная электростанция, инсоляция, низкоуглеродный водород, производство водорода, декарбонизация

**Благодарности:** Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».



**Для цитирования:** Хазиева Р. Т. Методика выбора оптимального места расположения солнечной электростанции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. №1. Т. 20. С. 121-131. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-121-131>.

Original article

## METHODOLOGY FOR SELECTING THE OPTIMAL LOCATION OF A SOLAR POWER PLANT

### Relevance

Justification for the location of a solar power plant, presented in this article, is a current and promising task for the design of a solar power plant intended for hydrogen production, as part of the decarbonization strategy and transition to a low-carbon economy.

### Aim of research

The aim of research is the selection and justification for the location of a solar power plant intended for hydrogen production as part of the decarbonization strategy in Russia.

### Research methods

During the research, various analysis and modeling methods were used, including the SAM consultation system and other software tools.

### Results

The article discusses the issues of choosing the optimal location for installing a power plant, determining its configuration and energy management.

The practical significance of the work is to create a basis for the design and implementation of efficient and sustainable solar power plants for hydrogen production, which can help achieve decarbonization goals in Russia and improve the country's energy security.

### Keywords

solar photovoltaic power plant, insolation, low-carbon hydrogen, hydrogen production, decarbonization

**Acknowledgments:** The research was carried out using a grant from the President of the Russian Federation in 2022–2024 for young scientists and graduate students carrying out promising scientific research and development in priority areas of modernization of the Russian economy. Grant recipient is Regina Tagirovna Khazieva.

The priority direction of modernization of the Russian economy (direction of competition No. SP-2022 of the Grant Council of the President of the Russian Federation) is «Energy Efficiency and Energy Saving, Including Issues of Developing New Types of Fuel». Research topic: «Development and Research of a Filter Compensating Device to Improve the Quality of Electricity».

**For citation:** Khazieva R. T. Metodika vybora optimal'nogo mesta raspolozheniya solnechnoi elektrostantsii [Methodology for Selecting the Optimal Location of a Solar Power Plant]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 121-131 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-121-131>.

### Введение

Современный мир стоит перед важнейшей задачей перехода к устойчивым низкоуглеродным источникам энергии. Это требование вызвано не только стремлением минимизировать воздействие на окружающую среду и обеспечить экологическую безопасность, но и необходи-

мостью перехода к новым моделям энергетики, которые позволят странам обеспечить свою энергетическую независимость.

Эффективность использования солнечной энергии определяется комплексным подходом к анализу данных об инсоляции и применением современных

методов расчета производительности солнечной электростанции [1]. Такой подход позволяет наиболее точно определить возможности и перспективы солнечной энергетики.

Расширение возможностей солнечной энергии и перспективы использования низкоуглеродного водорода открывают новые горизонты для развития энергетики, сохранения экологии и укрепления энергетической независимости.

### **Низкоуглеродный водород и стратегия декарбонизации в России**

В свете глобальных тенденций, проектирование и внедрение систем на основе возобновляемых источников, в частности солнечной энергии, представляют собой ключевой шаг на пути к снижению углеродной нагрузки и обеспечению энергетической безопасности [2].

Текущий ежегодный мировой спрос на водород оценивается в объеме 116 млн т, при этом на чистый водород приходится 74 млн т/год, еще около 42 млн т водорода используется в смеси с другими газами в качестве сырья или топлива при производстве тепловой и электрической энергии. Более 95 % мирового потребления водорода приходится на традиционные отрасли (в первую очередь на нефтепереработку и химическую промышленность), самостоятельно обеспечивающие собственные потребности в водороде за счет его производства на специализированных установках непосредственно в месте потребления [3]. В структуре мирового производства чистого водорода 75 % приходится на природный газ, почти весь остальной объем (23 %) — на уголь. На долю электролиза в настоящее время приходится 2 % мирового производства водорода.

Основные тенденции в области водородной энергетики в России связаны с

активным внедрением новых технологий и увеличением производства водорода. Существенное внимание уделяется вопросам эффективности и безопасности применения водорода в различных областях, включая энергетику, транспорт и промышленность [4].

Россия обладает уникальными конкурентными преимуществами в развитии водородной энергетики, включая значительный энергетический потенциал, научный задел в сфере производства, транспортировки и хранения водорода, а также географическую близость к потенциальным потребителям водорода. Это дает возможность стране занять позицию лидера на глобальном рынке водородной энергетики [5].

Понимая ключевую роль водорода в декарбонизации экономики, Россия разрабатывает стратегию, которая определяет основные этапы развития водородной энергетики. Россия стремится сделать водород конкурентоспособным энергоносителем на глобальном уровне. С этой целью в рамках стратегии по водороду предполагается работа над снижением капитальных затрат на электролизеры и стоимости электроэнергии. Согласно прогнозам, к 2050 году стоимость производства водорода, основанного на возобновляемых источниках энергии, может достигнуть уровня менее двух долларов США за килограмм. В рамках этого стремления регионы с высоким потенциалом возобновляемой энергетики могут играть ключевую роль [6].

В рамках стратегии декарбонизации и перехода к низкоуглеродной экономике использование солнечной электростанции для производства водорода является актуальным и перспективным направлением. Этот проект может стать пилотным и обозначить новые возможности для создания водородных кластеров и дальнейшего развития водородной энергетики в России.

Методика выбора оптимального места расположения солнечной электростанции на рассматриваемой территории включает в себя анализ различных факторов, позволяющих раскрыть перспективы для производства водорода (рисунок 1).

На рисунке 1 приведены дополнительные условия и факторы, учитываемые при выборе места расположения электростанции, которые являются наиболее важными при рассмотрении каждого из этих этапов.

Например, климатические условия, топография местности и геологические особенности позволяют оценить потенциальную возможность расположения солнечной электростанции на данной местности. Но для того, чтобы определить конкретную локацию, необходимо учесть ряд других факторов, позволяющих эффективно использовать солнечную энергию [7].

Такое детальное представление о потенциале развития проекта позволяет обеспечить надежный анализ и выбор

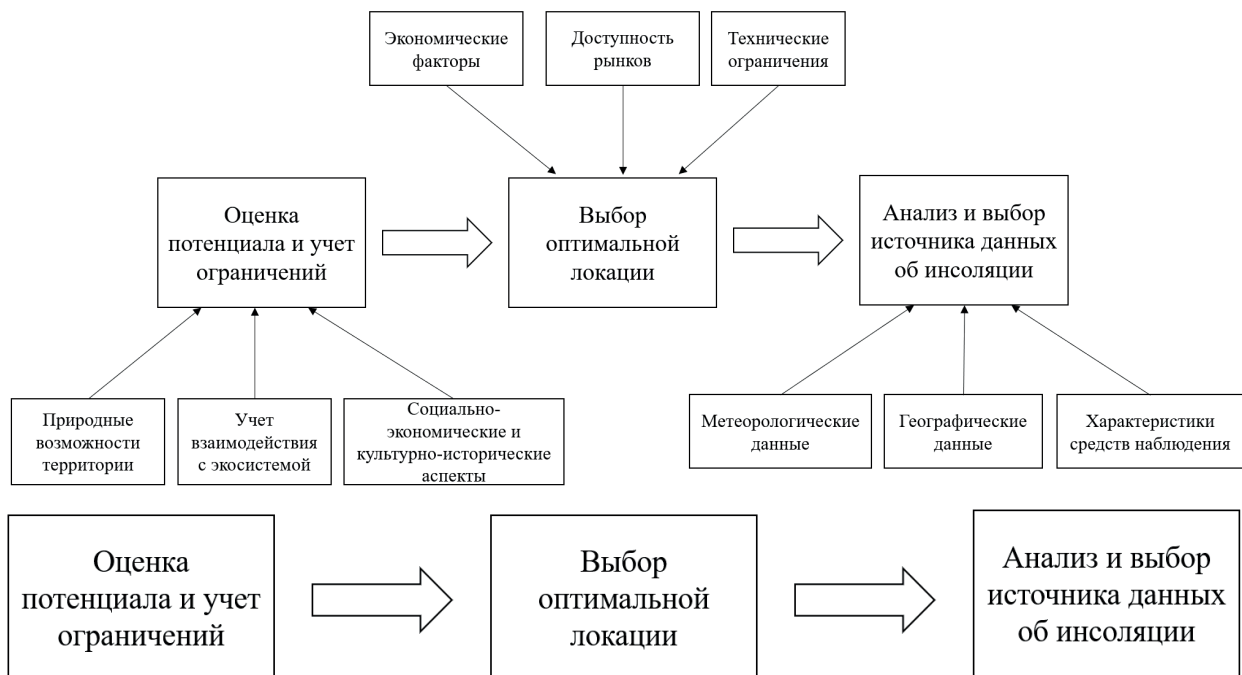
оптимальной локации с учетом использования данных об инсоляции.

### Определение оптимального местоположения для солнечной фотоэлектрической электростанции

#### Оценка потенциала и учет ограничений

Определение оптимального местоположения для размещения солнечной электростанции требует комплексного подхода и учета нескольких ключевых факторов. Ландшафтный потенциал в этом контексте означает не только природные возможности территории, но и учет взаимодействия с экосистемой, социально-экономическими и культурно-историческими аспектами [2].

Одним из ключевых ограничений, которые должны быть учтены при проектировании и реализации подобных проектов, являются требования водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы [8]. Здесь действуют ограниче-



**Рисунок 1.** Методика выбора оптимального места расположения солнечной электростанции

**Figure 1.** Methodology for choosing the optimal location of a solar power plant

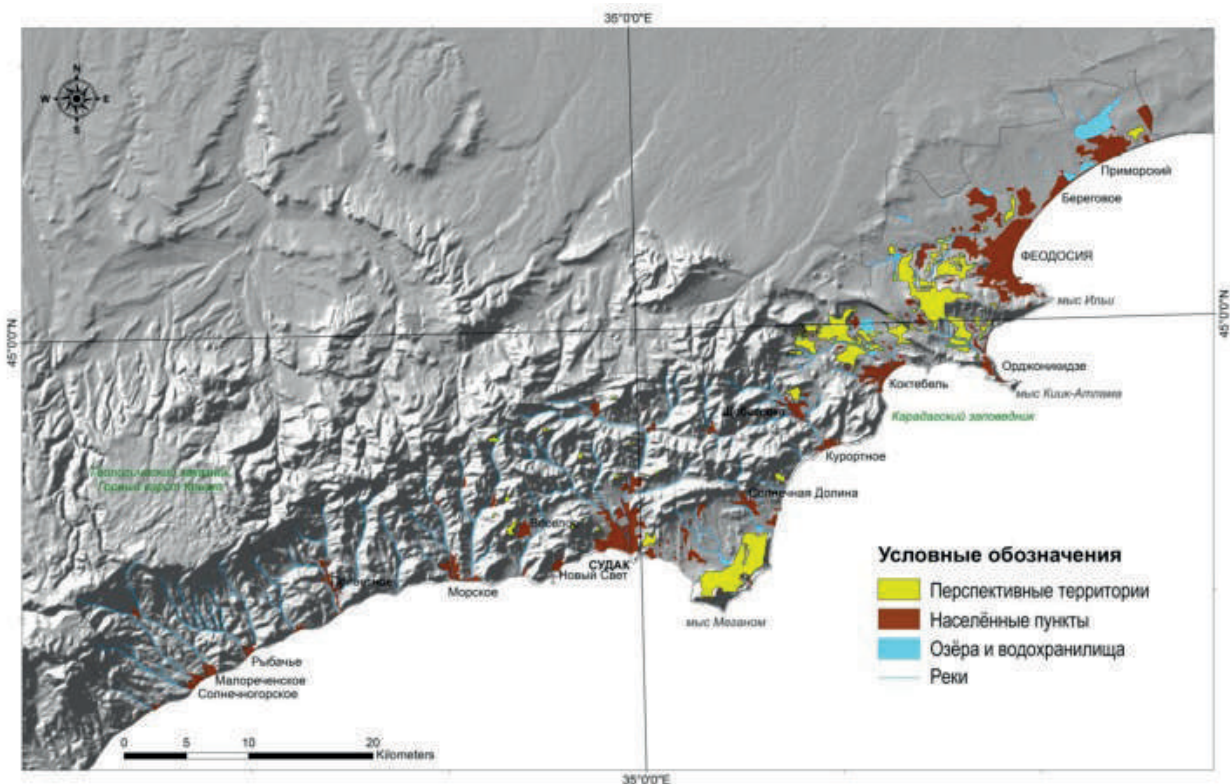
ния на хозяйственную и иную деятельность, чтобы предотвратить загрязнение, засорение и истощение водных объектов, а также для сохранения среды обитания водных биологических ресурсов и других объектов животного и растительного мира. Водный кодекс Российской Федерации не запрещает строительство систем возобновляемой энергетики в пределах водоохранных зон и прибрежных защитных полос, учитывая специфику Юго-Восточного Крыма (засушливость и недостаток водных ресурсов), было принято решение обозначить эти зоны как непригодные для строительства систем возобновляемой энергетики.

Учитывая специфику работы солнечных модулей, следует отметить важность выбора места, обладающего достаточным количеством солнечного света. Территории, находящиеся в постоянной солнечной тени, не подходят для разме-

щения такого рода энергетических установок, так как эффективность их работы существенно снижается [9, 10].

В работе [11] описывается подробная методика для оценки ландшафтного солнечно-энергетического потенциала Юго-Восточного Крыма, которая включает в себя сочетание различных карт, таких как карта пейзажно-эстетической ценности ландшафтов, карта современного землепользования и карта экологического каркаса территории.

Автор приходит к выводу, что Юго-Восточный Крым имеет значительный потенциал для развития возобновляемой энергетики [11]. При этом исследователь выделяет конкретные участки (рисунок 2), на которых могут быть размещены солнечные модули, и предлагает оценку общей мощности энергии, которую можно было бы получить от их использования.



**Рисунок 2.** Перспективные территории для строительства солнечных электростанций в Юго-Восточном Крыму [11]

**Figure 2.** Promising territories for the construction of solar power plants in South-Eastern Crimea [11]





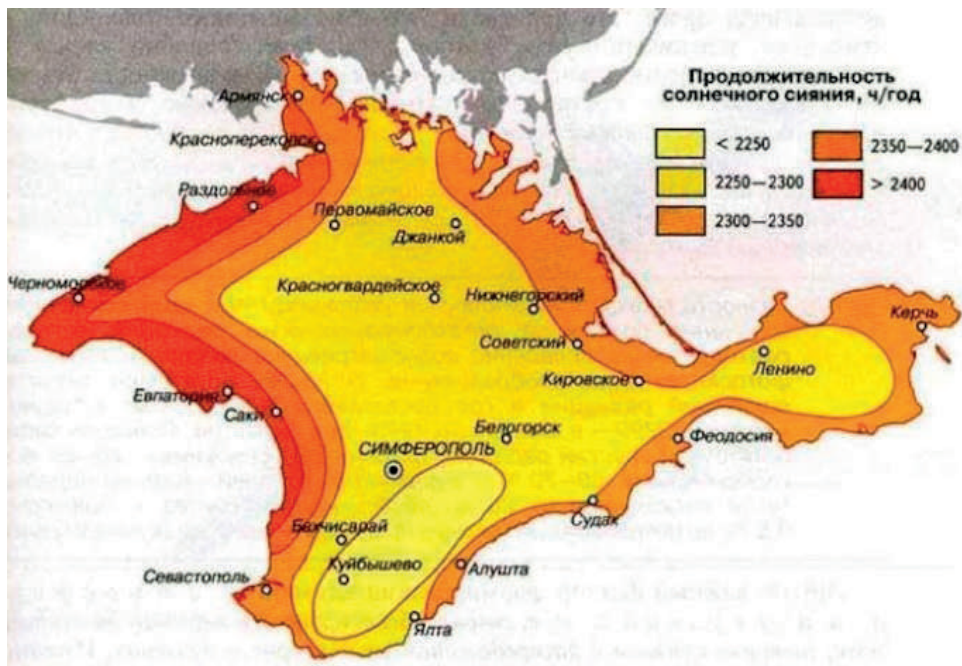


Рисунок 4. Продолжительность солнечного сияния на полуострове Крым [17]

Figure 4. Duration of sunshine on the Crimean Peninsula [17]

### Анализ и выбор источника данных об инсоляции

#### Обзор возможных источников данных об инсоляции

Инсоляция имеет ключевое значение для проектирования и оценки эффективности систем солнечной энергетики. Важно выбрать надежный и точный источник данных об инсоляции [18].

В настоящее время доступно множество источников данных об инсоляции. Они могут быть разделены на две основные категории: наблюдательные данные и модельные данные.

Наблюдательные данные собираются с помощью метеорологических станций и спутниковых наблюдений. Они представляют прямые измерения солнечной радиации на поверхности Земли. Однако из-за ограниченного охвата и вариабельности во времени, эти данные могут быть недоступными или неполными для некоторых регионов.

Модельные данные генерируются с помощью компьютерных моделей, кото-

рые используют различные параметры, такие как атмосферные условия, география, облачность и т.д., для расчета инсоляции. Эти модели могут предоставить данные о солнечной радиации на больших пространственных и временных масштабах, но они также могут содержать ошибки из-за несовершенств моделирования [19, 20].

#### Критерии выбора источника данных об инсоляции

При выборе источника данных об инсоляции важно учитывать следующие критерии:

- точность: данные должны быть достаточно точными для нужд проекта. Необходимо учесть, что разные источники данных могут иметь разные уровни неопределенности;

- пространственное и временное разрешение: данные должны быть доступны для региона и периода, которые соответствуют требованиям проекта. Идеально, если данные доступны на дневном, месячном и годовом уровнях;

— доступность и стоимость: некоторые источники данных могут быть платными или требовать специального доступа;

— обновляемость: данные должны быть актуальными и регулярно обновляемыми.

### **Выбор источника данных об инсоляции**

На основании вышеупомянутых критериев необходимо провести анализ доступных источников данных, исследовать их достоинства и недостатки и сделать обоснованный выбор. Выбранный источник данных об инсоляции должен обеспечивать надежные и точные данные, необходимые для успешной реализации проекта по солнечной энергетике. Среди общепризнанных и широко используемых источников данных об инсоляции можно выделить следующие: NASA POWER, PVGIS, Solargis и Global Solar Atlas [21].

Составлена сравнительная таблица 1. Все рассмотренные источники данных предоставляют существенную информацию об инсоляции, однако степень дета-

лизации, область покрытия и доступность данных отличаются [22].

NASA POWER предоставляет глобальное покрытие и довольно большое разрешение, что делает этот источник полезным для многих проектов. Однако, несмотря на доступность исторических данных, возможность получения ежедневных TMY файлов отсутствует.

PVGIS является очень гибким инструментом, поскольку предлагает несколько баз данных с различным географическим покрытием и разрешением. Кроме того, PVGIS предоставляет возможность получения ежедневных TMY файлов, что делает его привлекательным для исследователей и разработчиков.

Solargis и Global Solar Atlas также предоставляют важную информацию, но у каждого из них есть свои ограничения. Solargis предлагает высокое разрешение и доступ к TMY файлам, но доступ к данным является платным. Global Solar Atlas, источником данных которого является Solargis, хотя и предлагает бесплатные данные, но не предоставляет доступ к историческим данным и TMY файлам.

**Таблица 1.** Сравнительный анализ источников данных об инсоляции

**Table 1.** Comparative analysis of insolation data sources

Источник данных	Географическое покрытие	Разрешение	Доступность исторических данных	Возможность получения TMY файлов	Доступность и стоимость
NASA POWER	Глобальный	110 км	Да	Да, среднемесячные	Открытый доступ, бесплатно
PVGIS	Европа, Африка, Азия, Северная и часть Южной Америки; глобальный (ERA-5)	(4–25) км	Да	Да, ежедневные	Открытый доступ, бесплатно
Solargis	Глобальный	250 м	Да	Да, TMY Pxx	Закрытый доступ, платно
Global Solar Atlas	Участки суши между 60° северной широты и 45° южной широты	250 м	Нет	Нет	Открытый доступ, бесплатно



В дополнение к этим источникам, можно также рассмотреть другие, менее известные источники данных об инсоляции, например базы данных Meteororm или Copernicus. Эти источники могут быть полезными в специфических сценариях или в случае, если основные источники не могут обеспечить необходимых данных.

После проведенного анализа, с учетом географического расположения Крыма, потребности в детализированных почасовых данных и бесплатном доступе к данным, наиболее оптимальным выбором источника данных об инсоляции становится PVGIS, а именно его база данных PVGIS-SARAH2.

Данное решение обусловлено рядом преимуществ, которыми обладает PVGIS-SARAH2.

Во-первых, этот источник предоставляет более детализированные данные по сравнению с другими аналогами. Пространственное разрешение составляет всего 4 км, что позволяет более точно учитывать географические особенности и изменения в инсоляции.

Во-вторых, PVGIS-SARAH2 сфокусирован на Европейской части, что гарантирует наличие качественных данных для региона Крыма. Это важно, поскольку качество и точность данных прямо влияют на точность прогнози-

вания работы солнечной энергетической системы.

В-третьих, PVGIS предлагает доступ к почасовым данным и файлам TMY. Это особенно важно для оптимизации управления энергией и точного моделирования работы системы солнечной энергетики.

Наконец, доступ к данным PVGIS-SARAH2 предоставляется бесплатно, что также является значительным преимуществом в контексте экономической эффективности проекта.

Таким образом, PVGIS-SARAH2 представляет собой наиболее оптимальный выбор источника данных об инсоляции для проекта СЭС в Крыму.

### Выводы

Проанализирована современная ситуация в области использования солнечной энергии, а также возможное развитие производства водорода в ближайшем будущем. Определена производительность солнечной электростанции при оптимальной конфигурации и подобранного оборудования, а также выбрано местоположение с учетом всех возможных ограничений. Проведен сравнительный анализ источников данных об инсоляции.

Дальнейшие исследования в этом направлении могут способствовать развитию солнечной энергетики в России.

### Список источников

1. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 300 с. ISBN 978-5-383-00608-5.

2. Амерханов Р.А., Григораш О.В., Самородов И.Б., Цыганков Б.К., Воробьев Е.С. Солнечные фотоэлектрические станции. Краснодар: КубГАУ, 2017. 206 с. ISBN 978-5-00097-279-3.

3. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqCvsexl.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).

4. Модульная водородная платформа электролизера H-TEC PEM [Электронный ресурс]. URL: <https://www.h-tec.com/en/products/detail/mhp-series/mhp-product/> (дата обращения: 10.01.2024).

5. Новые российские разработки для оптимизации энергоперехода [Электронный ресурс]. URL: <https://energypolicy.ru/novye-rossijskie-razrabotki-dlya-optimizaczii-energoperehoda/energetika/2023/14/19/> (дата обращения: 10.01.2024).

6. Водород по одному доллару за килограмм [Электронный ресурс]. URL: <https://globalenergyprize.org/en/2022/04/01/hydrogen-at-one-dollar-per-kilogram/> (дата обращения: 10.01.2024).



7. Воркунов О.В., Ихсанова А.И., Гайнутдинова А.М. Оптимальная ориентация солнечных фотоэлектрических модулей в г. Казани // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11/12. С. 26-29. EDN: VRWVOT.

8. Почанин Ю. Конструкции и монтаж фотоэлектрических модулей [Электронный ресурс]. URL: <https://libcat.ru/knigi/nauka-i-obrazovanie/prochaya-nauchnaya-literatura/578660-2-yurij-pochanin-konstrukcii-i-montazh-fotoelektricheskikh-modulej.html> (дата обращения: 10.01.2024).

9. Жураева З.И. Обзорный анализ основных видов солнечных элементов и выявление путей повышения эффективности их работы и применения // Universum: технические науки. 2018. № 10. С. 66–68.

10. Кравцов П.В. Факторы, влияющие на производительность солнечных батарей // Universum: технические науки. 2022. № 9-4 (102). С. 53–55. EDN: WFDSED.

11. Горбунова Т.Ю. Оценка ландшафтного потенциала Юго-Восточного Крыма для использования систем возобновляемой энергетики — солнечной и ветровой: дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь, 2020. 223 с.

12. Оптимальный угол установки солнечной батареи для максимальной выработки энергии в северных широтах [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/optimalnyj-ugol-ustanovki-sb.html> (дата обращения: 10.01.2024).

13. Лучший угол для солнечных панелей и как его правильно получить [Электронный ресурс]. URL: <https://a1solarstore.com/blog/best-angle-for-solar-panels-and-how-to-get-it-right.html> (дата обращения: 10.01.2024).

14. Как определить оптимальное расстояние между рядами солнечных панелей? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/rasstoyanie-mezhdu-ryadami-solnechnyh-modulej.htm?ysclid=lidsysoguz705182331/> (дата обращения: 10.01.2024).

15. Расстояние между рядами солнечный панелей [Электронный ресурс]. URL: <https://azsolarcenter.org/pv-row-to-row-spacing> (дата обращения: 10.01.2024).

16. Яндекс. Карты и Транспорт [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/maps/?l=sat,skl&ll=35.318000,45.017000&z=17/> (дата обращения: 10.01.2024).

17. Климатические особенности Крыма [Электронный ресурс]. URL: <http://geo-storm.ru/priroda-i-klimat/pogoda/klimaticheskie-osobennosti-kryma/> (дата обращения: 10.01.2024).

18. Лучшая ориентация для солнечных панелей [Электронный ресурс]. URL: [\[sena.com/best-orientation-solar-panels/\]\(https://sena.com/best-orientation-solar-panels/\) \(дата обращения: 10.01.2024\).](https://solar-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

19. Номинальная мощность солнечной батареи. Что нужно и важно знать? [Электронный ресурс]. URL: <https://helios-house.ru/novosti/nominalnaya-moshchnost-solnechnoj-batarei.html> (дата обращения: 10.01.2024).

20. Как спроектировать солнечную фотоэлектрическую систему [Электронный ресурс]. URL: <https://lankantrailerblazer.wordpress.com/2019/10/04/how-to-design-a-solar-pv-system-calculation-of-ac-power-generation/> (дата обращения: 10.01.2024).

21. Руководство пользователя PVGIS [Электронный ресурс]. URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en) (дата обращения: 10.01.2024).

22. Типичные данные за метеорологический год [Электронный ресурс]. URL: <https://solargis.com/products/evaluate/overview> (дата обращения: 10.01.2024).

## References

1. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. *Solnechnaya energetika* [Solar Energy]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2008. 300 p. ISBN 978-5-383-00608-5. [in Russian].

2. Amerkhanov R.A., Grigorash O.V., Samorodov I.B., Tsygankov B.K., Vorob'ev E.S. *Solnechnye fotoelektricheskie stantsii* [Solar Photovoltaic Stations]. Krasnodar, KubGAU, 2017. 206 p. ISBN 978-5-00097-279-3. [in Russian].

3. *Kontseptsiya razvitiya vodorodnoi energetiki v Rossiiskoi Federatsii* [Concept for the Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation] [Electronic Resource]. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

4. *Modul'naya vodorodnaya platforma elektrolizera H-TEC PEM* [Modular Hydrogen Electrolyser Platform H-TEC PEM]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.h-tec.com/en/products/detail/mhp-series/mhp-product/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

5. *Novye rossiiskie razrabotki dlya optimizatsii energoperekhoda* [New Russian Developments for Optimizing the Energy Transition]. [Electronic Resource]. URL: <https://energypolicy.ru/novye-rossijskie-razrabotki-dlya-optimizacii-energoperekhoda/energetika/2023/14/19/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

6. *Vodorod po odnomu dollaru za kilogram* [Hydrogen at One Dollar per Kilogram]. [Electronic Resource]. URL: <https://globalenergyprize.org/>

en/2022/04/01/hydrogen-at-one-dollar-per-kilogram/ (accessed 10.01.2024). [in Russian].

7. Vorkunov O.V., Ikhsanova A.I., Gainutdinova A.M. Optimal'naya orientatsiya solnechnykh fotoelektricheskikh modulei v g. Kazani [Optimum Orientation of Solar PV Modules in Kazan]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki — News of Universities. Problems of Energy*, 2015, No. 11/12, pp. 26-29. EDN: VRWVOT. [in Russian].

8. Pochanin Yu. *Konstruktivnyy i montazh fotoelektricheskikh modulei* [Design and Installation of Photovoltaic Modules]. [Electronic Resource]. URL: <https://libcat.ru/knigi/nauka-i-obrazovanie/prochaya-nauchnaya-literatura/578660-2-yurij-pochanin-konstrukcii-i-montazh-fotoelektricheskikh-modulej.html> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

9. Zhuraeva Z.I. Obzorniy analiz osnovnykh vidov solnechnykh elementov i vyyavlenie putei povysheniya effektivnosti ikh raboty i primeneniya [Overview Analysis of the Main Types of Solar Cells and Revealing Ways to Improve the Efficiency and Use of Solar Cells]. *Universum: tekhnicheskie nauki — Universum: Technical Sciences*, 2018, No. 10, pp. 66–68. [in Russian].

10. Kravtsov P.V. *Faktory, vliyayushchie na proizvoditel'nost' solnechnykh batarei* [Factors Affecting the Performance of Solar Batteries]. *Universum: tekhnicheskie nauki — Universum: Technical Sciences*, 2022, No. 9-4 (102), pp. 53–55. EDN: WFDSSE. [in Russian].

11. Gorbunova T.Yu. *Otsenka landshaftnogo potentsiala Yugo-Vostochnogo Kryma dlya ispol'zovaniya sistem vozobnovlyаемой energetiki — solnechnoi i vetrovoi: dis. ... kand. geogr. nauk* [Assessment of the Landscape Potential of the South-Eastern Crimea for the Use of Renewable Energy Systems — Solar and Wind: Cand. Geogr. Sci. Dis.]. Simferopol', 2020. 223 p. [in Russian].

12. *Optimal'nyi ugol ustanovki solnechnoi batarei dlya maksimal'noi vyrabotki energii v severnykh shirotakh* [Optimal Installation Angle of a Solar Battery for Maximum Energy Production in Northern Latitudes]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/optimalnyj-ugol-ustanovki-sb.html> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

13. *Luchshii ugol dlya solnechnykh panelei i kak ego pravil'no poluchit'* [Best Angle for Solar Panels and How to Get It Right]. [Electronic Resource]. URL: <https://a1solarstore.com/blog/best-angle-for-solar-panels-and-how-to-get-it-right.html> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

14. *Kak opredelit' optimal'noe rasstoyanie mezhduradami solnechnykh panelei?* [How to Determine the Optimal Distance between Rows of Solar Panels?]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/rasstoyanie-mezhduradami-solnechnykh-modulej.htm?ysclid=lidsysoguz705182331/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

15. *Rasstoyanie mezhduradami solnechnykh panelei* [Distance between Rows of Solar Panels]. [Electronic Resource]. URL: <https://azsolarcenter.org/pv-row-to-row-spacing> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

16. *Yandex. Karty i Transport* [Yandex. Maps and Transport]. [Electronic Resource]. URL: <https://yandex.ru/maps/?l=sat,skl&ll=35.318000,45.017000&z=17/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

17. *Klimaticheskie osobennosti Kryma* [Climatic Features of Crimea]. [Electronic Resource]. URL: <http://geo-storm.ru/priroda-i-klimat/pogoda/klimaticheskie-osobennosti-kryma/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

18. *Luchshaya orientatsiya dlya solnechnykh panelei* [Best Orientation for Solar Panels]. [Electronic Resource]. URL: <https://solarsena.com/best-orientation-solar-panels/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

19. *Nominal'naya moshchnost' solnechnoi batarei. Chto nuzhno i vazhno znat'?* [Rated Power of the Solar Battery. What Is Necessary and Important to Know?]. [Electronic Resource]. URL: <https://helios-house.ru/novosti/nominalnaya-moshchnost-solnechnoj-batarei.html> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

20. *Kak sproektirovat' solnechnuyu fotoelektricheskuyu sistemu* [How to Design a Solar Photovoltaic System]. [Electronic Resource]. URL: <https://lankantrailblazer.wordpress.com/2019/10/04/how-to-design-a-solar-pv-system-calculation-of-ac-power-generation/> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

21. *Rukovodstvo pol'zovatelya PVGIS* [PVGIS User Manual]. [Electronic Resource]. URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en) (accessed 10.01.2024). [in Russian].

22. *Tipichnye dannye za meteorologicheskii god* [Typical Data for a Meteorological Year]. [Electronic Resource]. URL: <https://solargis.com/products/evaluate/overview> (accessed 10.01.2024). [in Russian].

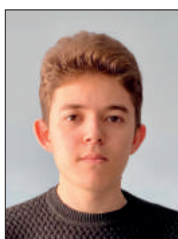
Статья поступила в редакцию 29.01.2024; одобрена после рецензирования 07.02.2024; принята к публикации 21.02.2024.  
The article was submitted 29.01.2024; approved after reviewing 07.02.2024; accepted for publication 21.02.2024.

Научная статья

УДК 004.942

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-132-140

## МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ОСТАТКОВ В ПРОЦЕССЕ КОМПАУНДИРОВАНИЯ БЕНЗИНОВ, ОСНОВАННЫЙ НА ИНТЕГРАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ И НЕЙРОННОЙ СЕТИ



*Вадим Флюрович Зиннатуллин*

*Vadim F. Zinnatullin*

*магистрант кафедры информационных технологий и прикладной математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*



*Сергей Николаевич Коледин*

*Sergey N. Koledin*

*кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий и прикладной математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*

### Актуальность

Работа посвящена решению важной экономической задачи для нефтеперерабатывающих предприятий — выбору оптимального состава компонентов при компаундировании автомобильных бензинов марок АИ-92 и АИ-95, минимизирующего остаточные компоненты при смешивании. Оптимизация этого процесса затруднена отклонением от аддитивности физико-химических свойств компонентов, их многочисленностью и постоянно изменяющимся составом сырья.

Операторы, ответственные за процесс компаундирования, обычно воспроизводят рецептуры смешивания, основанные на заранее рассчитанных плановых данных, полученных либо методом линейного программирования, либо статистическими методами. Тем не менее, эти рецептуры могут подвергаться корректировкам в соответствии с текущим наличием компонентов на предприятии. Операторы часто выполняют эту задачу вручную, опираясь на свой опыт. Ввиду указанных сложностей, связанных с составлением рецептур смешивания, применение математических моделей для автоматизации деятельности оператора является затруднительным. В данной работе предлагается воспользоваться нейронными сетями для решения данной задачи, поскольку они часто способны эффективно справляться с задачами, мало поддающимися алгоритмизации или традиционному математическому моделированию.

### Цель исследования

Исследовать метод выбора оптимальной рецептуры компаундирования бензинов товарных марок АИ-92 и АИ-95 с целью минимизации

### Ключевые слова

компаундирование бензинов, минимизация остатков, линейное программирование, многослойная нейронная сеть, многослойный персептрон

остаточных компонентов на основе интеграции линейного программирования и нейронных сетей.

#### Методы исследования

Для проведения исследования использованы данные о компаундировании трёх различных нефтеперерабатывающих заводов. Данные включают в себя 40 рецептов смешивания для товарных бензинов марок АИ-92-К5, АИ-95-К5. Всего в рецептурах смешивания участвуют 15 различных компонентов, такие как: бензин каталитического крекинга, риформат, изомеризат, МТБЭ и другие.

Первый этап работы включает в себя решение задачи минимизации остатков компонентов. Строится задача линейного программирования с ограничениями. Количество ограничений зависит от исходных данных. В результате решения этой задачи будут получены рецепты смешивания. Однако для соответствия этих рецептов ГОСТ и другим нормативным требованиям, необходима их корректировка, поскольку при решении задачи линейного программирования не учитываются показатели качества товарного бензина (октановое число, испаряемость, вязкость и др.).

Второй этап работы применение нейронной сети (многослойного персептрона) для корректировки полученных с первого этапа рецептов. Для каждого конечного продукта должна быть создана и обучена своя нейросеть. Для создания дата-сета используются уже существующие рецепты смешивания бензинов, которые соответствуют всем необходимым нормам.

#### Результаты

В работе предлагается методика решения задачи составления рецептов компаундирования, объединяющая линейное программирование и многослойный персептрон. Описан метод решения задачи минимизации методами линейного программирования, создана программа для автоматизации поиска рецептов с минимальными остатками. Описано применение полученных результатов для обучения многослойного персептрона, приближающему составы к реальным с учетом нормативов и ГОСТ.

**Для цитирования:** Зиннатуллин В. Ф., Коледин С. Н. Метод минимизации остатков в процессе компаундирования бензинов основанный на интеграции линейного программирования и нейронной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 1. Т. 20. С. 132-140. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-132-140>.

Original article

## METHOD OF MINIMIZING RESIDUES IN THE PROCESS OF GASOLINE COMPOUNDING BASED ON THE INTEGRATION OF LINEAR PROGRAMMING AND NEURAL NETWORK

#### Relevance

The work is devoted to solving an important economic problem for oil refineries — the selection of the optimal composition of components when compounding motor gasoline brands АИ-92 and АИ-95, which minimizes residual components during mixing. Optimization of this process is complicated by the deviation from additivity of the physicochemical properties of the components, their large number and the constantly changing composition of the raw materials.

#### Keywords

gasoline compounding, residue minimization, linear programming, multilayer neural network, multilayer perceptron



Operators responsible for the compounding process typically reproduce blending recipes based on pre-calculated planning data obtained either by linear programming or statistical methods. However, these formulations may be subject to adjustments based on current plant availability. Operators often perform this task manually, relying on their experience. Due to these difficulties associated with the preparation of mixing recipes, the use of mathematical models to automate operator activities is difficult. In this paper, it is proposed to use neural networks to solve this problem, since they are often able to effectively cope with problems that are difficult to algorithmize or traditional mathematical modeling.

#### **Aim of research**

The main aim of the research is to explore a method for selecting the optimal formulation for compounding gasoline of the AI-92 and AI-95 brands in order to minimize residual components, based on the integration of linear programming and neural networks.

#### **Research methods**

The study used compounding data from three different refineries. The data includes 40 mixing recipes for commercial gasoline brands AI-92-K5, AI-95-K5. In total, 15 different components are involved in the mixing recipes, such as: catalytic cracking gasoline, reformat, isomerate, MTBE and others.

The first stage of work includes solving the problem of minimizing the remaining components. A linear programming problem with constraints is constructed. The number of restrictions depends on the source data. As a result of solving this problem, mixing recipes will be obtained. However, in order for these formulations to comply with State Standards and other regulatory requirements, they need to be adjusted, since when solving the linear programming problem, the quality indicators of commercial gasoline (octane number, volatility, viscosity, etc.) are not considered.

The second stage of work is the use of a neural network (multilayer perceptron) to adjust the recipes obtained from the first stage. For each final product, its own neural network must be created and trained. To create a data set, existing gasoline blending recipes are used that meet all necessary standards.

#### **Results**

The paper proposes a method for solving the problem of creating compounding recipes, combining linear programming and a multilayer perceptron. A method for solving the minimization problem using linear programming methods is described, and a program has been created to automate the search for recipes with minimum remainders. The application of the obtained results for training a multilayer perceptron is described, bringing the compositions closer to real ones, considering regulatory requirements and State Standards.

**For citation:** Zinnatullin V. F., Koledin S. N. Metod minimizatsii ostatkov v protsesse kompaundirovaniya benzinov osnovannyi na integratsii lineinogo programmirovaniya i neuronnoi seti [Method of Minimizing Residues in the Process of Gasoline Compounding Based on the Integration of Linear Programming and Neural Network]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 132-140 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-132-140>.

#### **Введение**

Одним из наиболее важных экономических вопросов для нефтеперерабатывающего предприятия является выбор

оптимального сочетания компонентов в процессе компаундирования для получения качественных товарных продуктов, в частности автомобильных бензинов

неэтилированных марок АИ-92, АИ-95. Оптимизация процесса компаундирования затрудняется отклонением от аддитивности ряда физико-химических свойств компонентов смесей [1], большим количеством вовлекаемых компонентов, а также постоянно меняющимся составом сырья.

Операторы, ответственные за процесс компаундирования, используют в качестве основы плановые, высчитанные заранее методом линейного программирования или статистическим методом [2–5], рецептуры, однако эти рецептуры могут быть подвержены изменениям с учётом текущего набора компонентов, произведенных на заводе, операторы делают эту работу вручную, часто опираясь на свой опыт работы. Для автоматизации этого процесса и повышения качества товарного бензина предлагается использование нейронной сети (многослойного персептрона [6]) совместно с линейным программированием. Нейронные сети часто достаточно хорошо могут решать задачи, которые слабо поддаются алгоритмизации или традиционному математическому моделированию.

В данной работе рассматривается задача минимизации остатков компаундирования линейным программированием в комбинации с нейронной сетью.

Решена задача минимизации остатков процесса компаундирования бензинов симплекс методом; создана программа, автоматизирующая нахождение рецептуры с минимальным остатком товарных бензинов марок АИ-92, АИ-95; описано применение полученных результатов для обучения многослойного персептрона, приближающего полученные составы к действительным, то есть к тем, которые соответствуют нормативным требованиям и ГОСТ [7].

### Задача минимизации остатков

Для решения задачи минимизации остатков использованы методы линейного программирования. Входные данные и выходные данные для задачи можно представить в виде таблицы 1, где  $n$  — количество компонентов, участвующих в компаундировании;

$m$  — количество продуктов компаундирования;

$k_1, k_2, \dots, k_n$  — доля компонента  $i$  среди всех компонентов, при этом сумма компонентов должна быть равной одному:  $\sum_{i=1}^n k_i = 1.0$ ;

$p_1, p_2, \dots, p_m$  — доля продукта  $j$  среди всех продуктов, при этом сумма долей должна быть равной одному:  $\sum_{j=1}^m p_j = 1.0$ ;

$x_{ij}$ , для  $i = 1, 2, \dots, n$  и  $j = 1, 2, \dots, m$  — доля компонента  $i$  в смеси  $j$ .

**Таблица 1.** Исходные данные и решение задачи минимизации остатков компаундирования

**Table 1.** Initial data and solution of the residual compounding minimization problem

	Количество	Продукт 1	Продукт 2	...	Продукт $m$	Остаток
Компонент 1	$k_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1m}$	$k_1 - \sum_{j=1}^m x_{1j}$
Компонент 2	$k_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2m}$	$k_2 - \sum_{j=1}^m x_{2j}$
...	...	...	...	...	...	...
Компонент $n$	$k_n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	$x_{nm}$	$k_n - \sum_{j=1}^m x_{nj}$
Доля продукта		$p_1$	$p_2$	...	$p_m$	

Целевая функция задачи линейного программирования выглядит следующим образом:

$$F = 1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Физический смысл целевой функции (1) заключается в минимизации остатков компаундирования. Ограничения для данной задачи представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_j \sum_{i=1}^n x_{ij} - p_j \sum_{i=1}^n \sum_{o=1}^m x_{io} = 0, \\ \text{для } j = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq k_i, \text{ для } i = 1, 2, \dots, n \\ x_{\min ij} \sum_{l=1}^n x_{lj} - x_{ij} \leq 0, \\ \text{для } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \\ x_{\max ij} \sum_{l=1}^n x_{lj} - x_{ij} \geq 0, \\ \text{для } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $x_{\min ij}$  — минимальное содержание компонента в продукте  $j$ ;

$x_{\max ij}$  — максимальное содержание компонента в продукте  $j$ .

Каждое уравнение системы (2) представляет собой ограничение по физическому смыслу процесса компаундирования бензинов. Так, первое ограничение требуется для отслеживания равенства каждой смеси к доле продукта:

$$p_j \sum_{i=1}^n x_{ij} - p_j \sum_{i=1}^n \sum_{o=1}^m x_{io} = 0, \quad (3)$$

для  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Следующее ограничение необходимо, чтобы сумма долей компонента в продуктах не превышала исходной величины:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq k_i, \text{ для } i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Следующие ограничения требуются для фиксации  $x_{ij}$  в диапазоне  $[x_{\min ij}; x_{\max ij}]$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{\min ij} \sum_{l=1}^n x_{lj} - x_{ij} \leq 0, \\ \text{для } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; \end{array} \right. \quad (5)$$

$$x_{\max ij} \sum_{l=1}^n x_{lj} - x_{ij} \geq 0,$$

для  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$

В приведённой выше задаче не учитывается соответствие полученных смесей нормативным требованиям. В данном случае это не требуется, так как решение будет использовано как входные данные для будущей нейронной сети, которая, в свою очередь, будет играть роль корректировщика полученных рецептов для соответствия нормам. Решение задачи требует использования дата-сета, причём как для обучения нейронной сети, так и для нахождения  $x_{\min ij}$  и  $x_{\max ij}$  — это связано с неопределённостью диапазона значений для компонентов рецептов смешивания, поэтому одним из способов их получения является анализ реальных данных.

Для решения задачи были использованы данные о компаундировании 3-х нефтеперерабатывающих заводов за 6 месяцев их функционирования, а именно 40 рецептов смешивания для товарных бензинов марок АИ-92-К5, АИ-95-К5. Всего в рецептурах смешивания участвуют 15 различных компонентов, такие как: бензин каталитического крекинга, риформат, изомеризат, МТБЭ и так далее. Для каждого компонента были получены минимальное и максимальное содержание в смеси ( $x_{\min ij}$  и  $x_{\max ij}$ ) на основе этих 40 рецептов смешивания.

Используя целевую функцию (1), ограничения для этой функции (2) и найденные ранее значения  $x_{\min ij}$  и  $x_{\max ij}$  для каждого компонента, создана программа на языке C# [8], которая на основе введенных начальных данных (пример в таблице 2) рассчитывает рецепты, минимизирующие остатки (пример в таблице 3). Для решения задачи линейного программирования использована

библиотека для фреймворка .NET — Google OR-Tools [9].

### Применение нейронной сети

Результаты, полученные при решении задачи линейного программирования, требуют корректировки для соответствия требованиям, в том числе ГОСТ [7]. Для этого предлагается использовать многослойный персептрон [6]. В общем виде архитектура нейронной сети представлена на рисунке 1.

Количество нейронов входного слоя равно количеству нейронов выходного слоя. Эти слои представляют из себя содержание каждого компонента в смеси (от 0,0 до 1,0 включительно), который может участвовать в смешивании с целью получения товара определенной марки. Для каждого конечного продукта должна быть создана и обучена своя нейросеть. Для создания дата-сета используются уже существующие рецептуры смешивания бензинов, которые соответ-

**Таблица 2.** Пример входных данных программы

**Table 2.** Example of input data for the program

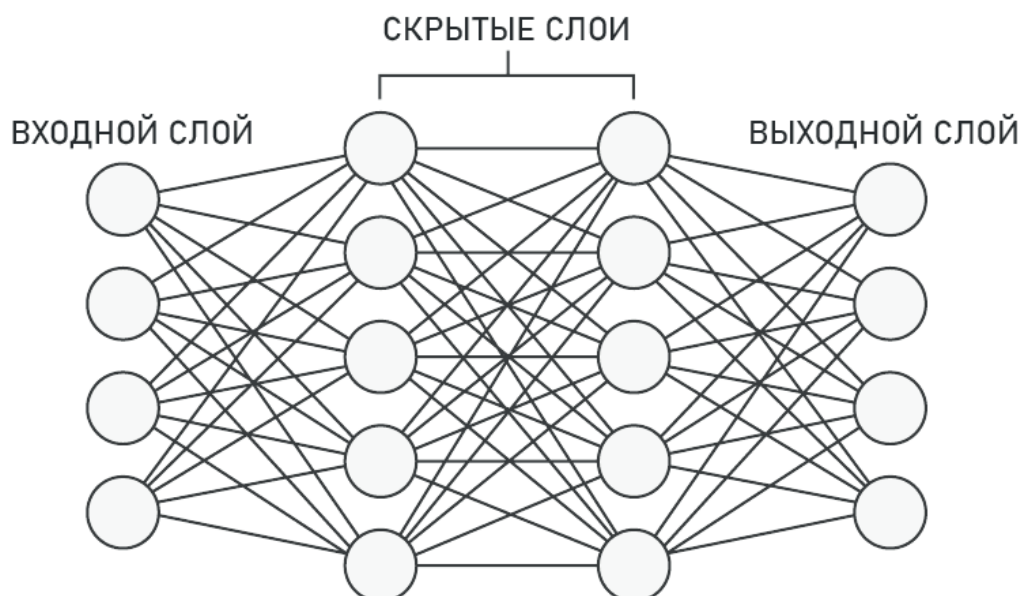
<i>Продукты</i>	
АИ-95-К5	50 %
АИ-92-К5	50 %
<i>Компоненты</i>	
Платформат стабильный	2,70 %
Изопентан	1,72 %
МТБЭ	3,83 %
Бензин каталитического крекинга (гидроочищенный)	66,20 %
Риформат	19,88 %
Изомеризат стабильный	2,98 %
Смесь изомеризата и кубового остатка изомеризации	2,70 %
<i>Сумма</i>	100 %

**Таблица 3.** Пример выходных данных программы

**Table 3.** Example of output data from the program

<i>Значение целевой функции (остатки)</i>	0 %
<i>АИ-95-К5</i>	
Платформат стабильный	2,70 %
МТБЭ	3,83 %
Бензин каталитического крекинга (гидроочищенный)	36,80 %
Риформат	6,67 %
<i>Сумма</i>	50 %
<i>АИ-92-К5</i>	
Изопентан	1,72 %
Бензин каталитического крекинга (гидроочищенный)	29,40 %
Риформат	13,21 %
Изомеризат стабильный	2,98 %
Смесь изомеризата и кубового остатка изомеризации	2,70 %
<i>Сумма</i>	50 %





**Рисунок 1.** Общий вид архитектуры нейронной сети для решения задачи компаундирования

**Figure 1.** General architecture of the neural network for solving the compounding problem

ствуют всем необходимым нормам. Создание дата-сета может быть осуществлено с использованием ранее разработанной программы, решающей задачу минимизации, тогда алгоритм создания дата-сета будет выглядеть так:

1. Выбрать два или более существующих рецептур;
2. Использовать суммы каждого отдельного компонента из выбранных рецептур в качестве входных данных задачи минимизации, при этом доли продуктов выбираются генератором случайных чисел;
3. Решенные на этапе минимизации данные использовать в качестве входных данных нейросети, а исходные выбранные рецептуры использовать в качестве ожидаемых выходных данных нейросети.

Таким методом возможно сгенерировать большое количество разнообразных данных. Для обучения нейронной сети можно использовать алгоритм обратного распространения ошибки (Backpropagation) [10]. Обученный многослойный персептрон не способен обеспечить абсолютную точность в предсказаниях.

В связи с этим необходимо разработать алгоритм валидации для полученных рецептур.

### Выводы

Разработан метод минимизации остатков в процессе компаундирования бензинов, основанный на применении линейного программирования для получения оптимальных рецептур и многослойного персептрона для их корректировки с целью соответствия нормативным требованиям.

Программа, разработанная на C# с использованием Google OR-Tools, способна в реальном времени предоставить рецептуры бензинов на основе введенных объемах компонентов.

В работе представлен алгоритм обучения многослойного персептрона, включая подробности подготовки дата-сета. Перспективы дальнейших исследований включают в себя интеграцию описанной нейронной сети в разрабатываемую программу, а также разработку алгоритма валидации полученных результатов.

## Список источников

1. Головина Е.С. Разработка моделей и методики оптимизации работы цеха компаундирования бензинов с использованием комплексного показателя качества: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2023. 146 с.
2. Шишов Р.И., Григорьев Я.Ю. Оптимизация выбора рецептуры компонент для процесса компаундирования компонентов при производстве товарных бензинов // Постулат: электронный журнал. 2018. №4. URL: <https://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/1353/1384>.
3. Малецкий В.Ю., Долганов И.М., Долганова И.О. Математическое моделирование процесса компаундирования бензинов с использованием компьютерной моделирующей системы «Compounding» // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXIII Междунар. симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина, Томск, 8-12 апреля 2019 г.: в 2 т. Томск: Изд-во ТПУ, 2019. Т. 2. С. 341–342. EDN: HKDTBA.
4. Лисицын Н.В., Гошкин В.П., Поздяев В.В., Кузичкин Н.В. Методология построения системы оптимального компаундирования товарных нефтепродуктов // Химическая промышленность. 2003. № 8. С. 15–20.
5. Поздяев В.В., Сомов В.Е., Лисицын Н.В., Кузичкин Н.В. Оптимальное компаундирование бензинов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2002. № 10. С. 53–57.
6. Fiesler E., Beale R. Handbook of Neural Computation. New York City: CRC Press, 1996. 436 с. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429142772> (дата обращения: 25.01.2024).
7. ГОСТ 32513-2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. Введ. 2015.01.01. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.
8. Price M.J. C# 12 and .NET 8 — Modern Cross-Platform Development Fundamentals. Birmingham: Packt Publishing, 2023. 827 с. ISBN 978-1-83763-587-0.
9. Google OR-Tools: [сайт]. URL: <https://developers.google.com/optimization> (дата обращения: 24.01.2024).
10. Chauvin Y., Rumelhart D.E. Backpropagation: Theory, Architectures, and Applications. New York City: Psychology Press, 1995. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203763247>.

## References

1. Golovina E.S. *Razrabotka modelei i metodiki optimizatsii raboty tsekha kompaundirovaniya benzinov s ispol'zovaniem kompleksnogo pokazatelya kachestva: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of Models and Methods for Optimizing the Operation of a Gasoline Compounding Workshop Using a Comprehensive Quality Indicator: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Samara, 2023. 146 p.
2. Shishov R.I., Grigor'ev Ya. Yu. *Optimizatsiya vybora retseptury komponent dlya protsessa kompaundirovaniya komponentov pri proizvodstve tovarnykh benzinov* [Optimization of the Choice of Component Recipes for the Process of Compounding Components in the Production of Commercial Gasoline]. *Postulat: elektronnyi zhurnal — Postulat: Electronic Journal*, 2018, No. 4. URL: <https://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/1353/1384>.
3. Maletskii V.Yu., Dolganov I.M., Dolganova I.O. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa kompaundirovaniya benzinov s ispol'zovaniem komp'yuterno modeliruyushchei sistemy «Compounding»* [Mathematical Modeling of the Gasoline Compounding Process Using the «Compounding» Computer Modeling System]. *Trudy XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchennykh «Problemy geologii i osvoeniya nedr», posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K.I. Satpaeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora K.V. Radugina, Tomsk, 8-12 aprelya 2019 g.: v 2 t.* [Proceedings of the XXIII International Symposium Named after Academician M.A. Usov of Students and Young Scientists «Problems of Geology and Subsoil Development», Dedicated to the 120th Anniversary of the Birth of Academician K.I. Satpayev, the 120th Anniversary of the Birth of Professor K.V. Radugin, Tomsk, April 8-12, 2019: in 2 vols.]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2019. T. 2. S. 341–342. EDN: HKDTBA.
4. Lisitsyn N.V., Goshkin V.P., Pozdyaev V.V., Kuzichkin N.V. *Metodologiya postroeniya sistemy optimal'nogo kompaundirovaniya tovarnykh nefteproduktov* [Methodology for Constructing a System for Optimal Compounding of Commercial Petroleum Products]. *Khimicheskaya promyshlennost' — Chemical Industry*, 2003, No. 8, pp. 15–20.
5. Pozdyaev V.V., Somov V.E., Lisitsyn N.V., Kuzichkin N.V. *Optimal'noe kompaundirovanie benzinov* [Optimal Compounding of Gasolines].

*Neftepererabotka i neftekhimiya — Oil Refining and Petrochemicals*, 2002, No. 10, pp. 53–57.

6. Fiesler E., Beale R. *Handbook of Neural Computation*. New York City, CRC Press, 1996. 436p. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429142772> (accessed 25.01.2024).

7. *GOST 32513-2013. Topliva motornye. Benzin neetilirovannyi. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 2015.01.01.* [State Standard 32513-2013. Automotive Fuels. Unleaded Petrol. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 12 p.

8. Price M.J. *C# 12 and .NET 8 — Modern Cross-Platform Development Fundamentals*. Birmingham: Packt Publishing, 2023. 827 p. ISBN 978-1-83763-587-0.

9. *Google OR-Tools*: [website]. URL: <https://developers.google.com/optimization> (accessed 24.01.2024).

10. Chauvin Y., Rumelhart D.E. *Backpropagation: Theory, Architectures, and Applications*. New York City, Psychology Press, 1995. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203763247>.

*Статья поступила в редакцию 05.03.2024; одобрена после рецензирования 24.03.2024; принята к публикации 04.04.2024.*

*The article was submitted 05.03.2024; approved after reviewing 24.03.2024; accepted for publication 04.04.2024.*

Научная статья

УДК 621.316

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-141-148

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНОГО ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СНИЖЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПЕРЕРЫВА В РАБОТЕ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ

**Рустам Радикович Шарипов****Rustam R. Sharipov***старший преподаватель кафедры**«Электротехника и электрооборудование предприятий»,**Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия***Ильдар Ирекович Хайдаров****Ildar I. Khaydarov***ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,**Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*

### Актуальность

Большая часть потребляемой электроэнергии приходится на электроприводы (ЭП) различных технологических процессов. Наиболее распространенным способом повышения эффективности работы электропривода является применение частотно-регулируемого привода (ЧРП). Однако применение ЧРП в ряде случаев вызывает снижение эффективности работы электропривода, связано это с высокой чувствительностью преобразователя частоты (ПЧ) к провалам напряжения сети, приводящим к отказу ПЧ и к остановке технологического процесса. Актуальным направлением является проработка алгоритмических методов повышения устойчивости электроприводов.

### Цель исследования

Повышение устойчивости работы частотно-регулируемого двигателя при аварийных режимах в системе электроснабжения. Разработка схемы электроснабжения электропривода и проведение исследований алгоритма работы ПЧ в аварийных режимах;

### Методы исследования

Исследование разработанного метода выполнено в программном комплексе Matlab Simulink.

### Результаты

Предложена схема электроснабжения электропривода с линией синхронизированного байпаса и основной линией с преобразователем

### Ключевые слова

частотно-регулируемый привод, синхронный двигатель, система управления, датчик скорости, частотный пуск, СТД-8000



частоты, работающего по разработанному алгоритму. Проведено исследование влияния ошибки измерения частоты вращения вала на точность поддержания рекуперации в звене постоянного тока как одного из направлений повышения устойчивости ЧПП к кратковременным провалам напряжения в сети.

**Для цитирования:** Шарипов Р. Р., Хайдаров И. И. Программный комплекс для реализации асинхронного частотного пуска высоковольтных двигателей и снижения времени перерыва в работе двигателя при кратковременной потере питания // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2024. № 1. Т. 20. С.141-148. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-141-148>.

Original article

## SOFTWARE COMPLEX FOR IMPLEMENTING ASYNCHRONOUS FREQUENCY STARTING OF HIGH-VOLTAGE MOTORS AND REDUCING BREAK TIME IN MOTOR OPERATION IN THE EVENT OF SHORT-TERM POWER LOSS

### Relevance

Most of the electricity consumed comes from electric drives (ED) of various technological processes. The most common way to increase the efficiency of an electric drive is the use of a variable frequency drive (VFD). However, the use of VFDs in some cases causes a decrease in the operating efficiency of the electric drive, this is due to the high sensitivity of the frequency converter to network voltage dips, leading to the failure of the inverter and to the stop of the technological process. A current direction is the development of algorithmic methods for increasing the stability of electric drives.

### Aim of research

Increasing the stability of a frequency-controlled motor during emergency conditions in the power supply system. Development of a power supply circuit for an electric drive, and research into the algorithm for operating the inverter in emergency modes.

### Methods

The study of the developed method was carried out in the Matlab Simulink software package.

### Results

A power supply circuit for an electric drive with a synchronized bypass line and a main line with a frequency converter operating according to the developed algorithm is proposed. A study of the influence of the error in measuring the shaft rotation speed on the accuracy of maintaining the recuperation of the DC transformer, as one of the ways to increase the resistance of the VFD to short-term voltage dips in the network was carried out.

### Keywords

variable frequency drive, synchronous motor, control system, speed sensor, frequency starting, STD-8000

**For citation:** Sharipov R. R., Khaydarov I. I. Programmnyi kompleks dlya realizatsii asinkhronnogo chastotnogo puskа vysokovol'tnykh dvigatelei i snizheniya vremeni pereryva v rabote dvigatelya pri kratkovremennoi potere pitaniya [Software Complex for Implementing Asynchronous Frequency Starting of High-Voltage Motors and Reducing Break Time in Motor Operation in the Event of Short-Term Power Loss]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 1, Vol. 20, pp. 141-148 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-1-141-148>.

Большая часть потребляемой электроэнергии приходится на электроприводы (ЭП) различных технологических процессов. Наиболее распространенным способом повышения эффективности работы электропривода является применение частотно-регулируемого привода (ЧРП) [1]. Однако применение ЧРП в ряде случаев вызывает снижение эффективности работы электропривода, связано это с высокой чувствительностью преобразователя частоты (ПЧ) к провалам напряжения сети, приводящим к отказу ПЧ и к остановке технологического процесса. Актуальным направлением является проработка алгоритмических методов повышения устойчивости электроприводов [1–4].

Преобразователь частоты с функцией рекуперации в звено постоянного тока является важным компонентом в системах частотно-регулируемых электроприводов, особенно в контексте повышения устойчивости приводов к кратковременным провалам напряжения в сети. Этот тип преобразователей обладает способностью эффективно управлять энергией, накопленной в инертном нагрузочном моменте, и возвращать ее обратно в электрическую сеть.

Основные принципы работы преобразователя частоты с функцией рекуперации в звено постоянного тока включают следующие.

*Обратное преобразование.* Во время работы электропривода мотор работает как двигатель и потребляет электрическую энергию от преобразователя частоты. Когда нагрузка замедляется или изменяется направление вращения, возникает инертный нагрузочный момент, который может привести к накоплению энергии в системе. Преобразователь частоты с функцией рекуперации способен переключаться в режим обратного преобразования, преобразуя инертную энергию обратно в электрическую энер-

гию и возвращая ее в электрическую сеть.

*Управление мощностью.* Преобразователь должен эффективно управлять процессом рекуперации, чтобы минимизировать потери энергии и обеспечить стабильную работу системы. Это включает в себя контроль напряжения, тока и частоты, а также оптимизацию работы преобразователя в соответствии с потребностями нагрузки.

*Системы управления и защиты.* Преобразователь обычно оснащается специализированными системами управления и защиты, которые обеспечивают правильное переключение между режимами работы, контролируют параметры работы системы и обеспечивают безопасность во время процесса рекуперации.

Применение преобразователей частоты с функцией рекуперации в звено постоянного тока в электроприводах позволяет не только повысить их устойчивость к кратковременным провалам напряжения в сети, но и снизить энергопотребление и повысить эффективность работы системы в целом.

Рекуперация в звено постоянного тока преобразователя частоты — это процесс, при котором энергия, накопленная в инертном нагрузочном моменте, возвращается обратно в электрическую сеть. В контексте устойчивости частотно-регулируемых электроприводов к кратковременным провалам напряжения в сети рекуперация может играть важную роль.

Когда происходит кратковременный провал напряжения в сети, работа ЧРП может быть нарушена из-за потери питания. В таких случаях рекуперация позволяет использовать инертную энергию, накопленную в моменте, чтобы продолжить работу привода или восстановить его после восстановления питания.

Рекуперация осуществляется с помощью технологии обратного преобразова-

ния, когда преобразователь частоты переводит инертную энергию обратно в электрическую энергию и подает ее обратно в сеть. Этот процесс помогает улучшить устойчивость электропривода к кратковременным сбоям в электропитании, так как позволяет сохранить работоспособность привода и предотвратить его выход из строя в случае временных проблем с электропитанием.

Для обеспечения эффективной рекуперации необходимы соответствующие системы управления и защиты, которые позволяют правильно переключать преобразователь между режимами работы и обеспечивать безопасность и стабильность процесса рекуперации. Кроме того, важно учитывать потери энергии и тепловые процессы при проведении рекуперации, чтобы обеспечить оптимальную работу системы и избежать перегрева оборудования.

Для эффективной рекуперации также важно учитывать специфику самой нагрузки и ее потребности в энергии. Например, в случае электроприводов с переменным моментом нагрузки, таких как приводы с механическими системами регулирования скорости, необходимо точно управлять процессом рекуперации, чтобы избежать резких изменений момента и скорости, что может привести к нестабильности или даже повреждению оборудования [5].

Другим важным аспектом является обеспечение согласованности между рекуперацией и другими методами обеспечения устойчивости ЧРП к кратковременным провалам напряжения. Например, кроме рекуперации, система может быть дополнительно оборудована системами буферизации или дополнительными источниками питания, такими как батареи или суперконденсаторы, чтобы обеспечить непрерывность работы в случае сбоев в электропитании [6].

Исследования в области рекуперации в звено постоянного тока преобразователя частоты продолжают с целью совершенствования технологий и методов управления, чтобы обеспечить более эффективное использование энергии и повысить устойчивость электроприводов к различным видам сетевых сбоев. В этой области важна как теоретическая разработка новых методов, так и их практическое внедрение и тестирование на реальных промышленных объектах [7].

Кроме того, существует ряд технических решений, которые могут помочь оптимизировать процесс рекуперации и повысить его эффективность. Например, использование передовых алгоритмов управления и регулирования, таких как модуляция ширины импульсов (PWM), может значительно улучшить точность и эффективность процесса рекуперации.

Также важно учитывать влияние рекуперации на качество электросети и сетевые параметры, такие как гармоники и коэффициент мощности. Поэтому разработка интегрированных систем управления, которые учитывают как потребности привода, так и требования качества электропитания, играет важную роль в обеспечении стабильной работы электроприводов в различных условиях эксплуатации.

Для повышения надежности электропитания при использовании ЧРП в работах [8–13] была предложена схема с системой управления выключателем в байпасной линии, снабженной блоками релейной защиты (РЗ) [14]. В выпускной квалификационной работе рассмотрена Simulink-модель ЧРП с системой управления байпасом и релейной защитой [15] (рисунки 1).

Для создания силовой цепи используются стандартные модули MatLab: генератор (ИП); выключатели ( $Q1$  и  $Q2$ ); преобразователь частоты (ПЧ) с системой управления (СУ ПЧ) и встроенными

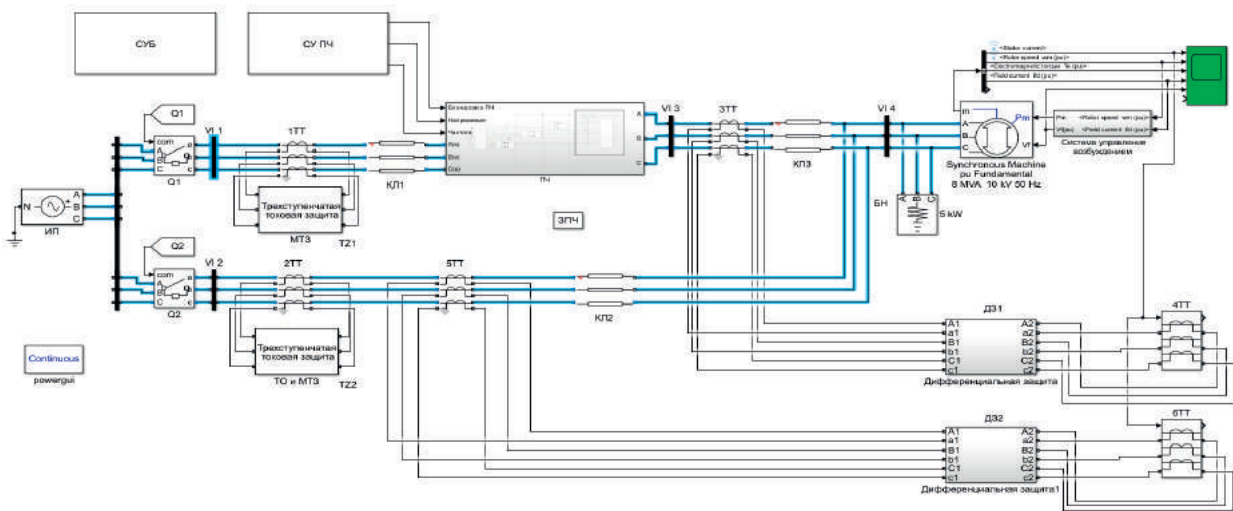


Рисунок 1. Модель ЧРП и схемы электроснабжения с линией байпаса

Figure 1. VFD model and power supply circuits with bypass line

защитами (ЗПЧ); трансформаторы тока (1ТТ — 6ТТ); кабельные линии (КЛ1 — КЛ3); синхронный электродвигатель (СД); блоки создания коротких замыканий (БКЗ1 и БКЗ2); блок нагрузки (БН). Помимо основных элементов силовой цепи на рисунке 1 также представлены модели РЗ: дифференциальные защиты (ДЗ1 и ДЗ2); блоки токовых защит TZ1 и TZ2 (модули «трехступенчатая токовая защита», используются токовая отсечка ТО и максимальная токовая защита МТЗ). В качестве двигателя рассмотрена модель ЭД типа СТД-8000.

В рабочих режимах схема позволяет реализовать частотный пуск двигателя с выходом на рабочий режим, провести исследование работы привода с применением линии байпаса. Кроме того, на базе модели проводились исследования по оценке устойчивости привода кратковременным провалам напряжения.

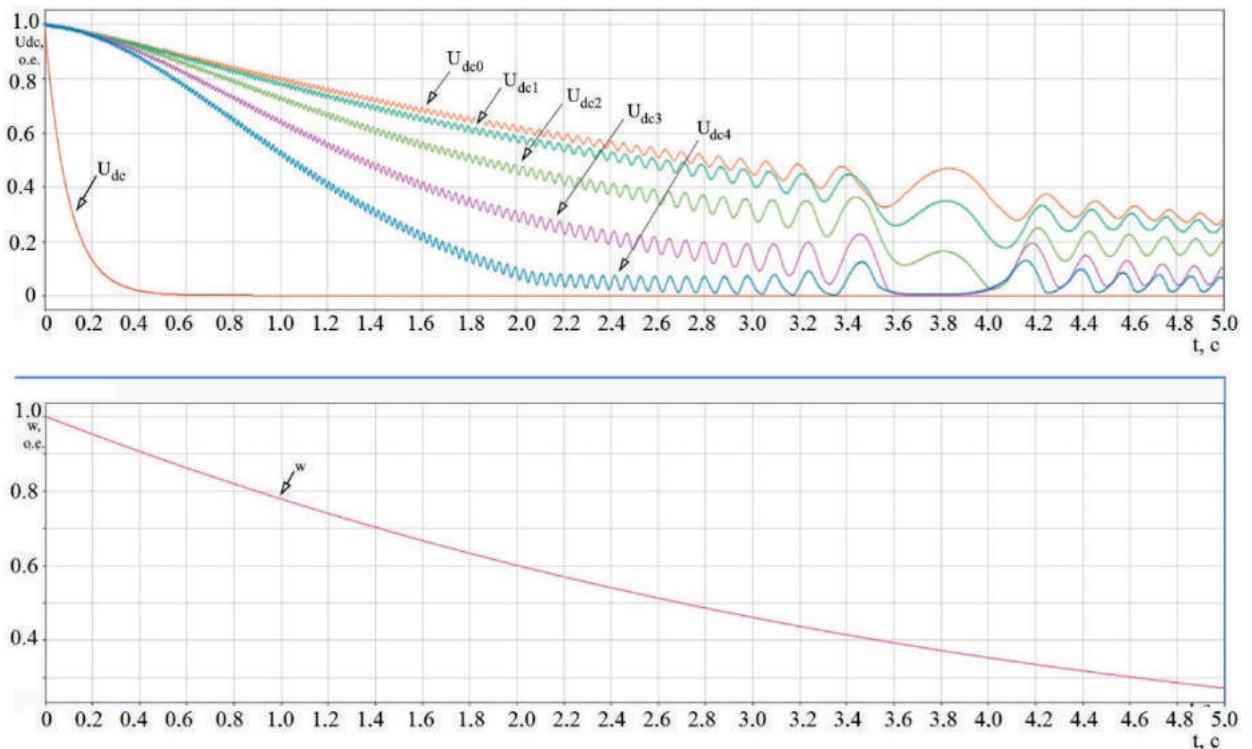
В данной работе на базе предложенной модели проводились моделирование режима рекуперации энергии выпадающего вала в звене постоянного тока (ЗПТ) ПЧ.

Важным аспектом при реализации рекуперации является точность измерения скорости вращения вала ротора. Ниже приведены результаты оценки влияния точности измерения скорости вращения вала на возможности реализации методов рекуперации энергии.

Исследование влияния ошибки измерения частоты вращения вала на точность поддержания рекуперации ЗПТ позволило получить следующие результаты. С возрастанием величины погрешности измерения скорости вращения вала ротора уменьшалось время поддержания напряжения звена постоянного тока выше допустимого уровня. Критическое значение  $U_{dc}$  ( $U_{mindc}$ ) принято на 40 % меньше номинально значения напряжения ЗПТ.

Таким образом, если принять время срабатывания АВР, равным 1 с, а допустимое снижение напряжения ЗПТ 60 % от номинального напряжения, получим, что допустимая погрешность датчика скорости вращения ротора варьируется в пределах 3–4 %. Осциллограммы измерения приведены на рисунке 2.





$w$  — частота вращения ротора;  $U_{dc}$  — напряжения ЗПТ без рекуперации энергии ротора;  $U_{dc0}$  — напряжения ЗПТ с рекуперацией, без погрешности;  $U_{dc1}$  — напряжения ЗПТ с рекуперацией, при погрешности датчика скорости в 1 %;  $U_{dc2}$  — напряжения ЗПТ с рекуперацией, при погрешности датчика скорости в 2 %;  $U_{dc3}$  — напряжения ЗПТ с рекуперацией, при погрешности датчика скорости в 3 %;  $U_{dc4}$  — напряжения ЗПТ с рекуперацией, при погрешности датчика скорости в 4 %

**Рисунок 2.** Осциллограммы напряжения ЗПТ ПЧ и частоты вращения различной погрешности измерения скорости вращения ротора при потере питания

**Figure 2.** Oscillogram of the DC link voltage of the frequency converter and the rotation speed of various errors in measuring the rotor speed during power loss

### Выводы

1. Показано применение исследованных алгоритмов в модели ЧРП на базе разработанной компьютерной модели привода с системой управления, позволяющей смоделировать различные режимы работы системы в динамике.

2. Исследовано влияние погрешности измерения скорости вращения ротора на

длительность поддержания напряжения звена постоянного тока в границе устойчивой работы.

3. Результаты исследования могут быть применены при реализации ЧРП в электроприводах с синхронными электродвигателями с функциями рекуперации энергии в звене постоянного тока.

### Список источников

1. Тарасов Д.В. Исследование схемно-режимных особенностей частотно-регулируемых электроприводов насосных и вентиляторных установок теплостанций: дис. ... канд. техн. наук. М.: Научно-технический центр электроэнергетики, 2010. 194 с.

2. Крылов Ю.А. Разработка энерго-ресурсосберегающих технологий в топливно-энергети-

ческом хозяйстве города на основе современного электропривода: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЭИ, 2008. 295 с.

3. Карандаева О.И. Повышение надежности электроприводов тепловой электростанции металлургического предприятия при внедрении преобразователей частоты: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский государ-

ственный технический университет им. Г.И. Носова, 2011. 172 с.

4. Губайдуллин А.Р. Электроприводы тягодутьевых механизмов с повышенной устойчивостью к нарушениям электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2014. 182 с.

5. Бородин М.Ю., Бородин Е.М., Бортников М.Е. Анализ режимов преобразователей частоты с рекуперацией энергии // Тр. 7-й Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу: в 2-х т. Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. Т. 1. С. 413-417. EDN: ТВJKKZ.

6. Золов П.Д., Поляков Н.А. Моделирование работы активного выпрямителя напряжения в электромеханической системе с двухсторонним обменом энергией // Тр. 7-й Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу: в 2-х т. Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. Т. 1. С. 165-169. EDN: ТВJIXT.

7. Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б. Наблюдатель частоты вращения ротора в скалярной системе управления асинхронного электропривода // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 2 (31). С. 15-19. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-15-19. EDN: WDLEZJ.

8. Шарипов Р.Р., Шабанов В.А. Simulink-модель частотно-регулируемого электропривода с выключателем в байпасной линии // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: Межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). 2018. С. 186-191. EDN: UUMZVA.

9. Шарипов Р.Р., Шабанов В.А. Схема подключения и защиты электродвигателя при питании от преобразователя частоты с выключателем в байпасной линии // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: Межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). 2018. С. 221-225. EDN: XTSFXN.

10. Шарипов Р.Р., Калимгулов А.Р. Условия обеспечения эффективного переключения на питание по линии байпаса на частотно-регулируемом приводе магистрального насоса // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. 2018. С. 244-48. EDN: OWBTJJ.

11. Шарипов Р.Р., Хайдаров И.И. Изменения активного и индуктивного сопротивления двигателя СТД-8000 при пуске // Научные вести. 2018. № 5. С. 389-392. EDN: YQWSUX.

12. Шарипов Р.Р. Вентильно-индукторный регулируемый электропривод // Электропривод,

электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию факультета автоматизации; 18-20 апреля 2019 г. / УГНТУ. Уфа, 2019. С. 50-54.

13. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Шарипов Р.Р. Релейная защита систем электроснабжения. Уфа: УГНТУ, 2020. 74 с. ISBN 978-5-7831-2088-6.

14. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022615458. Программный комплекс для реализации асинхронного частотного пуска высоковольтных двигателей и снижения времени перерыва в работе двигателя при кратковременной потере питания / Р.Р. Шарипов, И.И. Хайдаров. 202261395; дата регистрации 31.03.2022.

## References

1. Tarasov D.V. *Issledovanie skhemno-rezhimnykh osobennostei chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok teplostantsii: dis. kand. tekhn. nauk* [Study of Circuit-Mode Features of Frequency-Controlled Electric Drives of Pumping and Fan Installations of Heating Plants: Dis. Cand. Engin. Sci.]. Moscow, Nauchno-tekhnicheskii tsentr elektroenergetiki, 2010. 194 p. [in Russian].

2. Krylov Yu.A. *Razrabotka energo-resursosbergayushchikh tekhnologii v toplivno-energeticheskom khozyaistve goroda na osnove sovremennogo elektroprivoda: dis. d-ra tekhn. nauk* [Development of Energy-Resource-Saving Technologies in the City's Fuel and Energy Sector Based on a Modern Electric Drive: Dis. Dr. Engin. Sci.]. Moscow, MEI, 2008. 295 p. [in Russian].

3. Karandaeva O.I. *Povyshenie nadezhnosti elektroprivodov teplovoi elektrostantsii metallurgicheskogo predpriyatiya pri vnedrenii preobrazovatelei chastoty: dis. kand. tekhn. nauk* [Increasing the Reliability of Electric Drives of a Thermal Power Plant of a Metallurgical Enterprise When Introducing Frequency Converters: Dis. Cand. Engin. Sci.]. Magnitogorsk, Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova, 2011. 172 p. [in Russian].

4. Gubaidullin A.R. *Elektroprivody tyagodont'nykh mekhanizmov s povyshennoi ustoychivost'yu k narusheniyam elektrosnabzheniya: dis. kand. tekhn. nauk* [Electric Drives of Draft Mechanisms with Increased Resistance to Power Supply Interruptions: Dis. Cand. Engin. Sci.]. Magnitogorsk, Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova, 2014. 182 p. [in Russian].

5. Borodin M.Yu., Borodin E.M., Bortnikov M.E. *Analiz rezhimov preobrazovatelei*

chastoty s rekuperatsiei energii [Analysis of Modes of Frequency Converters with Energy Recovery]. *Trudy 7-i Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu: v 2 t.* [Proceedings of the 7th International Conference on Automated Electric Drive: in 2 vol.]. Saransk, Izd-vo Mordovskogo universiteta, 2014, Vol. 1, pp. 413-417. EDN: TBJKKZ. [in Russian].

6. Zolov P.D., Polyakov N.A. Modelirovanie raboty aktivnogo vypryamitelya napryazheniya v elektromekhanicheskoi sisteme s dvukhstoronnim obmenom energii [Modeling the Operation of an Active Voltage Rectifier in an Electromechanical System with Two-Way Energy Exchange]. *Trudy 7-i Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu: v 2 t.* [Proceedings of the 7th International Conference on Automated Electric Drive: in 2 vol.]. Saransk, Izd-vo Mordovskogo universiteta, 2014, Vol. 1, pp. 165-169. EDN: TBJIXT. [in Russian].

7. Shonin O.B., Novozhilov N.G., Kryl'tsov S.B. Nablyudatel' chastoty vrashcheniya rotora v skalyarnoi sisteme upravleniya asinkhronnogo elektroprivoda [Observer of Rotor Speed in Scalar Control Induction Motor Drive]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2016, No. 2 (31), pp. 15-19. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-15-19. EDN: WDLEZJ. [in Russian].

8. Sharipov R.R., Shabanov V.A. Simulink-model' chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s vyklyuchatelem v baipasnoi linii [Simulink Model of a Variable-Frequency Electric Drive with a Switch in the Bypass Line]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov (s mezhdunarodnym uchastiem) «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Inter-university Collection of Scientific Papers (with International Participation) «Increasing the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. 2018, pp. 186-191. EDN: UUMZVA. [in Russian].

9. Sharipov R.R., Shabanov V.A. Ckhema podklyucheniya i zashchity elektrodvigatelya pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty s vyklyuchatelem v baipasnoi linii [Diagram of Connection and Protection of an Electric Motor when Powered by a Frequency Converter with a Switch in the Bypass Line]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov (s mezhdunarodnym uchastiem) «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of

Scientific Papers (with International Participation) «Increasing the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. 2018, pp. 221-225. EDN: XTSTFXN. [in Russian].

10. Sharipov R.R., Kalimgulov A.R. Usloviya obespecheniya effektivnogo pereklyucheniya na pitanie po linii baipasa na chastotno-reguliruemom privode magistral'nogo nasosa [Conditions for Ensuring Effective Switching to Power Supply via the Bypass Line on a Variable-Frequency Drive of the Main Pump]. *Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov — Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes*, 2018, pp. 244-48. EDN: OWBTJJ. [in Russian].

11. Sharipov R.R., Khaidarov I.I. Izmeneniya aktivnogo i induktivnogo soprotivleniya dvigatelya STD-8000 pri puske [Changes in the Active and Inductive Resistance of the STD-8000 Engine during Startup]. *Nauchnye vesti — Scientific News*, 2018, No. 5, pp. 389-392. EDN: YQWSUX. [in Russian].

12. Sharipov R.R. Ventil'no-induktorni reguliruemyi elektroprivod [Switched Reluctance Controlled Electric Drive]. *Sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii», posvyashchennoi 50-letiyu fakul'teta avtomatizatsii; 18-20 aprelya 2019 g., UGNTU* [Collection of scientific articles of IV International Scientific-Technical Conference «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises», dedicated to 50th Anniversary of the Faculty of Automation; April 18-20, 2019, USPTU]. Ufa, 2019, pp. 50-54. [in Russian].

13. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Sharipov R.R. Releynaya zashchita sistem elektro-snabzheniya [Relay Protection of Power Supply Systems]. Ufa, USPTU, 2020. 74 p. ISBN 978-5-7831-2088-6. [in Russian].

14. Sharipov R.R., Khaidarov I.I. *Programmnyi kompleks dlya realizatsii asinkhronnogo chastotnogo puska vysokovol'tnykh dvigatelei i snizheniya vremeni pereryva v rabote dvigatelya pri kratkovremennoi potere pitaniya* [Software Package for Implementing Asynchronous Frequency Starting of High-Voltage Motors and Reducing the Interruption Time in Engine Operation during Short-Term Power Loss]. Certificate of Registration of a Computer Program No. 2022615458, 2022. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 24.01.2024; одобрена после рецензирования 29.01.2024; принята к публикации 21.02.2024.

The article was submitted 24.01.2024; approved after reviewing 29.01.2024; accepted for publication 21.02.2024.



---

## ОБ АВТОРАХ

### **Белявцев Матвей Владимирович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

### **Варламов Владимир Александрович**

ведущий специалист отдела анализа и персонифицированного учёта медицинской помощи, Территориальный фонд обязательного медицинского страхования Республики Башкортостан, Уфа, Россия

### **Гаврилов Владислав Федорович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

### **Гамисония Гиорги Кахаберович**

аспирант кафедры «Экономика и стратегическое развитие», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Ганичева Лидия Сергеевна**

магистрант факультета инфокоммуникационных технологий (ФИКТ), Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

### **Гизатуллин Фарит Абдулганеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Гирник Андрей Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Томского политехнического университета, Томск, Россия

### **Демин Алексей Юрьевич**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

### **Димукашева Гульназ Ержановна**

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Жеребцов Сергей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

### **Зайцев Евгений Артемович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия



---

**Зайцева Алина Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Закирничная Марина Михайловна**

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Зиннатуллин Вадим Флюрович**

магистрант кафедры информационных технологий и прикладной математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Зыкин Павел Витальевич**

аспирант кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Кильмаков Дмитрий Константинович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Кириллов Роман Вячеславович**

доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Коледин Сергей Николаевич**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий и прикладной математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Коломеец Дмитрий Алексеевич**

магистрант кафедры «Евразийская политехническая школа», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Махиянов Артур Валерьевич**

аспирант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Палладина Яна Александровна**

аспирант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Саттаров Роберт Радикович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Сидоров Сергей Владимирович**

старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

---

**Силин Иван Петрович**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Сираев Фанис Фанилович**

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Соловьев Богдан Алексеевич**

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Сухачев Илья Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Сушков Валерий Валентинович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика», Нижневартковский государственный университет, Нижневартковск, Россия

**Федянин Александр Леонидович**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматизация технологических процессов», Северский технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северск, Россия

**Хазиева Регина Тагировна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Хайдаров Ильдар Ирекович**

ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Хамитов Рустам Нуриманович**

доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники, Омский государственный технический университет, Омск, Россия; профессор кафедры «Электроэнергетика», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Шарипов Рустам Радикович**

старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Belyavtsev Matvey V.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

### **Demin Aleksei Yu.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

### **Dimukasheva Gulnaz Ye.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Fedyanin Alexander L.**

Candidate of Engineering Sciences, Head of Electrical Equipment and Automation of Technological Processes Department, Seversk Technological Institute – Branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhi», Seversk, Russia

### **Gamisonia Giorgi K.**

Postgraduate Student of Economics and Strategic Development Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Ganicheva Lidia S.**

Undergraduate Student of Faculty of Infocommunication Technologies (FIKT), ITMO National Research University, Saint-Petersburg, Russia

### **Gavrilov Vladislav F.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

### **Girnik Andrey S.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electric Power and Electrical Engineering Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

### **Gizatullin Farit A.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Khamitov Rustam N.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia; Professor of Electrical Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

### **Khaydarov Ildar I.**

Assistant of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

---

**Khazieva Regina T.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Kilmakov Dmitriy K.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Kirillov Roman V.**

Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Koledin Sergey N.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Information Technologies and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Kolomeets Dmitry A.**

Undergraduate Student of Department «Eurasian Polytechnic School», Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Makhiyanov Arthur V.**

Postgraduate Student of Automation, Telecommunications and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Palladina Yana A.**

Postgraduate Student of the Department of «Automation, Telecommunication and Metrology», Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, Ufa, Russia

**Sattarov Robert R.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Sharipov Rustam R.**

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Sidorov Sergei V.**

Senior Lecturer of the Department of Electric Power Engineering, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Silin Ivan P.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Siraev Fanis F.**

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia



---

**Solovev Bogdan A.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Sukhachev Ilya S.**

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Sushkov Valery V.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Power Engineering Department, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia

**Varlamov Vladimir A.**

Leading Specialist of the Department of Analysis and Personalized Accounting of Medical Care, Territorial Compulsory Medical Insurance Fund of the Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

**Zaitsev Evgeny A.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Zaitseva Alina A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

**Zakirnichnaya Marina M.**

Doctor of Engineering Sciences, Head of the Department «Automation, Telecommunications and Metrology», Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Zherebtsov Sergey N.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

**Zinnatullin Vadim F.**

Undergraduate Student of Information Technologies and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Zykin Pavel V.**

Postgraduate Student of Electric Power Industry Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

## Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc. (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 10 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без

использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.

11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям,  
отклоняются для доработки**

---

## Requirements for the materials, provided for publication in the journal

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

### Memo to authors

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («» or "").

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

**All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers.** References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

**Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.**