

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 4, т. 19, 2023

# Electrical and data processing facilities and systems

No. 4, Vol. 19, 2023

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

**№ 4, т. 19, 2023**

---

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: 05.02.2024 г. Формат 60×84/8.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 21.27.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 21.

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. 4, Vol. 19, 2023**

---

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 05.02.2024. Paper format 60×84/8.  
Offset printing. 21.27 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 21.

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

---

*Николаев А. А., Ивекеев В. С., Тулупов П. Г., Рыжевол С. С.*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТУРА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ ДЛЯ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ 9

---

*Омельченко Е. Я., Лымарь А. Б.*

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 31

---

*Баширов М. Г., Баширова Э. М., Прокоп Г. С.*

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
УСТАНОВОК НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОВАЛАХ  
НАПРЯЖЕНИЯ 45

---

*Максудов Д. В.*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОЗОНАТОРА СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ 54

---

*Максудов Д. В.*

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА В ОЗОНАТОРЕ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ 65

---

*Пашкин В. В., Шабанов В. А., Ивашкин О. Н.*

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-  
РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ  
КОМПЛЕКСЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА 75

---

*Сорокин А. В., Шабанов В. А.*

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ПРИ ОДНОФАЗНОМ  
ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ПАРАМЕТРЫ АВАРИЙНОГО  
И ДОАВАРИЙНОГО РЕЖИМОВ 84

---

*Петушков М. Ю., Холодилов С. С.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ 95

---

*Зайниев А. В., Шайдуллин В. Ф., Хакимьянов М. И.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОПОРШНЕВЫХ  
АГРЕГАТОВ С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ МЕТОДОМ АНАЛИЗА  
ИЕРАРХИЙ 108

---

*Юсупов Р. А., Горшков Б. М.*

УВЕЛИЧЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 120

---

---

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

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПЕЛЬТЬЕ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 127

---

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

*Баширов М. Г., Баширова Э. М., Усманов М. Ф., Вагапов И. Ф., Кузьмина А. Ф.*

РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА  
«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
И ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ» 137

---

*Сорогин А. С., Хамитов Р. Н., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С.*

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА  
АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В СОСТАВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
СТАНЦИИ 150

---

**Об авторах** 167

---

**Список статей, изданных в 2023 году** 174

---

**Список опечаток в № 3, т. 19, 2023** 181

---

---

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

---

*Nikolaev A. A., Ivekeev V. S., Tulupov P. G., Ryzhevov S. S.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY BETWEEN DIFFERENT MODELS  
OF ELECTRIC CIRCUIT FOR APPLICATION IN ELECTRIC  
ARC FURNACE'S DIGITAL TWIN 9

---

*Omelchenko E. Ya., Lymar A. B.*

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF AN INDUCTION MOTOR  
EQUIPMENT CIRCUIT USING NEURAL NETWORKS 31

---

*Bashirov M. G., Bashirova E. M., Prokop G. S.*

TECHNICAL SOLUTIONS FOR INCREASING THE RELIABILITY  
OF POWER SUPPLY TO PUMPING UNITS OF OIL AND GAS PRODUCTION  
INSTALLATIONS IN THE EVENT OF VOLTAGE DIPS 45

---

*Maksudov D. V.*

METHODOLOGY FOR CALCULATING AN OZONIZER  
WITH A HONEYCOMB STRUCTURE 54

---

*Maksudov D. V.*

INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE FREQUENCY ON THE EFFICIENCY  
OF OZONE FORMATION IN A CELLULAR OZONATOR 65

---

*Pashkin V. V., Shabanov V. A., Ivashkin O. N.*

A METHOD FOR CONTROLLING A FREQUENCY-CONTROLLED DRIVE  
OF THE GAS AIR COOLING APPARATUS WITH TWO-STAGE COOLING 75

---

*Sorokin A. V., Shabanov V. A.*

AN ALGORITHM FOR CALCULATING CAPACITIVE CURRENTS  
IN SINGLE-PHASE EARTH FAULT USING THE PARAMETERS  
OF EMERGENCY AND PRE-EMERGENCY MODES 84

---

*Petushkov M. Yu., Kholodilov S. S.*

DEFINITION OF A DIAGNOSTIC SIGNAL FOR MONITORING PERMANENT  
MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS 95

---

*Zayniev A. V., Shaydullin V. F., Khakimyanov M. I.*

DETERMINING THE RELIABILITY OF ELEMENTS OF GAS PISTON UNITS  
WITH SYNCHRONOUS GENERATORS BY THE METHOD OF HIERARCHY  
ANALYSIS 108

---

*Yusupov R. A., Gorshkov B. M.*

INCREASING THE LOAD CAPACITY OF OPERATED POWER TRANSFORMERS 120

---



---

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

APPLICATION OF PELTIER THERMOELECTRIC MODULE IN COOLING  
AND ELECTRIC POWER GENERATION TECHNOLOGIES

127

---

## **DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS**

---

*Bashirov M. G., Bashirova E. M., Usmanov M. F., Vagapov I. F., Kuzmina A. F.*

EDUCATIONAL AND RESEARCH COMPLEX ON THE DISCIPLINE  
«INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS AND EXPERT SYSTEMS»

137

*Sorogin A. S., Khamitov R. N., Zherebtsov S. N., Ganicheva L. S.*

BATTERY CHARGE AND DISCHARGE MODE CONTROL SYSTEM  
AS PART OF A PHOTOVOLTAIC PLANT

150

**About the Authors**

167

**List of Articles Published in 2023**

174

**List of errata in No. 3, vol. 19, 2023**

181

---

Научная статья

УДК [621.3.015+621.316.94+621.317.757]:621.311.1

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-9-30

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТУРА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ



**Александр Аркадьевич Николаев**

**Aleksandr A. Nikolaev**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия



**Владимир Сергеевич Ивекеев**

**Vladimir S. Ivekeev**

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия



**Платон Гарриевич Тулупов**

**Platon G. Tulupov**

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия



**Сергей Сергеевич Рыжевол**

**Sergey S. Ryzhevov**

аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск, Россия

### Актуальность

В настоящее время происходит стремительное развитие металлургической промышленности, которое требует непрерывного поиска инновационных решений, направленных на обеспечение потребителей качественной металлопродукцией в необходимых объемах. Для достижения данной цели перед современными предприятиями ставится ряд научно-технических задач, к которым относится увеличение энергоэффективности производства. Инновационным инструментом в этом случае является разработка мероприятий по цифровизации производства, предусматривающих внедрение цифровых двойников,

### Ключевые слова

дуговая сталеплавильная печь, цифровой двойник, система управления электрическим режимом, электрическая дуга, гидропривод перемещения электродов, математическое моделирование

позволяющих производить управление режимами сложных технологических комплексов.

Наиболее энергоемким оборудованием на металлургических предприятиях являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Как показывает опыт эксплуатации, системы управления электрическими режимами таких агрегатов не всегда позволяют работать ДСП с оптимальными временными, энергетическими и технологическими показателями, что в свою очередь приводит к повышенным эксплуатационным издержкам, таким как повышенный удельный расход электроэнергии, расход электродов и т.д.

В качестве решения данной проблемы в ряде научных исследований предлагается использование цифрового двойника для динамической адаптации параметров системы управления электрическим режимом ДСП, способного рассчитывать настройки алгоритмов управления с течением плавки таким образом, чтобы на разных стадиях получать оптимальные электрические и технологические режимы, а также оптимальные динамические показатели качества регулирования импеданса вторичного электрического контура ДСП. Одним из важных этапов в данном случае является форма представления электрического контура в теле цифрового двойника, поскольку именно от этого будут зависеть адекватность выходных параметров и точность работы всей системы управления. Исходя из вышесказанного, актуальной задачей становится разработка эффективного способа моделирования электрического контура дуговой печи для применения в цифровом двойнике.

#### **Цель исследования**

Статья посвящена результатам исследований, направленных на применение различных математических моделей электрического контура дуговой сталеплавильной печи для использования в цифровом двойнике.

#### **Методы исследования**

Для обработки экспериментальных данных использовались методы математического моделирования в среде Matlab с приложением Simulink. Все исследования проводились на основе экспериментальных данных, полученных на электросталеплавильных комплексах, функционирующих на отечественных и зарубежных металлургических заводах.

#### **Результаты**

Значимость результатов представленной работы заключается в повышении энергоэффективности функционирования дуговых сталеплавильных печей за счет использования цифрового двойника. Данное решение позволит осуществлять оптимальный выбор ступеней трансформатора, реактора и рабочей кривой для каждой стадии плавки, а также анализировать положение рабочих точек на электрических характеристиках и формировать дополнительные управляющие воздействия для динамической коррекции длин электрических дуг. Приведенные в работе способы представления электрического контура печи в математической модели цифрового двойника позволят производить настройку программы плавки и осуществлять оптимизацию параметров нелинейных регуляторов полных сопротивлений или проводимостей вторичного контура ДСП. Кроме того, возможен анализ и коррекция вспомогательных блоков системы управления — зажигания дуг, контроля тока и коррекции сигналов задания регулятора в функции отклонения напряжения на первичной обмотке печного трансформатора от номинального значения, также могут быть решены задачи, связанные с расчетом матриц уставок полных сопротивлений и прово-

димостей вторичного контура ДСП для всех сочетаний ступеней трансформатора, реактора и всех значений рабочих кривых. Математические модели реализованы в программной среде Matlab с приложением Simulink.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание, проект № FZRU-2023-0008).

**Для цитирования:** Николаев А. А., Ивекеев В. С., Тулупов П. Г., Рыжевол С. С. Сравнительный анализ эффективности различных моделей электрического контура электродуговой печи для использования в цифровом двойнике // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 9-30. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-9-30>.

Original article

## COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY BETWEEN DIFFERENT MODELS OF ELECTRIC CIRCUIT FOR APPLICATION IN ELECTRIC ARC FURNACE'S DIGITAL TWIN

### Relevance

Nowadays the metallurgical industry is rapidly developing, which requires a continuous search for innovative solutions aimed at providing consumers with high-quality metal products in the required volumes. To achieve this goal, modern enterprises are faced with a number of scientific and technical tasks, which include increasing the energy efficiency of production. An innovative tool in this case is the development of methods for the digitalization of production, including implementation of digital twins for the control of complicated technological systems.

The most energy-intensive equipment at metallurgical enterprises is electric arc furnace (EAF). As operating experience shows, control systems for electrical modes of such units do not always allow EAFs to operate with optimal time, energy and technological parameters, which in turn leads to increased operating costs, such as increased specific energy consumption, consumption of electrodes, etc.

As a solution to this problem, a number of scientific studies propose the use of a digital twin for dynamic adaptation of the parameters of the EAF electrical mode control system, capable of calculating the settings of control algorithms during the melting process in such a way as to obtain optimal electrical and technological modes at different stages, as well as optimal dynamic performance quality of impedance regulation on the secondary side of the furnace transformer. One of the important stages in this case is the form of representation of the electrical circuit inside of the digital twin, since the adequacy of the output parameters and the accuracy of the operation of the entire control system will depend on this. Based on the above, an urgent task is to develop an effective method for modeling the electrical circuit of the electric arc furnace for application in a digital twin.

### Aim of research

The paper is devoted to the results of research aimed at the use of various mathematical models of the electrical circuit for application in electric arc furnace's digital twin.

### Keywords

electric arc furnace, digital twin, electric mode control system, electric arc, electrode positioning hydraulic drive, mathematical modeling

### Research methods

To process the experimental data, mathematical modeling methods were used in the Matlab environment with the Simulink application. All studies were carried out on the basis of experimental data obtained at operating equipment at domestic and foreign metallurgical plants.

### Results

The significance of the research results lies in increasing the energy efficiency of arc steel-smelting furnaces through the use of a digital twin. This solution will allow to provide the optimal selection of transformer tap reactor tap and operating curve number for each stage of melting, as well as analyze the position of operating points on the electrical characteristics and generate additional control signals for dynamic correction of the lengths of electric arcs. The methods of electric circuit modeling in digital twins presented in the work allow to configure the melting program and optimize the parameters of nonlinear impedance or conductivity controllers of the secondary side of the EAF's transformer. In addition, it makes possible the analyze and adaptation of the auxiliary blocks in control system — arc ignition, current control and correction of regulator setting signals as a function of the voltage deviation on the primary side of the furnace transformer (relatively to the rated value). Problems associated with calculating matrices of settings for impedances and conductances of the secondary circuit of an EAF for all combinations of transformer taps, reactor taps and all values of operating curves can also be solved. Mathematical models are implemented in the Matlab software environment with the Simulink application.

**Acknowledgments:** The work is carried out within the framework of the government order (Project No. FZRU-2023-0008) of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

**For citation:** Nikolaev A. A., Ivekeev V. S., Tulupov P. G., Ryzhevol S. S. Sravnitel'nyy analiz effektivnosti razlichnykh modeley elektricheskogo kontura elektrodugovoy pechi dlya ispol'zovaniya v tsifrovom dvoynike [Comparative Analysis of Efficiency between Different Models of Electric Circuit for Application in Electric Arc Furnace's Digital Twin]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 9-30 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-9-30>.

### Введение

Неизменной тенденцией развития металлургической отрасли является поиск современных решений, направленных на повышение эффективности и производительности технологических процессов, снижение затрат и улучшение качества выпускаемой продукции. В настоящее время для этих целей применяются инновационные методы, предусматривающие использование компьютерных технологий, интернета, мобильных устройств, обработки больших данных, применение искусственного

интеллекта, входящих в такое направление как цифровизация. Данное направление предполагает использование на предприятиях современных технологий и инноваций для оптимизации производственных процессов, улучшения управления ресурсами и повышения безопасности на рабочем месте. При этом одним из ключевых признаков развития цифровизации является применение цифровых двойников [1, 2].

Одними из самых энергоемких установок в современных сталеплавильных цехах являются дуговые сталеплавиль-

ные печи (ДСП). Опыт работы с этими печами показывает, что эффективность алгоритмов управления их работой напрямую влияет на такие важные экономические показатели, как длительность плавки, расход электроэнергии, расход электродов и т.д. При этом поиск научно обоснованных технических решений, направленных на повышение энергоэффективности, является сложной задачей, поскольку работа ДСП связана со множеством случайных факторов, таких как состав загружаемого металла, начальное распределение металла в печи, напряжение в электросети, условия горения электрических дуг, параметры и режимы работы дополнительного газокислородного оборудования, производимый сортамент и другие. Из-за влияния вышеуказанных факторов оптимальные настройки алгоритма управления электрическим режимом должны меняться в течение плавки, и набор настроек должен автоматически корректироваться согласно текущим технологическим условиям. Самый удобный способ решения этой задачи — использование цифровых двойников. Однако необходимо отметить, что вопрос практической реализации данного подхода на сегодняшний день в научной литературе раскрыт недостаточно полно. В данном случае перед исследователем возникают две задачи: разработка достаточно точной и адекватной математической модели силовой части электрического контура ДСП и разработка энергоэффективных алгоритмов системы управления дуговой сталеплавильной печью с использованием цифрового двойника. Таким образом, данная статья посвящена сравнительному анализу эффективности применения различных моделей электрического контура ДСП для использования в цифровом двойнике.

### **Описание основных принципов работы цифрового двойника на примере ДСП с системой автоматического управления электрическим режимом Q-REG (HI-REG)**

Как уже упоминалось выше, цифровой двойник — это модель, которая в реальном времени принимает данные с объекта, после чего рассчитывает недостающие для анализа параметры и формирует в динамике управляющие воздействия на сам объект. В металлургической промышленности цифровые двойники используются для оптимизации производственных процессов, снижения затрат и повышения качества продукции. Помимо этого, они позволяют проводить эксперименты и испытания без риска для реальных объектов.

Поскольку цифровой двойник упрощенно можно рассматривать как копию реального производственного объекта, то в качестве цифрового двойника ДСП целесообразно рассматривать математическую модель электрического контура печи с системой управления электрическим режимом Q-REG (HI-REG).

На данный момент в научной литературе достаточно полно описан цифровой двойник системы управления ДСП [3], который может быть использован для решения широкого спектра задач. Одним из важнейших научных результатов является решение проблемы завышенного стандартного отклонения токов и мощностей электрических дуг вследствие неоптимального значения результирующего коэффициента усиления контура регулирования адмиттанса. Структурная схема данного цифрового двойника представлена на рисунке 1.

Представленная схема (рисунок 1) включает в себя два блока хранения: БХ1 и БХ2. Первый блок включает в себя параметры силовой части электриче-

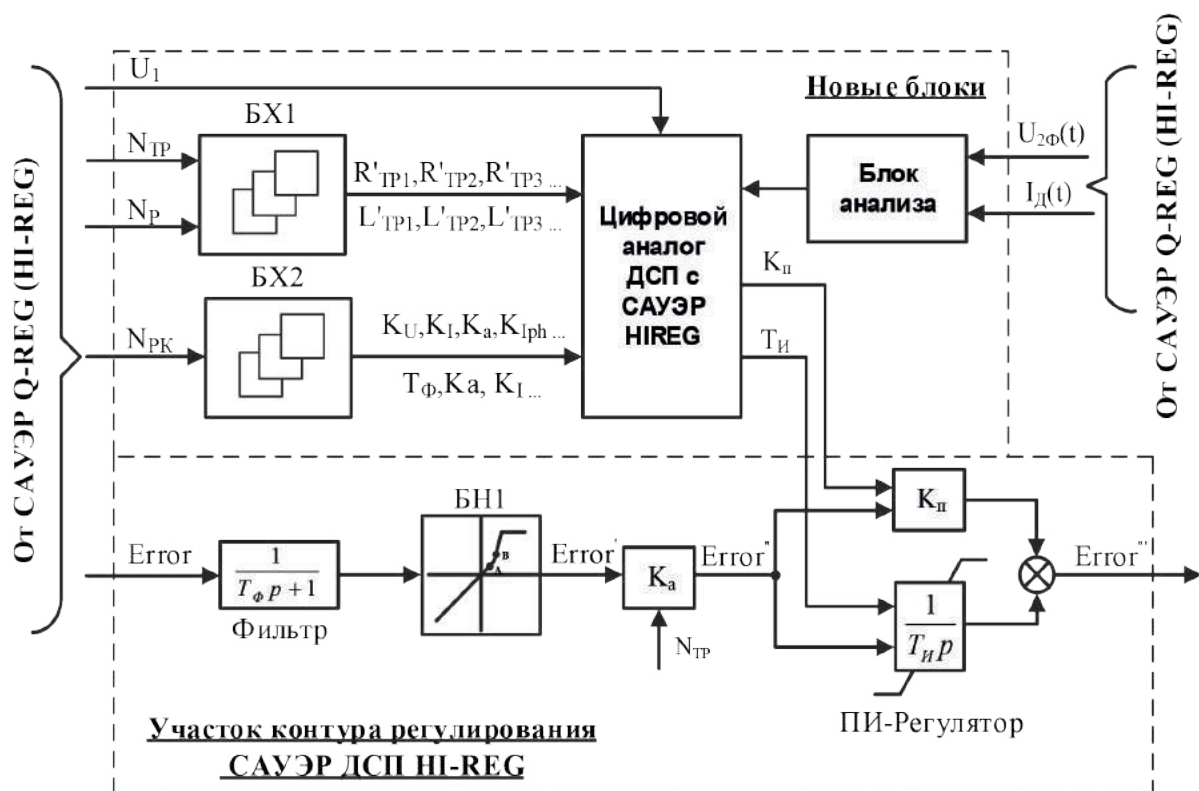


Рисунок 1. Структурная схема цифрового двойника САУЭР ДСП Q-REG (HI-REG)

Figure 1. Structural diagram of the Q-REG (HI-REG) control system digital twin

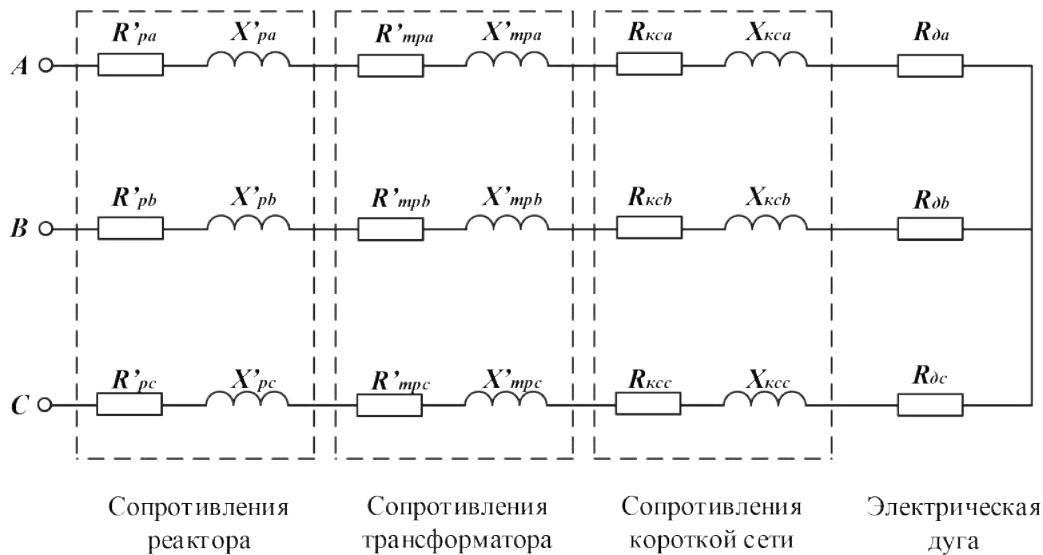
ского контура ДСП, такие как сопротивление обмоток реактора, сопротивление обмоток трансформатора и сопротивление короткой сети.

Блок хранения 2 хранит в себе основные настройки системы HI-REG, такие как значения уставок параметра регулирования, величины постоянных времени фильтров, параметры линеаризующих характеристик и т.д.

От данных блоков сигналы подаются на сам цифровой аналог ДСП, в котором выполняется процедура параметризации в соответствии с фактическими параметрами печи. После проведение автоматической проверки адекватности настройки цифрового аналога система выполняет последовательное моделирование работы при различных сочетаниях коэффициентов усиления пропорциональной части  $K_{II}$  и постоянной времени интегральной части  $T_{II}$  с определенным шагом в рамках ограниченного диапа-

зона. Далее выбирается сочетание  $K_{II}$  и  $T_{II}$ , при котором величины  $S(I_D)$  и  $S(P_D)$  минимальны. Данное сочетание становится активным в регуляторе системы HI-REG непосредственно на объекте, обеспечивая связь с цифровым аналогом.

Отдельное внимание стоит уделить представлению электрического контура ДСП в цифровом аналоге. В данном случае важно обеспечить адекватность и точность отражения реальных физических процессов, а также гибкость для возможности симуляции одновременно возмущающих и управляющих воздействий. Схема замещения данного контура представлена на рисунке 2. Данную задачу необходимо разбить на отдельные подзадачи: представление электрической дуги в математической модели, разработка математической модели гидропривода перемещения электродов и реализация случайных возмущений дуг [4–10].



**Рисунок 2.** Схема замещения электрического контура ДСП, включающая в себя приведенные активные и реактивные сопротивления различных фаз: печного реактора  $R'_{pa}, X'_{pa}$ ; печного трансформатора  $R'_{mpa}, X'_{mpa}$ ; короткой сети  $R'_{кса}, X'_{кса}$ ; сопротивления электрических дуг  $R'_{да}$

**Figure 2.** Equivalent electric circuit diagram for EAF including reduced active and reactive resistances of different phase: reactor  $R'_{ra}, X'_{ra}$ ; furnace transformer  $R'_{tra}, X'_{tra}$ ; short circuit  $R'_{sca}, X'_{sca}$ ; electric arc resistance  $R'_{arca}$

**Анализ различных способов моделирования электрического контура дуговой сталеплавильной печи**

При построении математической модели цифрового двойника дуговой сталеплавильной печи одной из основных задач является представление электрической дуги. На сегодняшний день можно выделить несколько подходов к представлению электрической дуги в математической модели: представление дуги переменным активным сопротивлением [11], представление напряжения дуги постоянным значением ЭДС [12], а также представление дуги нелинейным звеном, описываемым нелинейным дифференциальным уравнением Касси [13]. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки и используется для решения определённых задач.

**1. Представление дуги переменным активным сопротивлением**

Данный способ представления электрической дуги является упрощенным и

применяется для приблизительного расчета характеристик ДСП [11]. Основная идея заключается в том, что весь электрический контур представляется в виде активных и реактивных сопротивлений, а сам дуговой промежуток — в виде переменного активного сопротивления (рисунок 3).

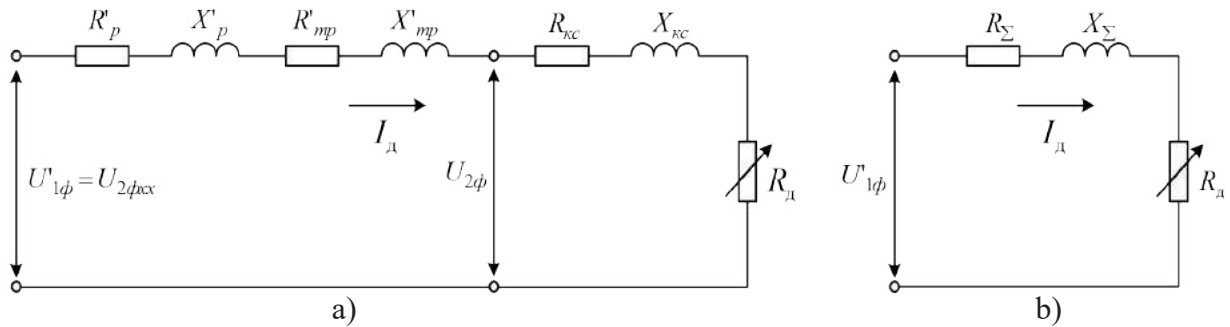
В представленной схеме замещения  $R'_p, R'_{mp}, X'_p, X'_{mp}$  — это активные и реактивные сопротивления печного трансформатора и реактора,  $R_{кс}$  и  $X_{кс}$  — активное и реактивное сопротивления короткой сети, а  $R_d$  — переменное активное сопротивление электрической дуги.

Построив векторную диаграмму (рисунок 4), согласно представленной выше схеме замещения можно получить выражение для напряжения дуги:

$$U_d = \sqrt{U_1^2 - (I_d X_\Sigma)^2} - I_d R_\Sigma, \tag{1}$$

где  $I_d$  — ток дуги;  
 $U_1^2$  — напряжение питающей сети, приведенное к стороне низкого напряжения печного трансформатора.





**Рисунок 3.** Однофазная схема замещения ДСП: исходная (а), упрощенная (б)

**Figure 3.** Equivalent circuit for the one phase of EAF: initial (a), simplified (b)

В соответствии с векторной диаграммой и выражением (1) определяются аналитические выражения (2)–(8) для нахождения зависимостей активной, реактивной и полной мощностей ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ), потребляемых ДСП, мощности дуги  $P_{дr}$ , активных потерь  $\Delta P$ , электрического КПД  $\eta_{эл}$  и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  от действующего значения тока дуги  $I_{дr}$ .

$$P_{дr} = 3U_{дr} I_{дr}; \quad (2)$$

$$\Delta P = 3I_{дr}^2 R_{\Sigma}; \quad (3)$$

$$P = P_{дr} + \Delta P; \quad (4)$$

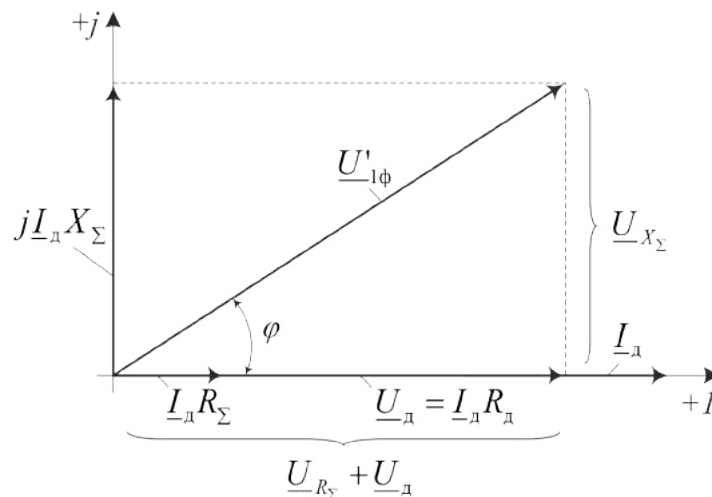
$$S = U'_{1\phi} I_{дr}; \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; \quad (6)$$

$$\chi = P/S; \quad (7)$$

$$\eta_{эл} = P_{дr}/P. \quad (8)$$

Как уже говорилось ранее, данный способ является упрощенным, поскольку предполагает постоянный уровень напряжения на высокой стороне печного трансформатора, стабильный и симметричный характер горения дуги на всех стадиях плавки, а также синусоидальный характер токов и напряжений в электрическом контуре. Данный факт не позволяет учитывать в модели несимметричные режимы работы ДСП, нелинейные свойства дуги и высшие гармоники в токе. В этой связи данный подход не применим в построении модели электри-



**Рисунок 4.** Векторная диаграмма токов и напряжений ДСП для упрощенной схемы замещения и полученное на ее основе выражение напряжения дуги

**Figure 4.** Vector diagram of currents and voltages in EAF for simplified equivalent circuit and resulted formula for the electric arc voltage

ческого контура ДСП для цифрового двойника.

Стоит заметить, что существует еще ряд инженерных подходов к расчету электрического контура ДСП, учитывающих индуктивную составляющую сопротивления электрической дуги (модель Боумана, модель Кёле, модель Селада). По большей части это эмпирические выражения, которые являются весьма ограниченными, поэтому для более точного учёта нелинейных характеристик электрической дуги целесообразно использовать способы, основанные на динамических моделях электрического контура.

2. Представление напряжения дуги за время ее горения постоянным значением  $E_d = const$

Данный способ в отличие от предыдущего позволяет учитывать вентильный эффект дуги и несимметрию токов по фазам [12].

Схема замещения электрического контура ДСП в данном случае будет иметь следующий вид (рисунок 5).

Дуга в данном случае представляется в виде противо-ЭДС:

$$E_d = U_{ak} + \beta \cdot L_d, \quad (9)$$

где  $U_{ak}$  — падение напряжения на приэлектродных областях (для дуговых печей переменного тока  $U_{ak} = 20 \div 40$  В), В;

$\beta$  — градиент напряжения дуги, в зависимости от стадии плавки  $\beta = 1 \div 8$  В/мм;

$L_d$  — длина столба дуги, мм.

Упомянутый выше вентильный эффект возникает на начальных стадиях плавки и проявляется в неодинаковом падении напряжения на дуге в положительный и отрицательный полупериоды тока. Это обусловлено разной интенсивностью процессов ионизации, когда катодом является шихта, а анодом — электрод, и наоборот. Данная модель дуги достаточно удобна в реализации, в ней не используются нелинейные дифференциальные уравнения, однако для учета условий горения дуги на разных стадиях плавки лучше всего подойдет способ, основанный на использовании тепловой постоянной времени дуги.

3. Представление дуги нелинейным звеном, описываемым нелинейным дифференциальным уравнением Касси [13]

Наиболее точным и трудоёмким из представленных выше способов является описание электрической дуги ДСП с использованием нелинейных дифференциальных уравнений. Он позволяет учитывать три основных параметра электрической дуги: мгновенное напряжение на дуге  $u_d(t)$ , противо-ЭДС дуги  $E_d$  и мгновенную проводимость дуги  $g_d(t)$  и записывается в виде формулы:

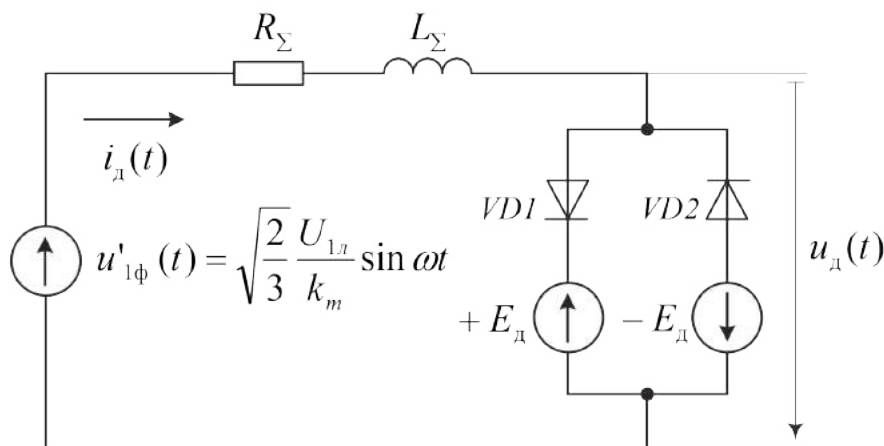


Рисунок 5. Схема замещения дуги по способу С. И. Тельного

Figure 5. Equivalent circuit according to the method of S. I. Telniy

$$\theta_d \frac{dg(t)}{dt} = \left( \frac{u_d^2(t)}{E_d^2} - 1 \right) g(t). \quad (10)$$

Отличительной особенностью представленного уравнения является наличие в нем очень значимого параметра — тепловой постоянной времени  $\theta_d$ . Его использование дает возможность при математическом моделировании учитывать условия горения дуги на различных технологических стадиях плавки.

Для составления математической модели электрического контура ДСП по данному способу записывают систему уравнений для мгновенных значений токов и напряжений:

$$u'_{1\phi} = i_d R_\Sigma + L_\Sigma \frac{di_d}{dt} + u_d, \quad (11)$$

где  $L_\Sigma = X_\Sigma / 2\pi f_c$  — суммарная индуктивность электрического контура ДСП;  $f_c = 50$  Гц — частота питающей сети.

Полученное выражение преобразуется относительно напряжения дуги, а ток дуги — через электрическую проводимость и напряжение дуги:

$$u_d = u'_{1\phi} - i_d R_\Sigma - L_\Sigma \frac{di_d}{dt}; \quad (12)$$

$$i_d = u_d \cdot g_d. \quad (13)$$

Из уравнения Касси выражается мгновенная проводимость:

$$g_{di} = \frac{1}{\theta_d} \int \left( \frac{u_d^2}{E_d^2} g_{di-1} - g_{di-1} \right) dt + g_{d0}, \quad (14)$$

где  $g_{di-1}$  — начальное значение проводимости дуги в момент подачи напряжения.

Используя стандартное преобразование Лапласа  $p = d/dt$ , последние три выражения записываются в операторной форме, и на их основе можно составить структурную схему (рисунок 6).

$$\left. \begin{aligned} u_d(p) &= u'_{1\phi}(p) - i_d(p)R_\Sigma - L_\Sigma i_d(p)p \\ g_d(p) &= \frac{1}{\theta_d p} \left( \frac{u_d^2(p)}{E_d^2} g_d(p) - g_d(p) \right) \\ i_d(p) &= u_d(p)g_d(p) \end{aligned} \right\} .(15)$$

С учетом всех особенностей каждого из вышепредставленных способов был проведен сравнительный анализ (рисунок 7).

На данном графике (рисунок 7): 1 — упрощенное представление дуги переменным активным сопротивлением; 2 — представление дуги в виде противо-ЭДС для одной фазы; 3 — то же, но для трехфазной схемы замещения; 4 — представление дуги уравнением Касси для одной фазы; 5 — то же для трехфазной структурной схемы.

Как показывают результаты анализа, при одном и том же токе дуг значения максимальной мощности отличаются на 15–20 % для двух случаев, наиболее распространенных в практике: 1 — упрощенное представление дуги переменным активным сопротивлением и 5 — трех-

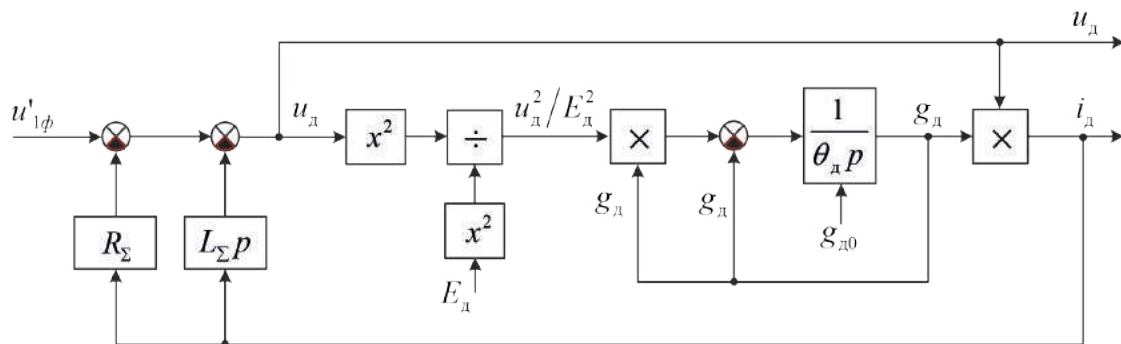
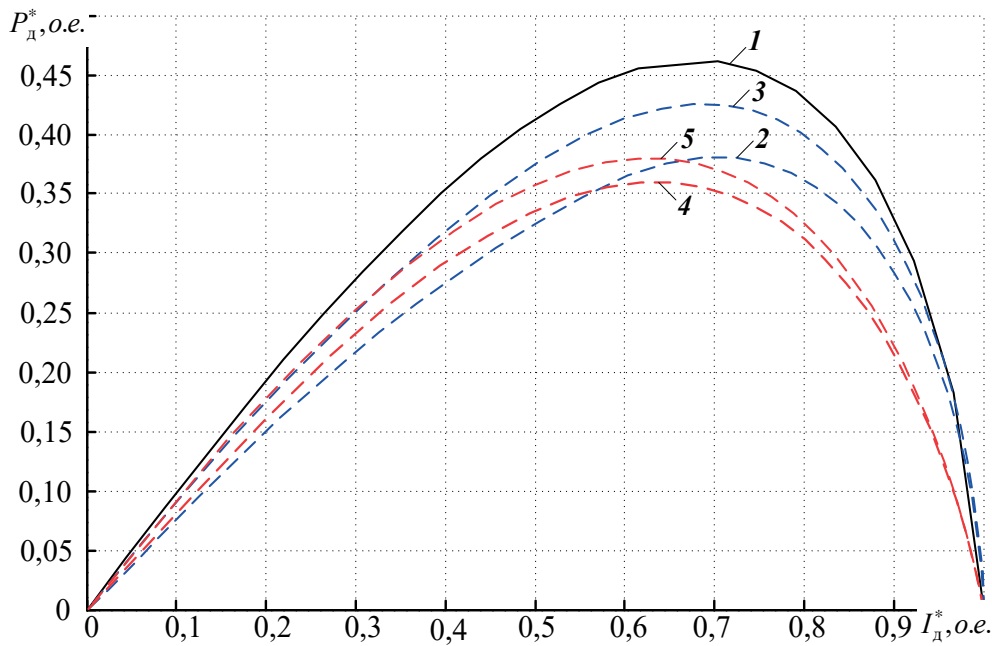


Рисунок 6. Структурная схема одной фазы ДСП на основе уравнения Касси

Figure 6. Structural diagram of the EAF's phase based on Cassie equation



**Рисунок 7.** Электрические характеристики ДСП для различных методик моделирования дуги переменного тока

**Figure 7.** Electrical characteristics of EAF for different methods of alternative current arc modeling

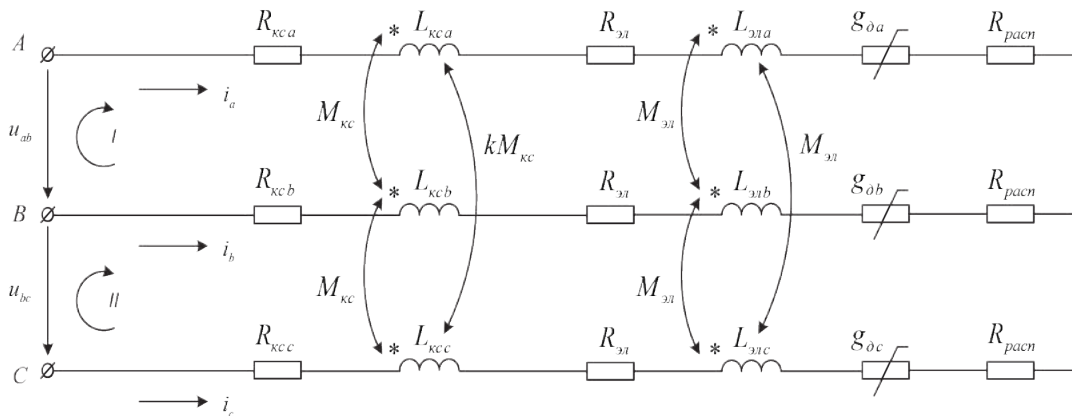
фазная модель дуги на основе уравнения Касси.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что выбор способа моделирования электрической дуги зависит от цели исследования. В случае разработки модели для цифрового двойника наилучшим образом подходит представление дуги через уравнение Касси, поскольку именно этот способ позволяет исследовать несимметричные режимы работы ДСП, анализировать изменение ее энергетических показателей в дина-

мике, оценивать влияние работы печи на показатели качества электроэнергии.

Таким образом, для получения математической модели электрического контура ДСП была составлена уточненная расчетная схема замещения (рисунок 8).

Используя общие законы электротехники, на основе представленной выше схемы замещения можно составить структурную схему электрического контура дуговой сталеплавильной печи (рисунок 9) и систему уравнений:



**Рисунок 8.** Расчетная схема замещения электрического контура ДСП

**Figure 8.** Calculating diagram for the equivalent circuit of EAF

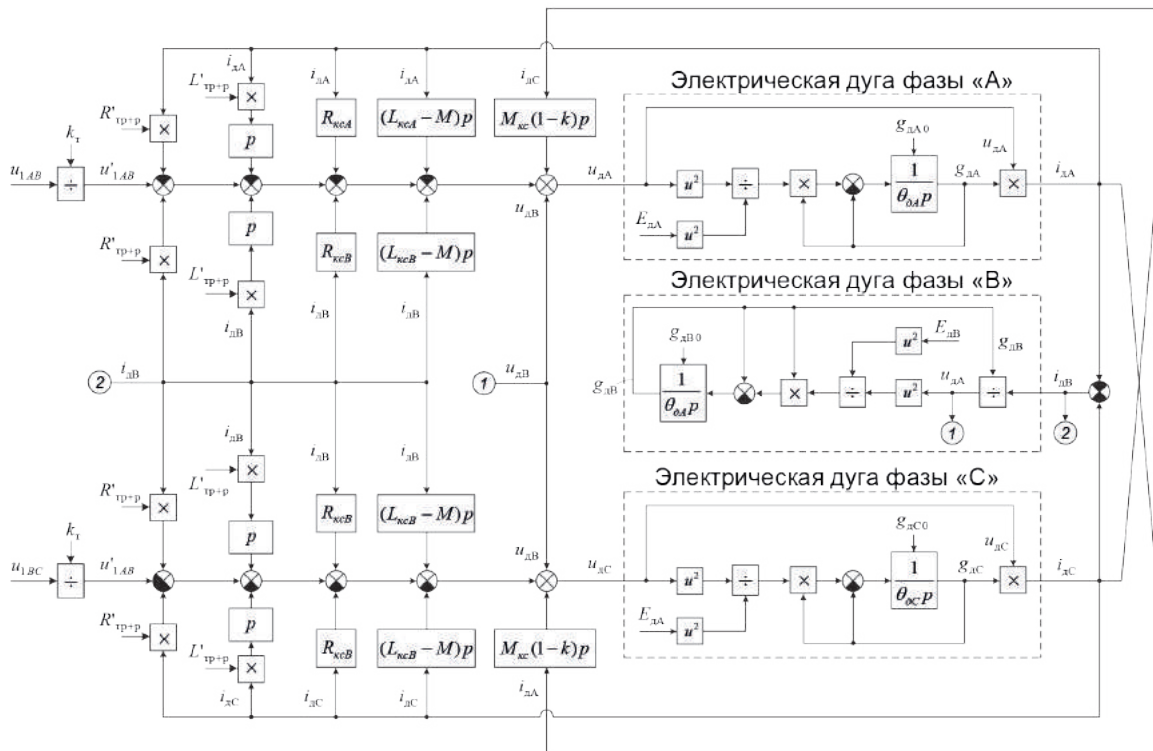


Рисунок 9. Структурная схема электрического контура дуговой сталеплавильной печи

Figure 9. Structural diagram of the EAF's electric circuit

$$\begin{aligned}
 u_{da}(p) &= u_{ab2}(p) - i_{a2}(p)(R_{kca} + R_{эл} + R_{расн}) - \\
 &- i_{a2}(p)p(L_{kca} + L_{эл} - M_{кк} - M_{эл}) + u_{db}(p) + \\
 &+ i_{b2}(p)(R_{kcb} + R_{эл} + R_{расн}) + \\
 &+ i_{b2}(p)p(L_{kcb} + L_{эл} - M_{кк} - M_{эл}) + i_{c2}(p)M_{кк}(1-k)p \\
 u_{dc}(p) &= u_{bc2}(p) + i_{b2}(p)(R_{kcb} + R_{эл} + R_{расн}) + \\
 &+ i_{b2}(p)p(L_{kcb} + L_{эл} - M_{кк} - M_{эл}) + u_{db}(p) - \\
 &- i_{c2}(p)(R_{ккc} + R_{эл} + R_{расн}) - \\
 &- i_{c2}(p)p(L_{ккc} + L_{эл} - M_{кк} - M_{эл}) + i_{a2}(p)M_{кк}(1-k)p \\
 u_{db}(p) &= \frac{i_{b2}(p)}{g_{db}(p)} \\
 i_{a2}(p) &= u_{da}(p) \cdot g_{da}(p) \\
 i_{c2}(p) &= u_{dc}(p) \cdot g_{dc}(p) \\
 i_{b2}(p) &= -i_{a2}(p) - i_{c2}(p) \\
 g_{da}(p) &= \frac{1}{\theta p} \left( \frac{u_{da}^2(p)}{U_{da}^2(p)} g_{da}(p) - g_{da}(p) \right) \\
 g_{db}(p) &= \frac{1}{\theta p} \left( \frac{u_{db}^2(p)}{U_{db}^2(p)} g_{db}(p) - g_{db}(p) \right) \\
 g_{dc}(p) &= \frac{1}{\theta p} \left( \frac{u_{dc}^2(p)}{U_{dc}^2(p)} g_{dc}(p) - g_{dc}(p) \right) \\
 U_{da}(p) &= \alpha_{эла} + I_{da}(p)\beta_{da} \\
 U_{db}(p) &= \alpha_{элб} + I_{db}(p)\beta_{db} \\
 U_{dc}(p) &= \alpha_{элс} + I_{dc}(p)\beta_{dc}
 \end{aligned}
 \quad (16)$$

где  $u_{ab}$  и  $u_{bc}$  — линейные напряжения на вторичной обмотке трансформатора;

$i_a, i_b, i_c$  — линейные токи электрического контура ДСП;

$L_{kca}, L_{kcb}, L_{ккc}$  — собственные индуктивности различных фаз короткой сети ДСП;

$M_{кк}$  — взаимная индуктивность короткой сети между фазами  $a$  и  $b$ ,  $b$  и  $c$ ;

$kM_{кк}$  — взаимная индуктивность короткой сети между фазами  $a$  и  $c$ ;

$R_{kca}, R_{kcb}, R_{ккc}$  — активные сопротивления различных фаз короткой сети ДСП;

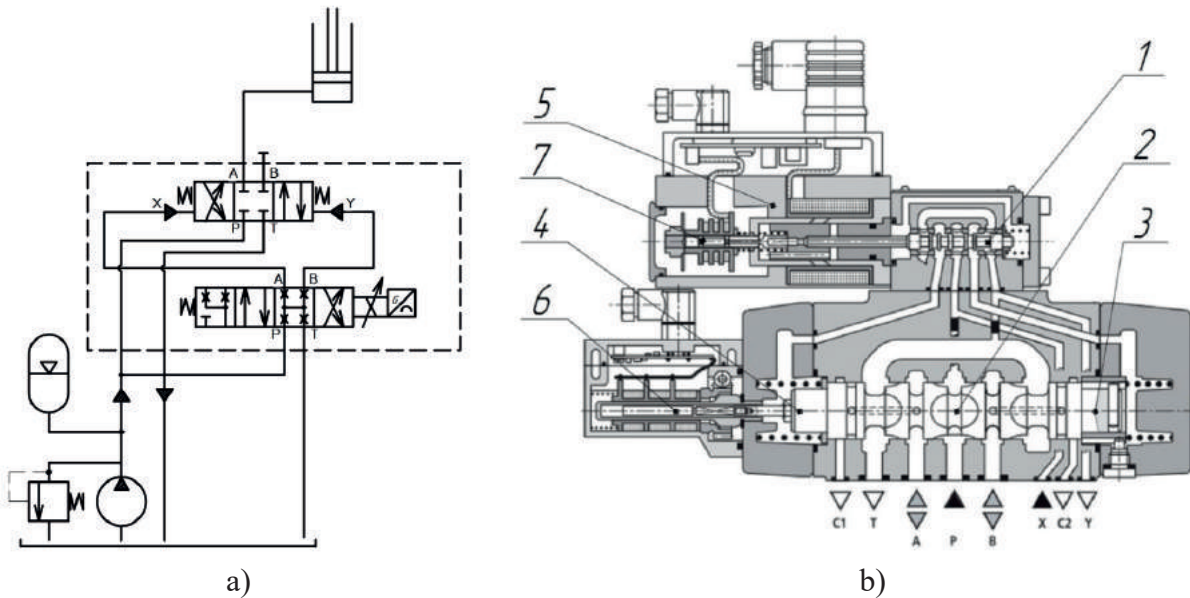
$L_{эл}$  — собственная индуктивность электродов;

$R_{эл}$  — активное сопротивление электродов;

$M_{эл}$  — взаимная индуктивность электродов;

$R_{расн}$  — активное сопротивление расплава;

$u_{da}, u_{db}, u_{dc}$  — напряжения на электрических дугах различных фаз ДСП.



**Рисунок 10.** Гидравлическая схема привода перемещения электродов (а) и схема пропорционального распределителя (b)

**Figure 10.** Hydraulic scheme for electrode movement system (a) and proportional valve scheme (b)

Мгновенные значения линейных токов  $i_a$  и  $i_c$  в системе уравнений будут определяться по известным мгновенным значениям напряжений дуг соответствующих фаз и их мгновенным проводимостям, которые, в свою очередь, записаны по форме уравнения Касси.

**Модель гидропривода перемещения электродов ДСП для использования в цифровом двойнике**

На сегодняшний день существует два типа привода перемещения электродов: электромеханический или гидравлический. Для сверхмощных ДСП используется только гидравлический привод. Рассмотрим пример такого привода (рисунок 10), действующего на производственной площадке ЭСПЦ ПАО «ММК» (г. Магнитогорск).

Работа данного гидропривода основана на применении распределителя с функцией непрямого управления. Структурно данные распределители состоят из двух частей: основного распределителя и распределителя управления.

Основной распределитель управляет положением основного распределителя, а распределитель управления управляет положением основного распределителя.

Управление потоком рабочей жидкости осуществляется с помощью электромагнитного клапана, который управляет распределителем управления. Когда на электромагнитный клапан подается электрический сигнал, распределитель управления меняет свое положение, что приводит к изменению положения основного распределителя и, следовательно, к изменению направления потока рабочей жидкости.

Тот же самый принцип реализован на распределителе, представленном на рисунке 10, b. При отсутствии управляющего сигнала на данном распределителе 1 он находится в нейтральном положении, и давление в областях 3 и 4 одинаковое. Поэтому основной распределитель 2 тоже находится в нейтральном положении. При подаче управляющего сигнала на распределитель 1 его золотник меняет свое положение. Путем изменения величины данного сигнала произ-

ходит изменение направления потока рабочей жидкости.

Учитывая все особенности функционирования данного гидропривода, была получена структурная схема управления гидроприводом перемещения электродов (рисунок 11).

Представленная структурная схема сформирована с учетом следующих допущений:

- сервоклапан упрощенно принимается однокаскадным;
- не учитываются волновые процессы в трубопроводе между аккумулятором, сервоклапаном и гидроцилиндром;
- не учитываются нелинейные характеристики сервоклапана;
- зоной нечувствительности сервоклапана пренебрегаем;
- не учитывается сухое трение в механических элементах;
- давление в трубопроводе постоянно;
- объем поршневой полости постоянен.

С учетом принятых допущений математическая модель гидропривода описывается тремя линейризованными дифференциальными уравнениями, записанными в операторной форме (17). Первым уравнением является уравнение расхода жидкости в гидроприводе, вторым — линейризованное уравнение сервокла-

пана, третьим — уравнение усилий механических элементов гидропривода:

$$\left. \begin{aligned} Q'(p) &= \frac{Q'(u_y(p))}{T_{ск} p + 1} \\ P_r(p) &= \frac{1/k_y (Q'(p) - S_{II}(p) S_r(p))}{(V_m/k_y) p + 1} \\ S_{II}(p) &= \frac{1/b (P_r(p) S_r - Q'(p))}{p \left( \frac{m_{\Sigma}}{b} p + 1 \right)} \end{aligned} \right\} (17)$$

В данной системе уравнений (17):  $Q'$  — фактический расход рабочей жидкости;  $P_r$  — давление в поршневой полости;  $P_{ск}$  — постоянная времени сервоклапана;  $u_y$  — напряжение управления;  $S_r$  — площадь поршня гидроцилиндра;  $S_{II}$  — положение поршня гидроцилиндра;  $m_{\Sigma}$  — суммарная масса электрода, поршневого элемента, а также масса жидкости в трубопроводе от аккумулятора до гидроцилиндра, приведенная к площади поршня;  $b$  — коэффициент вязкого трения, определяющий величину силы трения, пропорциональной скорости перемещения поршня гидроцилиндра и возникающий между стенками гидроцилиндра и поршнем.

Однако в большинстве случаев на практике возможно получить экспериментальную статическую характеристику гидропривода перемещения электродов  $V_{эл} = f(u_y)$ . В этом случае сигнал

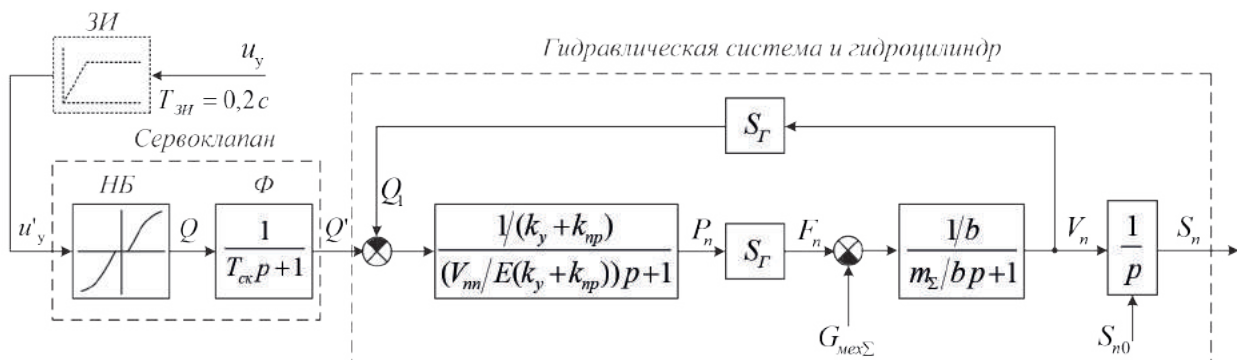


Рисунок 11. Структурная схема гидропривода перемещения электродов ДСП

Figure 11. Structural diagram of the electrode moving hydraulic drive

фактического положения электродов дифференцируется с целью получения параметра  $V_{эл}(t)$  (рисунок 12).

В данном случае за счет использования аperiodических звеньев первого порядка можно учитывать инерционные свойства сервоклапана и гидроцилиндра, а также с помощью интегрирующего звена осуществлять преобразование скорости электрода  $V_{эл}$  в его перемещение  $S_{эл}$ .

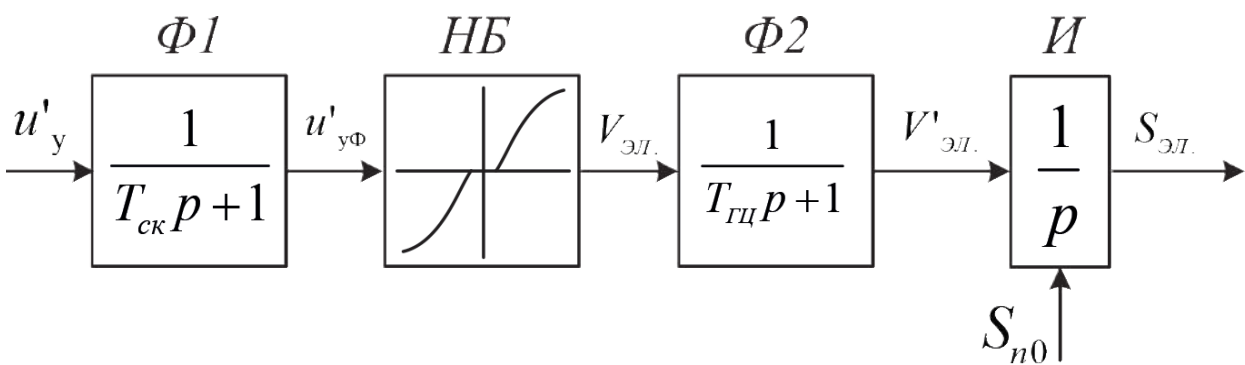
Данный подход существенно упрощает задачу математического моделирования гидропривода и обеспечивает приемлемую точность расчетов при исследовании систем автоматического управления перемещением электродов.

**Реализация случайных возмущений дуг для использования в цифровом двойнике ДСП**

Для корректного функционирования цифровой модели системы управления электрическим режимом ДСП необходимо достаточно точно воспроизводить случайные возмущения токов дуг, которые в реальном объекте значительно меняются в зависимости от стадии плавки. Для этого была создана методика [14, 15], которая описывает колебания токов электрических дуг на основе статистических данных, полученных в ходе

экспериментов, проведенных на действующих электросталеплавильных комплексах. Суть данной методики заключается в следующем: данные, полученные в ходе экспериментов, подвергаются статистическому анализу, в ходе которого получают корреляционные функции и соответствующие им функции спектральной плотности. Результаты данного анализа позволяют адекватно задавать характер возмущения токов ДСП на математической модели, используя известную в теории автоматического управления «задачу о формирующем фильтре».

Как известно, вероятностные методы анализа применяются для эргодических процессов, т.е. процессов, в которых все значения на протяжении достаточно долгого времени будут близки к средним значениям, т.е. появляться с одинаковой частотой. В рамках исследований ДСП это условие выполняется только на определенных стадиях плавки, с одними и теми же значениями ступеней трансформатора и реактора, а также уставками регуляторов импеданса. С целью получения передаточной функции формирующего фильтра для каждой такой стадии выполняется определенный алгоритм, состоящий из трех основных действий: подготовка массива действующих



**Рисунок 12.** Упрощенная модель гидропривода перемещения электрода

**Figure 12.** Simplificated model of the electrode moving hydraulic drive



значений токов дуг; расчет основных статистических характеристик и параметров, характеризующих случайный процесс колебания токов дуг; определение передаточной функции формирующего фильтра.

*Подготовка массива действующих значений токов дуг*

Массив экспериментальных данных, содержащий информацию о мгновенных значениях токов дуг ДСП за весь цикл плавки, разбивают на временные участки. Для этих участков рассчитываются кривые действующих значений токов по следующей формуле:

$$I_d[i(t)] = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t i^2(t) dt}, \quad (18)$$

где  $I_d(t)$  — искомое действующее значение тока одной фазы ДСП;

$i_d(t)$  — мгновенное значение тока.

Далее осуществляются определение длительности реализации  $T_p$  и выбор шага квантования  $\Delta t$ . Затем производится выбор стационарных участков кривых  $I_{дА,В,С}(t)$  для каждой стадии плавки с учетом времени реализации  $T_p$ , на которых среднее значение кривой  $I_d(t)$  имеет постоянную величину.

*Расчет основных статистических характеристик и параметров, характеризующих случайный процесс колебания токов дуг*

На основе полученного массива данных рассчитываются значения средне-статистического тока для каждой фазы по следующей формуле:

$$\bar{I}_d = m_{I_d}^* = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} I_d(t) dt; \quad (19)$$

$$\bar{I}_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i. \quad (20)$$

Определяется дисперсия токов:

$$D_{I_d}^* = \sigma_T^{*2} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} (I_d(t) - \bar{I}_d)^2 dt; \quad (21)$$

$$D_{I_d}^* = \sigma_T^{*2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{di} - \bar{I}_d)^2. \quad (22)$$

Находится статистическая автокорреляционная функция случайных колебаний токов ДСП:

$$R_I^*(\tau) = \frac{1}{T_p - \tau} \int_0^{T_p - \tau} (I_d(t) - \bar{I}_d) \times (I_d(t + \tau) - \bar{I}_d) dt; \quad (23)$$

$$R_I^*(\tau) = R_I^*(m\Delta t) = \frac{1}{n - m} \sum_{i=1}^{n-m} (I_i - \bar{I})(I_{i+m} - \bar{I}). \quad (24)$$

После проведения проверки на соблюдение эргодичности с помощью преобразования Фурье определяется функция спектральной плотности:

$$S_{I_d}^*(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R_I^*(\tau) \cos \omega \tau d\tau; \quad (25)$$

$$S_{I_d}^*(\omega_i) = \frac{\Delta t}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} R_{I_d}^*(m\Delta t) \cos \omega_i m\Delta t, \quad (26)$$

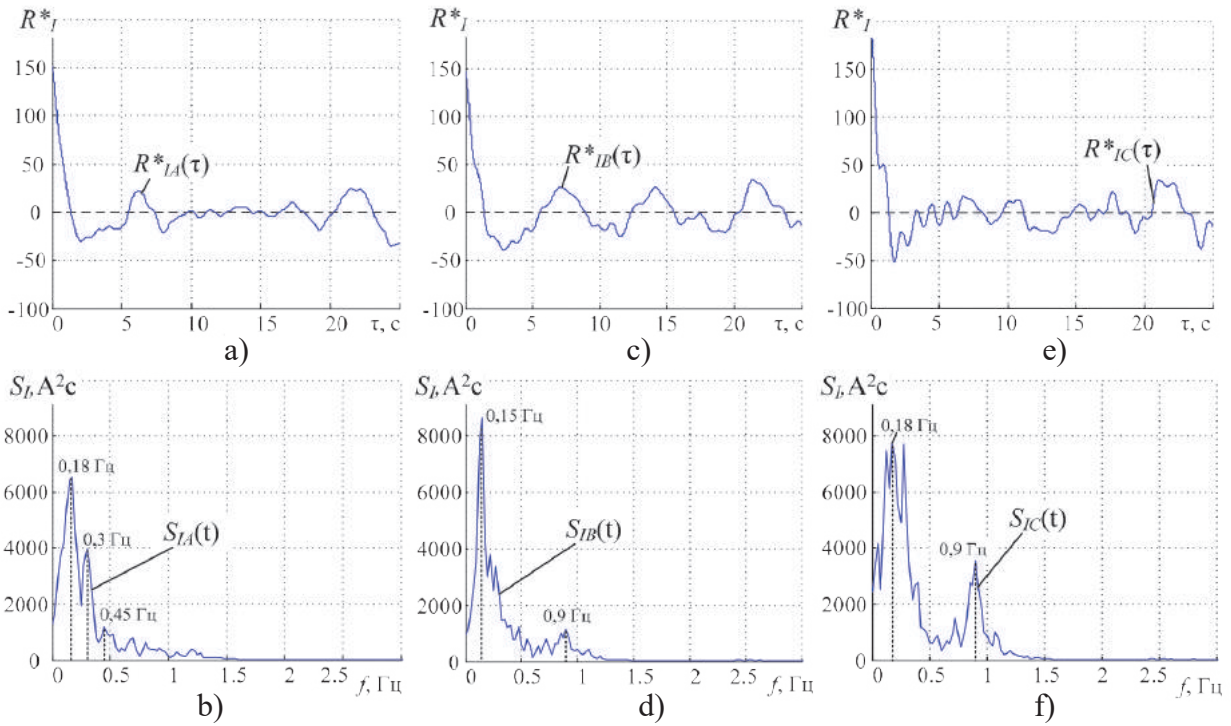
где  $\omega_i = 2\pi\tau / m_{\max} \Delta t$  ( $i = 1, 2, \dots, m_{\max}$ );  $m_{\max} = 0,2 \div 0,25n$ .

*Определение передаточной функции формирующего фильтра*

Следующим этапом данного алгоритма является получение автокорреляционных функций и функций спектральной плотности, включающих в себя информацию о частотном спектре случайных колебаний токов (рисунки 13, 14).

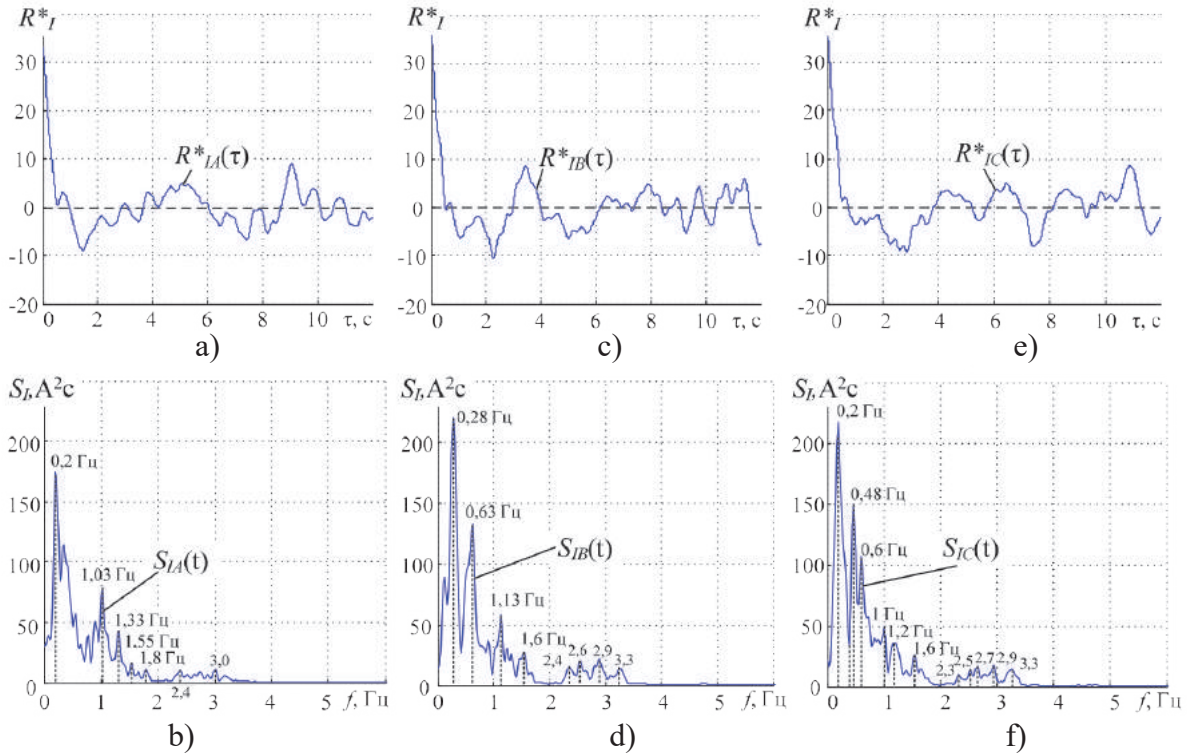
Используя специализированные формирующие фильтры совместно с генератором белого шума, были разработаны блоки формирования случайных возмущений (рисунок 15).

Анализ автокорреляционных функций и функций спектральной плотности



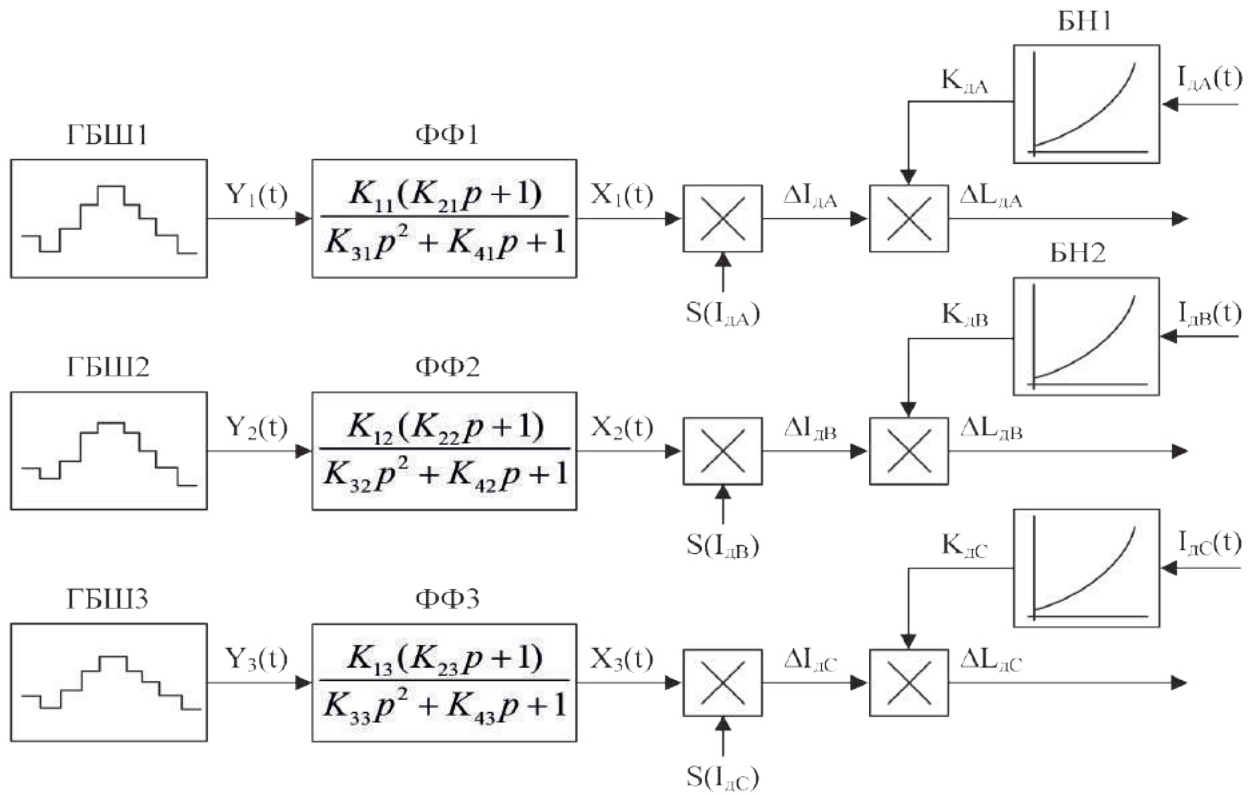
**Рисунок 13.** Автокорреляционные функции и спектральные плотности колебаний токов ДСП для нестабильного режима горения дуг

**Figure 13.** Autocorrelation functions and spectral densities of arc currents of EAF in unstable mode



**Рисунок 14.** Автокорреляционные функции и спектральные плотности колебаний токов ДСП для стабильного горения дуг

**Figure 14.** Autocorrelation functions and spectral densities of arc currents of EAF in stable mode



**Рисунок 15.** Функциональная схема блока формирования случайных возмущений дуг

**Figure 15.** Functional diagram of the electric arc length random disturbances generation block

колебаний токов ДСП-120 позволяет получить результирующую передаточную функцию формирующего фильтра:

$$\begin{aligned}
 H(p) = & H_1(p) + H_2(p) + H_3(p) = \frac{\omega_{n1}^2}{p^2 + 2\xi_1\omega_{n1}p + \omega_{n1}^2} + \\
 & + \frac{2\xi_2\omega_{n2}p}{p^2 + 2\xi_2\omega_{n2}p + \omega_{n2}^2} + \frac{2\xi_3\omega_{n3}p}{p^2 + 2\xi_3\omega_{n3}p + \omega_{n3}^2} = \\
 & \frac{1,2792}{p^2 + 0,5655p + 1,2791} + \frac{0,377p}{p^2 + 0,377p + 3,5531} + \\
 & + \frac{0,5655}{p^2 + 0,5655p + 2,8274},
 \end{aligned}$$

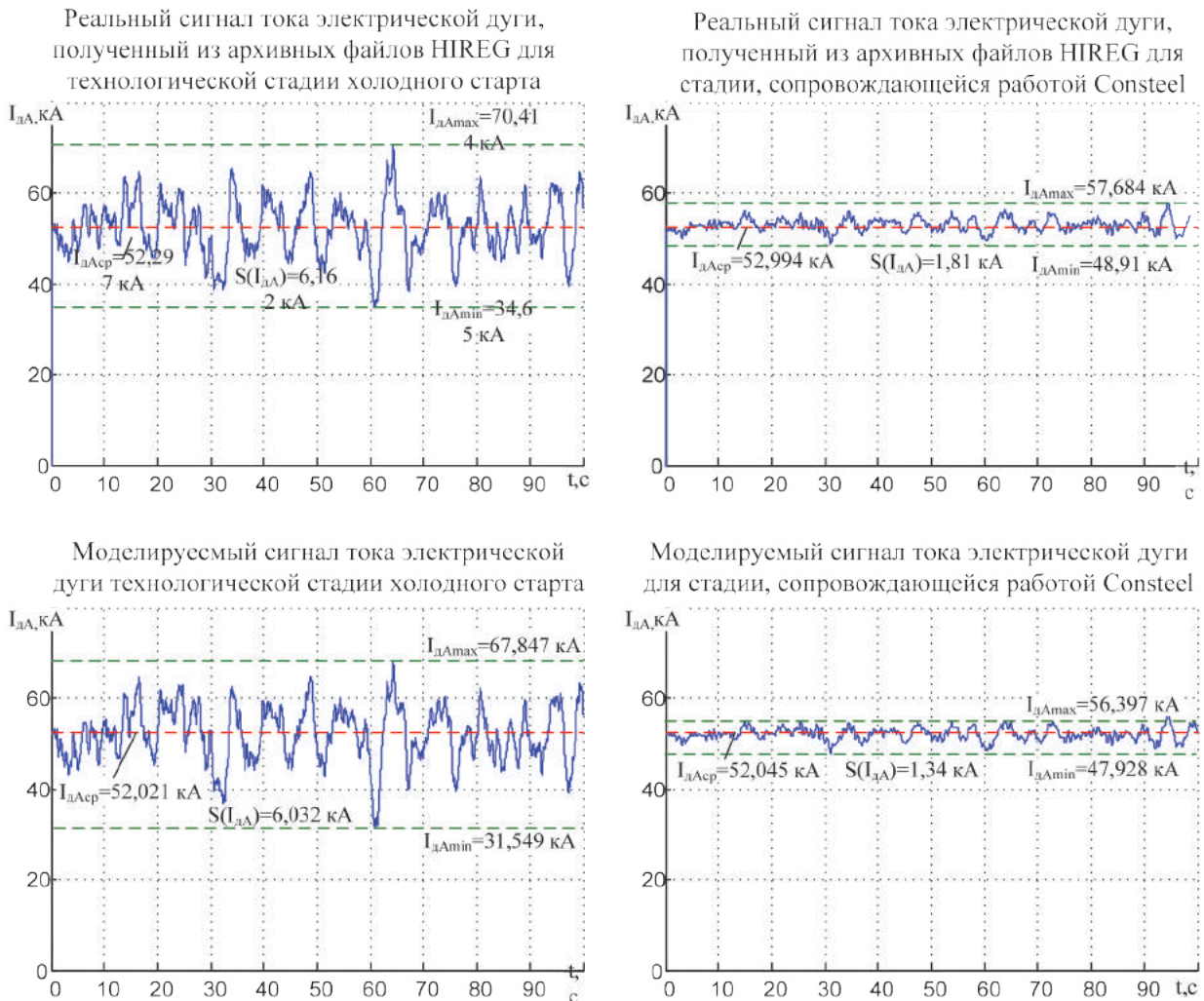
где  $\omega_{n1} = 1,131$  рад/с,  $\omega_{n2} = 1,885$  рад/с,  $\omega_{n3} = 2,8274$  рад/с — собственные частоты;  $\xi_1 = 0,25$ ,  $\xi_2 = 0,1$ ,  $\xi_3 = 0,1$  — коэффициенты демпфирования колебаний.

С помощью полученной функциональной схемы формирования случайных возмущений на математической модели был выполнен сравнительный анализ графиков изменения фактических значений адмитанса, тока и мощности

дуг (рисунок 16) для двух фрагментов плавок. Анализ статистических характеристик сигналов показал адекватность математической модели случайных возмущений в ДСП.

## Выводы

1. Применение цифровых двойников в металлургии позволяет решать большое количество производственных задач. Одним из значимых результатов от внедрения таких двойников является оптимальное и энергоэффективное управление производственными процессами. Данное направление имеет особую актуальность для таких энергоемких объектов, как дуговая сталеплавильная печь. Неотъемлемыми частями цифрового двойника ДСП является математическая модель электрического контура ДСП и системы управления перемещением электродов.



**Рисунок 16.** Анализ адекватности разработанной математической модели системы управления положением электродов ДСП с реализацией системы формирования случайных колебаний длин дуг

**Figure 16.** Adequacy analysis for the designed EAF’s electrode control system with system of random disturbances generation for arc length

2. Модель электрического контура цифрового двойника ДСП основана на математическом описании основных компонентов силового электрооборудования ДСП с использованием дифференциальных уравнений, в том числе нелинейного уравнения проводимости электрической дуги Касси. Доказано, что для цифрового двойника уравнение Касси является самым приемлемым вариантом, поскольку учитывает нелинейные свойства дуги, несимметричные режимы работы ДСП, позволяет анализировать изменение энергетических показателей в динамике и оценивать влияние работы

печи на показатели качества электроэнергии.

3. Представлена модель электрического контура ДСП, которая включает в себя: 1) печной трансформатор и реактор с учетом магнитной системы, а также регулятор переключения витков под нагрузкой (РПН); 2) короткую сеть с учетом взаимной индукции между фазами; 3) электрические дуги, описанные нелинейным дифференциальным уравнением Касси с изменяемой тепловой постоянной времени дуги в зависимости от стадий плавки.

4. Описана модель гидропривода перемещения электродов ДСП, основанного на применении распределителя с функцией непрямого управления. Приведен упрощенный способ моделирования данного гидропривода, который за счет использования аperiodических звеньев первого порядка позволяет учитывать инерционные свойства сервоклапана и гидроцилиндра, а также с помощью интегрирующего звена осуществлять преобразование скорости электрода в его перемещение.

5. Приведен способ реализации случайных колебаний токов дуг, основанный на использовании аппарата математической статистики и теории автоматического управления. Предложена мето-

дика математического описания случайных колебаний токов дуг с использованием характеристик спектральной плотности, полученных для основных стадий плавки, и соответствующих им формирующих фильтров. Сигнал с генератора белого шума с линейной спектральной характеристикой проходит через формирующий фильтр, умножается на рассчитанное значение стандартного отклонения и складывается с математическим ожиданием тока. После дополнительного преобразования получается сигнал случайного изменения длины дуги, который может быть использован в модели цифрового двойника ДСП.

#### Список источников

1. Радионов А.А., Карандаев А.С., Логинов Б.М., Гасиярова О.А. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 1. С. 54–68. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68. EDN: LCGJNZ.

2. Xiang F., Zhi Z., Jiang G. Digital Twins Technology and Its Data Fusion in Iron and Steel Product Life Cycle // 2018 IEEE 15th International Conference on Networking. Sensing and Control (ICNSC). Zhuhai, China. 2018. P. 1–5. DOI:10.1109/ICNSC.2018.8361293.

3. Николаев А.А., Дема Р.Р., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С. Разработка алгоритма энергоэффективного управления дуговой сталеплавильной печи с использованием цифрового двойника // Черные металлы. 2023. № 8. С. 4–12. DOI: 10.17580/chm.2023.08.01. EDN: RMNHHH.

4. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and Control of the Electrical Energy Conversion in Arc Furnaces) / Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998. 234 p.

5. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. Verlag Stahleisen GmbH., Düsseldorf, 2009. 245 p.

6. Köhle S. Ersatzschaltbilder und Modelle für die elektrischen Größen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Equivalent Circuit Diagrams and Models for the Electrical Parameters of AC Arc Furnaces) / Habilitationsschrift, Fachbereich Elektrotechnik, Bergische Universität — Gesamthochschule Wuppertal, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1990. P. 234–239.

7. Köhle S.D Lichtbogenreaktanzen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Arc Reactances of AC Arc Furnace) // Elektrowärme International. 1993. 51, B4. P. 175–185.

8. Klimas M., Grabowski D. Application of the Deterministic Chaos in AC Electric Arc Furnace Modeling // 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Prague, Czech Republic, 2022. P. 1–6. DOI:10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854594.

9. Xu R., Ma S., Zhang M. Modeling of Electric Arc Furnace for Power Quality Analysis // 2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Wuhan, China, 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/CIYCEE55749.2022.9958980.

10. Balouji E., Salor Ö., McKelvey T. Deep Learning Based Predictive Compensation of Flicker, Voltage Dips, Harmonics and Interharmonics in Electric Arc Furnaces // IEEE Transactions on Industry Applications. 2022. Vol. 58. No. 3. P. 4214–4224. DOI: 10.1109/TIA.2022.3160135.

11. Свенчанский А.Д., Жердев И.Т., Кручинин А.М. и др. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / Под ред. А.Д. Свенчанского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.

12. Тельный С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной // Электричество. 1954. № 12. С. 38–42.

13. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New Theory of Breaker Arcs and Circuit Rigidity). CIGRE. 1939. Report No. 102.

14. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Методика моделирования случайных возмущений длин электрических дуг для оптимальной настройки нелинейного П-регулятора импеданса // Чёрные металлы. 2021. № 11. С. 74–80. DOI: 10.17580/chm.2021.11.13. EDN: ERKJEU.

15. Николаев А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2015. 161 с.

## References

1. Radionov A.A., Karandayev A.S., Loginov B.M., Gasiyarova O.A. Kontseptual'nyye napravleniya sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov elektrotekhnicheskikh sistem agregatov prokatnogo proizvodstva [Conceptual Directions of Creating Digital Twins for Electrotechnical Systems of Rolling Mill Facilities]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika — Russian Electromechanics*, 2021, Vol. 64, No. 1, pp. 54–68. doi: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68. EDN: LCGJNZ. [in Russian].

2. Xiang F., Zhi Z., Jiang G. Digital Twins Technology and Its Data Fusion in Iron and Steel Product Life Cycle. *2018 IEEE 15th International Conference on Networking. Sensing and Control (ICNSC)*. Zhuhai, China. 2018. P. 1–5. doi:10.1109/ICNSC.2018.8361293.

3. Nikolayev A.A., Dema R.R., Tulupov P.G., Ryzhev S.S. Razrabotka algoritma energoeffektivnogo upravleniya dugovoy staleplavil'noy pechi s ispol'zovaniyem tsifrovogo dvoynika [Development of an Energy-Efficient Control Algorithm for an EAF Using a Digital Twin]. *Chernyye metally — Ferrous Metals*, 2023, No. 8, pp. 4–12. doi: 10.17580/chm.2023.08.01. EDN: RMNHHH. [in Russian].

4. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen

(Modeling and Control of the Electrical Energy Conversion in Arc Furnaces) / Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998. 234 p.

5. Bowman B., Krüger K. *Arc Furnace Physics*. Verlag Stahleisen GmbH., Düsseldorf, 2009. 245 p.

6. Köhle S. Ersatzschaltbilder und Modelle für die elektrischen Größen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Equivalent Circuit Diagrams and Models for the Electrical Parameters of AC Arc Furnaces) / Habilitationsschrift, Fachbereich Elektrotechnik, Bergische Universität — Gesamthochschule Wuppertal, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1990. P. 234–239.

7. Köhle S.D. Lichtbogenreaktanzen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Arc Reactances of AC Arc Furnace). *Elektrowärme International*, 1993, 51, B4. P. 175–185.

8. Klimas M., Grabowski D. Application of the Deterministic Chaos in AC Electric Arc Furnace Modeling. *2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Prague, Czech Republic, 2022. pp. 1–6. doi:10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854594.

9. Xu R., Ma S., Zhang M. Modeling of Electric Arc Furnace for Power Quality Analysis. *2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*. Wuhan, China, 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/CIYCEE55749.2022.9958980.

10. Balouji E., Salor Ö., McKelvey T. Deep Learning Based Predictive Compensation of Flicker, Voltage Dips, Harmonics and Interharmonics in Electric Arc Furnaces. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, Vol. 58, No. 3, pp. 4214–4224. doi: 10.1109/TIA.2022.3160135.

11. Svenchanskiy A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. e.a. *Elektricheskiye promyshlennyye pechi: Dugovyye pechi i ustanovki spetsial'nogo nagreva: Uchebnik dlya vuzov* [Electric Industrial Furnaces: Arc Furnaces and Special Heating Installations: Textbook for Universities]. Ed. by A.D. Svenchanskiy. 2 ed., rev. and add. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 296 p. [in Russian].

12. Tel'nyy S.I. K teorii trekhfaznoy dugovoy pechi s neprovodyashchey podinoy [On the Theory of a Three-Phase Arc Furnace with a Non-Conducting Hearth]. *Elektrichestvo — Electricity*, 1954, No. 2, pp. 38–42. [in Russian].

13. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New Theory of

Breaker Arcs and Circuit Rigidity). CIGRE. 1939. Report No. 102.

14. Nikolayev A.A., Tulupov P.G. Metodika modelirovaniya sluchaynykh vozmushcheniy dlin elektricheskikh dug dlya optimal'noy nastroyki nelineynogo P-regulyatora impedansa [Technique for Modeling Random Disturbances of the Electric Arcs Lengths for Tuning a Nonlinear P-Controller of Impedance]. *Chernyye metally — Ferrous Metals*, 2021, No.11, pp. 74–80. doi: 10.17580/chm.2021.11.13. EDN: ERKJEU. [in Russian].

15. Nikolayev A.A. Povysheniye effektivnosti raboty dugovykh staleplavil'nykh pechey i ustanovok kovsh-pech' za schet primeneniya usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya elektricheskimi rezhimami [Improving the Efficiency of Operation of Arc Steelmaking Furnaces and Ladle-Furnace Units by Using Advanced Algorithms for Controlling Electrical Modes]. Magnitogorsk, FGBOU VPO «MGTU», 2015. 161 p. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 13.11.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 15.12.2023.*

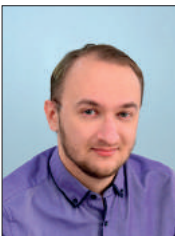
*The article was submitted 13.11.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 15.12.2023.*

Научная статья

УДК 621.313.333–52 + 681.518.5

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-31-44

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**Евгений Яковлевич Омельченко*****Evgenii Ya. Omelchenko****доктор технических наук, доцент,**профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия***Алексей Борисович Лымарь*****Aleksei B. Lyumar****старший преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,**Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия*

### Актуальность

Электропривод переменного тока занимает значительную долю в промышленности (80–90 %), так как широко применяется в различных устройствах и машинах различных промышленных мощностей, начиная от конвейеров, насосов и кранов и заканчивая приводами для механизмов металлургического производства. Это связано с простотой управления, надежностью и высокой эффективностью. Наиболее часто встречающимся в промышленности регулируемым электроприводом переменного тока является электропривод «Преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ПЧ–АД). Знание точных параметров АД в таких электроприводах позволяет оптимизировать их работу, улучшить эффективность и продлить срок службы. Это также позволяет предотвращать перегрузки и повышать надежность работы оборудования, что, в свою очередь, снижает эксплуатационные расходы и риски аварийных ситуаций.

С развитием технологий идентификация параметров становится все более важной для адаптации двигателей к новым условиям работы и требованиям производства. Точное определение параметров также позволяет проводить диагностику и прогнозирование состояния двигателей, что сокращает риски неисправностей и увеличивает срок службы оборудования. Таким образом, знание параметров асинхронных электродвигателей играет ключевую роль в повышении эффективности производства и снижении эксплуатационных расходов.

### Ключевые слова

асинхронный двигатель, нейронные сети, параметры схемы замещения, определение параметров, настройка нейронной сети



### Цель исследования

Целью статьи является модернизация существующей методики проведения испытаний АД, регламентированной действующим ГОСТ 7217-87, за счет внедрения нейронных сетей для дальнейшей идентификации параметров на их основе. В статье дано обоснование выбора структуры нейронных сетей, алгоритмов её обучения, а также экспериментально выбрана оптимальная конфигурация скрытого слоя для каждого из опытов. Проведено обучение нейронных сетей на двигателях мощностью 10–100 кВт с номинальным напряжением 380 В, частотой 50 Гц, синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

### Методы исследования

Исследования проводились с использованием ПО Matlab Simulink, обработка данных осуществлялась в ПО Matlab и MS Excel. Опыты, регламентированные действующим ГОСТ 7217-87, проводились на компьютерных моделях. Среди методов исследований, используемых в статье, можно выделить такие, как эксперимент (симуляция замера опытов по ГОСТ 7217-87), измерение (получение выходных параметров силы тока АД в компьютерной модели), сравнение (сравнение результатов обучения нейронных сетей при помощи встроенных инструментов метрики).

### Результаты

Разработаны нейронные сети для идентификации параметров АД, обрабатывающих результаты проведения опытов действующего ГОСТ 7217-87. Методика создания нейросетей, описанная в статье, также может быть использована для создания аналогичных нейросетей для других типоразмеров АД.

**Для цитирования:** Омельченко Е. Я., Лымарь А. Б. Идентификация параметров схемы замещения асинхронных двигателей при помощи нейронных сетей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 31-44. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-31-44>.

Original article

## IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF AN INDUCTION MOTOR EQUIPMENT CIRCUIT USING NEURAL NETWORKS

### Relevance

AC electric drives holds a significant share in industry (80–90 %), as they are widely used in various devices and machines of various industrial capacities, ranging from conveyors, pumps and cranes, to drives for metallurgical production mechanisms. This is due to their ease of operation, reliability and high efficiency. The most common adjustable AC electric drive in industry is the «Frequency Converter — Asynchronous Motor» (FC–AM) electric drive. Knowing the exact parameters of the AM in such electric drives makes it possible to optimize their operation, improve efficiency and extend their service life. Also, this helps prevent overloads and increase the reliability of equipment, which in turn reduces operating costs and the accidents risks.

With the development of technology, parameter identification is becoming increasingly important for adapting motors to new operating conditions and production requirements. Accurate parameters identification of also makes it possible to detect and predict the motors condition, which reduces the malfunctions risk and increases the equipment service life. Thus, knowledge of the asynchronous electric motors parameters plays a key role in increasing production efficiency and reducing operating costs.

### Keywords

asynchronous motor, neural networks, equivalent circuit parameters, determination of parameters, setting up a neural network

### Aim of research

The article purpose is to modernize the existing methodology for conducting asynchronous motors tests, regulated by the current State Standard 7217-87, through the introduction of neural networks for further identification of parameters based on them. The article provides a rationale for choosing the neural networks structure, its training algorithms, and also experimentally selected the hidden layer optimal configuration for each experiment. Neural networks were trained on motors with a power of 10-100 kW with a rated voltage of 380 V, a frequency of 50 Hz, and a synchronous rotation speed of 1500 rpm.

### Research methods

The studies were carried out using Matlab Simulink software, data processing was carried out in Matlab and MS Excel software. The experiments, regulated by the current State Standard 7217-87, were carried out on computer models. Among the research methods used in the article, we can distinguish such as experiment (simulation in accordance with State Standard 7217-87 measuring experiments), measurement (obtaining output parameters of the AM current strength in a computer model), comparison (comparing the results of training neural networks using built-in metrics tools).

### Results

Neural networks have been developed to identify asynchronous motors parameters that process the experiments results in the current State Standard 7217-87. Also, the creating neural networks methodics describe in the article can be used to create similar neural networks for other types of AM.

**For citation:** Omelchenko E. Ya., Lymar A. B. Identifikatsiya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnykh dvigateley pri pomoshchi neyronnykh setey [Identification of the Parameters of an Induction Motor Equipment Circuit Using Neural Networks]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 31-44 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-31-44>.

### Введение

Современный автоматизированный электропривод переменного тока — это сложная электромеханическая система, основными элементами которой являются электродвигатель переменного тока и система автоматического управления (САУ) данным двигателем. Наиболее распространенным электроприводом в промышленности является система «преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ПЧ — АД).

Для настройки САУ необходимо знать параметры асинхронного двигателя (АД). Данные параметры вычисляются на базе схем замещения по паспортным данным электродвигателя [1]. Реальные параметры АД в большинстве случаев отличаются от паспортных данных, вследствие чего возникает погрешность в расчетах параметров схемы замеще-

ния, что в дальнейшем негативно сказывается как на настройке САУ, так и на её работе. Также стоит отметить, что АД, вводимые в эксплуатацию после капитального ремонта, имеют параметры, отличные от паспортных данных, таким образом, они всегда требуют повторной идентификации.

Достоверная идентификация параметров АД является одним из важных аспектов настройки электропривода и их САУ. В связи с этим возникает вопрос о модернизации существующих методик идентификации параметров АД с использованием современных технологий и вычислительных мощностей.

### Анализ литературных источников

В литературных источниках под понятием «идентификация параметров АД» подразумевают алгоритмы расчета или

создание новых или усовершенствование существующих методик идентификации параметров.

Так, в статье [2] имеет место реализация алгоритмов идентификации параметров АД при помощи минимизации ошибки расчета данных параметров на базе компьютерной модели Matlab Simulink с разработанным блоком устройства идентификации параметров (УИП) без его математического описания. Отмечена эффективность непрерывного градиентного метода минимизации ошибки вычислений. Программа для ЭВМ [3] также является компьютерной моделью Matlab Simulink, при этом опирается на методику испытания АД действующего ГОСТ 7217-87 [4]. В основе модели лежит блок решения нелинейных уравнений Solver. Недостатком программы является настройка программы под конкретный АД и ситуативное возникновение неопределённости в решении, так как программа вычисляет методом минимизации ошибки  $n$ -ое количество уравнений с  $n$ -ым количеством неизвестных параметров. Авторы статьи [5] делают акцент на использование разностных схем для идентификации параметров АД при неподвижном роторе в динамических режимах, при этом на основе полученных в статье уравнений погрешность вычислений составляет 4 %.

Данной проблемой занимались также и зарубежные ученые. Так, в статье [6] предложены алгоритмы идентификации параметров на базе нагрузочного опыта АД с последующей идентификации при помощи фильтра Калмана. Статьи [7, 8] используют математические модели с использованием  $dq$ -осей и генетического алгоритма нахождения параметров, базирующегося на случайной выборке из ряда проведенных с АД экспериментов. В статье [9] используют линейный подход к идентификации всех параметров АД одновременно, подразумевая что АД

имеет четкую линейную структуру. В статьях [10, 11] предлагается усовершенствованная схема замещения АД с использованием эталонной теории адаптивного управления (MRAC) для последующей идентификации параметров АД на базе данных схем замещения. В статье [12] предложена новая методика идентификации параметров, которая подходит для самостоятельной наладки электропривода в случаях, когда машина и преобразователь поставляются от разных производителей. В статьях [13, 14] предложены методы идентификации параметров АД в состоянии покоя с использованием интегральных расчетов.

Использование нейронных сетей для идентификации параметров схемы замещения как альтернатива классическим методам расчета и методам с использованием нечеткой логики при изучении литературы обнаружено не было. Тем не менее, использование нейронных сетей в электроприводе и электроэнергетике для анализа данных и прогнозирования также имеет место. Так, в статье [15] описаны основные принципы обработки данных нейронными сетями для анализа асинхронного электропривода, в статьях [16, 17] нейронные сети используются для анализа данных в электроэнергетике и электроснабжении.

### **Основная идея**

В описанной ранее литературе [2–17] идентификация параметров АД предполагает усложнение методик в пользу упрощения расчетов, упрощение расчетов с увеличением погрешности идентификации или увеличением среднеквадратичной ошибки в пользу избавления от неопределенностей, возникающих при решении систем уравнений, выведенных по схемам замещений, предлагается использовать альтернативную математическую модель. Поскольку идентификация параметров АД является многопара-

метрической задачей со множеством известных и неизвестных переменных, предлагается использовать модель с нелинейной многопараметрической оптимизацией, в частности нейронную сеть (в литературе также известную как искусственная нейронная сеть (ИНС)).

Нейронная сеть — это математическая модель, которая состоит из множества взаимосвязанных узлов, называемых нейронами, которые обрабатывают и передают информацию между собой. Основное отличие нейронной сети от программируемых математических и компьютерных моделей — это её обучаемость, т.е. способность найти связи между входными и выходными данными путем обработки информации в так называемых скрытых слоях.

Обучение нейронной сети будет проходить по заранее известной достоверной компьютерной модели АД по методикам, описанным в действующем ГОСТ 7217-87 [4], в частности по опыту холостого хода и опыту короткого замыкания. В качестве входных данных будут использоваться двигатели АИР основного исполнения мощностью 10–100 кВт. После обучения нейронной сети будут использованы два контрольных двигателя с известными параметрами с двумя наборами экспериментальных данных (итого 4 ситуации) для каждого из опытов. Проведение опытов холостого хода и короткого замыкания будет совершено на той же математической модели для получения выходных данных, описанных в методике ГОСТ 7217-87. После этого все необходимые данные будут внесены в обученную нейронную сеть чтобы проверить точность расчета параметров.

### **Выбор структуры нейронной сети**

Компьютерная модель АД, которая будет использована в дальнейшем, является базовым элементом библиотеки

SimScare программного обеспечения (ПО) Matlab Simulink. В данном ПО имеется встроенный инструмент для создания и настройки нейронных сетей — Neural Network App, который позволяет создавать нейронные сети различных категорий, связанных с конкретными задачами. Задача идентификации параметров АД подразумевает наличие большого количества входных данных (паспортные данные двигателя) и наличие выходного параметра в виде силы тока, значение которой необходимо узнать в установившемся режиме. Для решения данной задачи подходит нейронная сеть типа «Fitting» (Установка), направленная на поиск взаимосвязей между входными и выходными данными без привязки во времени.

Данный тип позволяет создавать нейронную сеть в виде многослойного персептрона (MLP) или рекуррентной нейронной сети (RNN). Для задачи идентификации параметров АД больше подойдет тип MLP, так как заранее неизвестно, связаны ли данные друг с другом последовательно или нет, и нет гарантий того, что каждый опыт на каждом двигателе будет проходить абсолютно идентично, так как ГОСТ 7217-87 дает минимальное количество опытов, установки для начального опыта и пределы проведения опытов по напряжениям. Также стоит отметить, что структура MLP является более распространенной в области электропривода и АСУ [18–21], но склонна к избыточной переобучаемости, поэтому количество нейронов в скрытых слоях и само количество скрытых слоёв необходимо подбирать опытным путём. В общем виде структура многослойного персептрона изображена на рисунке 1.

Входной сигнал (возбуждение) представляет собой заранее известные входные данные, выходной сигнал (отклик) — данные, которые необходимо получить в результате обработки входной

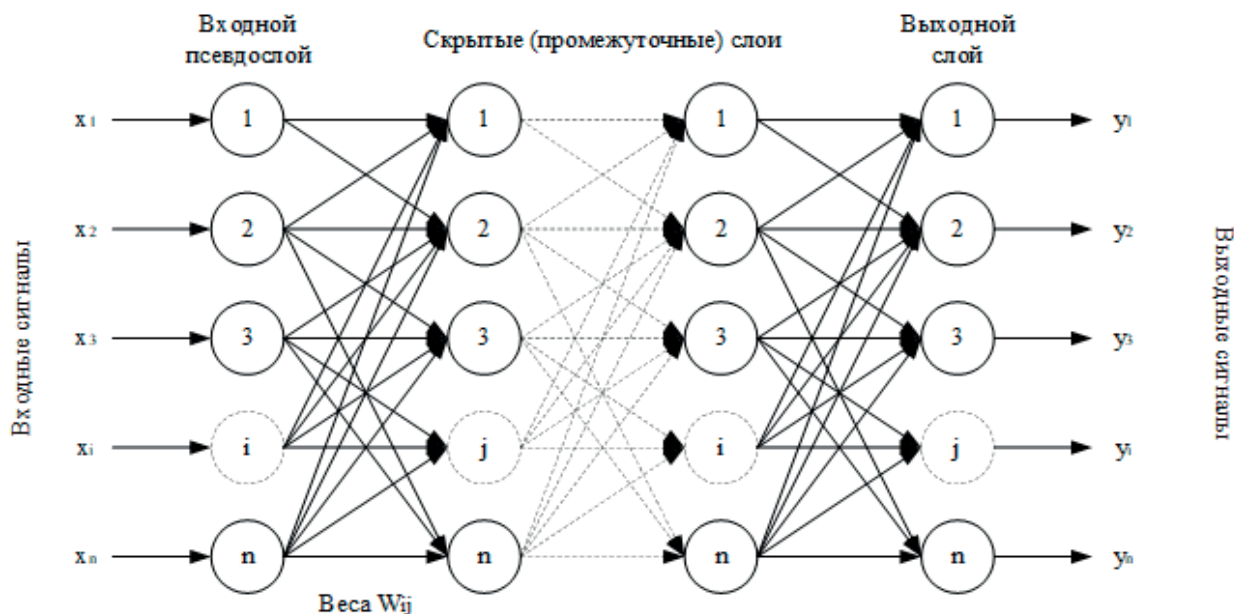


Рисунок 1. Структура нейронной сети «Многослойный персептрон» (MLP)

Figure 1. The neural network structure «Multilayer perceptron» (MLP)

информации. Для обучения необходимо знать и входной, и выходной сигналы. В дальнейшем после обучения достаточно знать лишь входные сигналы. Между входным и выходным слоями нейронной сети располагаются скрытые слои с заранее выбранным количеством нейронов. Обычно количество нейронов выбирается по правилу большого пальца [18–22], которое гласит, что минимальное количество нейронов в скрытом слое должно составлять 70–80 % от суммарных значений входных и выходных сигналов, а количество скрытых слоев должно быть минимизировано.

Также стоит отметить, что по теореме Цыбенко [23, 24] (универсальной теореме аппроксимации) в нейросетях с увеличивающимся числом нейронов и отсутствием обратной связи (к которой является структура многослойного персептрона) одного скрытого слоя будет достаточно, чтобы обеспечить аппроксимацию любой нелинейной функции.

Исходя из вышеизложенного материала, для идентификации параметров АД по опытам холостого хода и короткого замыкания целесообразно выбрать ней-

ронную сеть «многослойный персептрон» структуры «x-n-y» с одним скрытым слоем с количеством нейронов, равным n.

Поскольку количество нейронов в нейронной сети подбирается опытным путем, в дальнейшем при проведении опытов холостого хода и короткого замыкания будут использоваться несколько нейронных сетей, и выбрана оптимальная конфигурация для каждого из опытов.

### Обучение нейронных сетей для идентификации параметров

ГОСТ 7217-87 [4] содержит отдельные главы по проведению опытов холостого хода и короткого замыкания. Результатом проведения опытов является идентификация параметров асинхронного двигателя. Параметры асинхронного двигателя представляют собой параметры классической T-образной схемы замещения. Недостатком действующего ГОСТ 7217-87 является ряд допущений, направленных на упрощение методики расчета параметров, т.к. имеется наличие неопределенностей в фор-

мулах расчетов. Упрощение методики ГОСТ 7217-87 заключается в появлении регламентированных значений отдельных коэффициентов в формулах расчетов, хотя данные коэффициенты и зависимости данных коэффициентов выведены эмпирически, а достоверность их внутри ГОСТ 7217-87 не доказывается.

В статье предлагается использовать методику проведения опытов (количество экспериментов (отсчетов), процесс проведения экспериментов, снятие характеристик), регламентированную ГОСТ 7217-87, при этом конечный результат в виде параметров двигателя будет определяться при помощи нейросетей.

Компьютерная модель, на которой будет происходить обучение нейронной сети, представлена на рисунке 2. Данная модель является стандартной моделью библиотеки SimScape в Matlab Simulink, достоверность которой была доказана в статьях [25, 26]. Основной блок асинхронного двигателя Asynchronous Drive имеет входные параметры, описанные в [27]. Опыт холостого хода проводится без приложения нагрузки на АД, опыт короткого замыкания — при бесконечно

большом значении момента инерции на валу двигателя.

Для обучения нейронной сети будут использоваться данные симуляции опыта холостого хода на 10 двигателях АИР мощностью 10–100 кВт, паспортные данные которых представлены в таблице 1. С учётом количества двигателей, а также количества отсчетов для каждого опыта в ГОСТ 7217-87 общее число замеров для опыта холостого хода — 187; для опыта короткого замыкания — 91.

Дополнительные параметры, необходимые для работы компьютерной модели, рассчитаны по схемам замещения и паспортным данным согласно формулам учебной литературы [1].

Нейронная сеть будет обучаться на 70 % базы данных, проверочный набор данных составит 15 % и тестовый набор данных составит 15 % (28 отсчетов). Проверочный набор данных (Validation Set) используется для оценки производительности модели во время обучения. После каждой эпохи обучения модель проверяется на данном наборе данных, и рассчитывается значение функции потерь или других метрик качества.

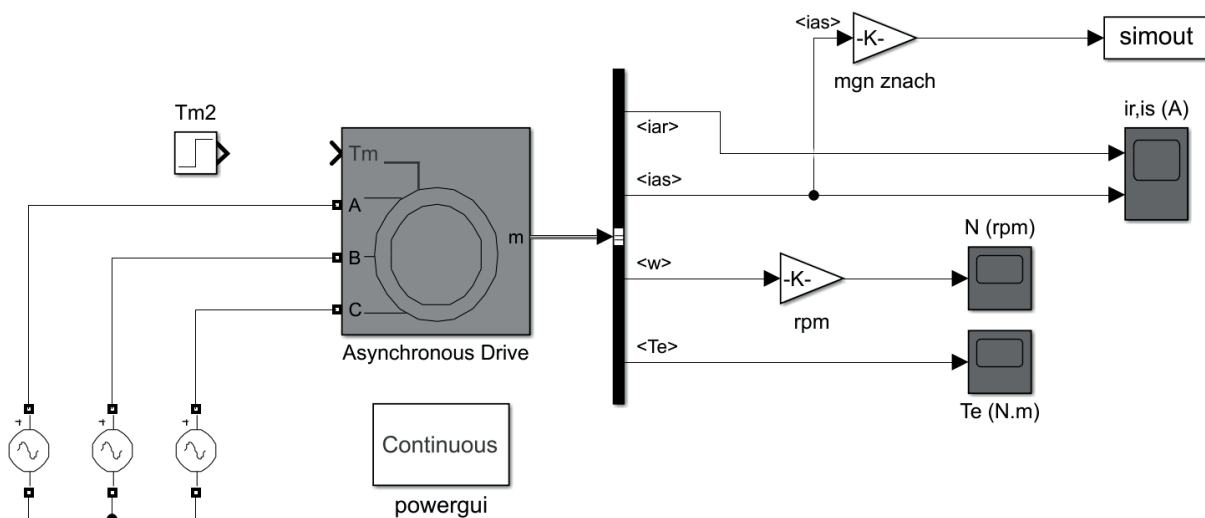


Рисунок 2. Компьютерная модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Figure 2. Computer Model of Squirrel-Cage Asynchronous Motor

**Таблица 1.** Технические данные асинхронных двигателей, используемых в компьютерной модели для формирования базы данных обучения нейронной сети**Table 1.** Asynchronous motors' technical data used in a computer model to form a neural network training database

| Типоразмер электродвигателя | $P_{2n}$ , кВт | $I_{1n}$ , А | Номин. данные |                | Механические характеристики |       |           |       | $i_n$ | $J_{д,2}^2$ , кг·м <sup>2</sup> |
|-----------------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|-----------------------------|-------|-----------|-------|-------|---------------------------------|
|                             |                |              | $\eta$ , %    | $\cos \varphi$ | $m_n$                       | $m_k$ | $S_{ном}$ | $S_k$ |       |                                 |
| АИР132М4                    | 11             | 22           | 87,5          | 0,87           | 2,2                         | 3     | 2,8       | 19,5  | 7,5   | 0,04                            |
| АИР160S4У3                  | 15             | 29           | 88,5          | 0,88           | 1,4                         | 2,3   | 2,3       | 16    | 7     | 0,1                             |
| АИР160М4У3                  | 18,5           | 35           | 89,5          | 0,88           | 1,4                         | 2,3   | 2,2       | 16    | 7     | 0,13                            |
| АИР180S4У3                  | 22             | 41           | 90            | 0,9            | 1,4                         | 2,3   | 2         | 14    | 6,5   | 0,19                            |
| АИР180М4У3                  | 30             | 56           | 91            | 0,89           | 1,4                         | 2,3   | 1,9       | 14    | 6,5   | 0,23                            |
| АИР200М4У3                  | 37             | 68           | 91            | 0,9            | 1,4                         | 2,5   | 1,7       | 10    | 7     | 0,37                            |
| АИР200L4У3                  | 45             | 82           | 92            | 0,9            | 1,4                         | 2,5   | 1,6       | 10    | 7     | 0,45                            |
| АИР225М4У3                  | 55             | 100          | 92,5          | 0,9            | 1,3                         | 2,5   | 1,4       | 10    | 7     | 0,64                            |
| АИР250S4У3                  | 75             | 136          | 93            | 0,9            | 1,2                         | 2,3   | 1,2       | 9,5   | 7     | 1                               |
| АИР250М4У3                  | 90             | 161          | 93            | 0,91           | 1,2                         | 2,3   | 1,3       | 9,5   | 7     | 1,2                             |

Тестовый набор данных (Testing Set) используется для окончательной оценки производительности модели после завершения обучения. Этот набор данных не используется в процессе обучения или настройки модели, чтобы избежать переобучения.

Все наборы данных выбираются ПО Matlab случайным образом. Перечень входных данных для нейронных сетей вынесен в таблицу 2. Выходные параметры для опыта холостого хода — индуктивность обмотки статора  $L_s$  и взаимная индуктивность  $L_m$ ; выходные параметры для опыта короткого замыкания — индуктивность обмотки ротора  $L_r$  и активное сопротивление обмотки ротора  $R_r$ .

Исходя из ранее описанных правил выбора структуры нейронной сети, минимальное количество нейронов в скрытом слое — 5. Увеличивать число нейронов необходимо в геометрической прогрессии  $2n$ , таким образом необходимо рассмотреть обучение 4 нейросетей — с 5, 10, 15, 20 соответственно. При этом для каждого из опытов будет соз-

дана своя нейронная сеть, итого общее количество нейронных сетей — 8.

В результате обучения нейронных сетей для опыта холостого хода при помощи встроенных метрик ПО Matlab был сделан вывод, что нейронные сети с количеством нейронов 5 и 20 в скрытом слое не смогли достигнуть необходимого результата — нейросеть с 5 нейронами не смогла обучиться до заданных условий минимизации среднеквадратичной ошибки, а нейросеть с 20 нейронами переобучилась. Нейронные сети с 10 и 15 нейронами показали хорошие результаты по обучению и апробации на тестовой выборке.

Аналогичные результаты получились и у нейронных сетей для опыта короткого замыкания. Наилучшие результаты по обучению и минимальные значения среднеквадратичной ошибки наблюдались у нейронных сетей с 10 и 15 нейронами.

В дальнейшем для проверки адекватности работы нейронных сетей на опытах холостого хода и короткого замыкания с необходимым числом отсчетов будут использованы нейросети с 10 и 15

**Таблица 2.** Входные параметры нейронной сети**Table 2.** The Neural Network Input Data

| Обозначение              | Расшифровка  | Единицы измерения |
|--------------------------|--|-------------------|
| Опыт холостого хода      |  |                   |
| $U$                      | Напряжение, подводимое на двигатель в ходе расчета | В                 |
| $f$                      | Частота напряжения                                 | Гц                |
| $I$                      | Ток холостого хода                                 | А                 |
| $R_s$                    | Активное сопротивление статора                     | Ом                |
| $P$                      | Мощность электродвигателя                          | Вт                |
| $f_n$                    | Номинальная частота АД                             | Гц                |
| $U_n$                    | Номинальное напряжение АД                          | В                 |
| Опыт короткого замыкания |  |                   |
| $U$                      | Напряжение, подводимое на двигатель в ходе расчета | В                 |
| $f$                      | Частота напряжения                                 | Гц                |
| $I$                      | Ток короткого замыкания                            | А                 |
| $R_s$                    | Активное сопротивление статора                     | Ом                |
| $P$                      | Мощность электродвигателя                          | Вт                |
| $f_n$                    | Номинальная частота АД                             | Гц                |
| $U_n$                    | Номинальное напряжение АД                          | В                 |
| $L_s$                    | Индуктивность статора                              | Гн                |
| $L_m$                    | Взаимная индуктивность между статором и ротором    | Гн                |

нейронами для определения лучшей из них.

### **Проверка работоспособности нейронных сетей идентификации параметров асинхронного двигателя**

Ввиду того, что при обучении нейронные сети берут случайную выборку из базы данных, на которой они обучаются, невозможно заранее утверждать, что при полноценно проведенном опыте холостого хода и короткого замыкания с необходимым количеством отсчетов, регламентированным ГОСТ 7217-87, нейронные сети поведут себя адекватно, поэтому необходимо проверить уже обученные нейросети на АД, которые не присутствовали в базе данных, но имеют аналогичные паспортные данные, а именно:

1) мощность двигателя 10–100 кВт;

2) номинальное напряжение — 380 В;  
 3) номинальная частота — 50 Гц;  
 4) синхронная частота вращения — 1500 об/мин.

Основные критерии проверки адекватности нейронной сети — максимальное отклонение от эталонного (расчетного) значения параметров АД (абсолютная погрешность) и средняя квадратичная ошибка по результатам проведения регламентированного ГОСТ 7217-87 числа отсчетов в рамках одного опыта.

Для проверки работоспособности были выбраны 2 АД отечественной и зарубежной фирм-изготовителей (таблица 3), в ходе которых были проведены 2 опыта холостого хода и 2 опыта короткого замыкания, а именно:

1) опыт холостого хода со значениями подводимых  $U$  и  $f$ , которые использовались при обучении нейронной сети;



2) опыт холостого хода со значениями подводимых  $U$  и  $f$ , которые не использовались при обучении нейронной сети;

3) опыт короткого замыкания со значениями подводимых  $U$  и  $f$ , которые использовались при обучении нейронной сети;

4) опыт короткого замыкания со значениями подводимых  $U$  и  $f$ , которые не использовались при обучении нейронной сети.

В ПО Matlab после завершения обучения нейронная сеть сохраняется как отдельный блок с заданным при обучении количеством входов и выходов. Данные, полученные после идентификации, поступают в Workspace для дальнейшей обработки в MS Excel.

В результате проверки работоспособности нейросетей среднеквадратичная ошибка MSE работы нейронной сети при проведении полноценных опытов с нужным количеством замеров уменьшилась по сравнению с MSE, вычисленной в процессе её проверки на тестовом наборе данных. Это объясняется не только количеством отсчетов в целом, но и тем, что во время проверки на тестовом наборе данных нейронная сеть не разделяет выходные параметры, а ищет ошибку по всем выходным параметрам сразу.

В ходе проверки работоспособности MSE на опытах (2) и (4) не увеличилась, что свидетельствует о том, что для обученных нейронных сетей необязательно совпадение значений  $U$  и  $f$  с отсчетами из базы обучения. Таким образом, про-

ведение опытов холостого хода можно осуществлять на любых напряжениях и частотах, если это не противоречит методикам ГОСТ 7217-87.

Максимальное отклонение определенных по опыту холостого хода величин  $L_m$  и  $L_r$  от заданных для нейронной сети с 10 нейронами в скрытом слое составило 4,9 % и 1,7 % соответственно; для нейронной сети с 15 нейронами в скрытом слое составило 4,3 % и 0,12 % соответственно. Из этого можно сделать вывод, что нейронная сеть для опыта холостого хода с 15 нейронами определяет параметры более точно, что и было предположено по графикам эффективности.

Максимальное отклонение определенных по опыту короткого замыкания величин  $L_r$  и  $R_r$  от заданных для нейронной сети с 10 нейронами в скрытом слое составило 3,2 % и 5,4 % соответственно; для нейронной сети с 15 нейронами в скрытом слое — 6,0 % и 10,3 % соответственно. Из этого можно сделать вывод, что нейронная сеть для опыта короткого замыкания с 10 нейронами определяет параметры более точно, что и было предположено по графикам эффективности. Большая по сравнению с опытом холостого хода ошибка идентификации является следствием накопления ошибки от идентификации параметров опыта холостого хода, так как для опыта короткого замыкания используются параметры  $L_s$  и  $L_m$ , идентифицируемые в опыте холостого хода.

**Таблица 3.** Технические данные асинхронных двигателей, используемых для проверки работы обученных нейронных сетей

**Table 3.** Asynchronous motors technical data used to testing of trained neural networks

| Типоразмер электродвигателя | $P_{2n}$ , кВт | $I_{1n}$ , А | Номин. данные |               | Механические характеристики |       |           |       | $i_n$ | $J_d$ , кг·м <sup>2</sup> |
|-----------------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------|-------|-----------|-------|-------|---------------------------|
|                             |                |              | $\eta$ , %    | $\cos\varphi$ | $m_n$                       | $m_k$ | $S_{ном}$ | $S_k$ |       |                           |
|                             |                |              | 100           | 100           |                             |       |           |       |       |                           |
| 4АН200М6У3                  | 30             | 57           | 90            | 0,88          | 1,3                         | 2,1   | 2,3       | 13,5  | 6     | 0,38                      |
| Xinnuo Y2-250-L4            | 90             | 161          | 93            | 0,91          | 0,16                        | 1,2   | 2,3       | 1,3   | 9,5   | 7                         |

## Выводы

1. Проведен анализ литературы по идентификации параметров АД и предложено новое решение с использованием нейронной сети. Методика проведения опытов взята из ГОСТ 7217-87.

2. Рассмотрены основные структуры нейронных сетей и алгоритмов их обучения, выбрана оптимальная структура «многослойный персептрон» с одним скрытым слоем, оптимизируемая по алгоритму Левенберга-Марквардта.

3. Для заданной структуры созданы нейросети с разным количеством нейронов в скрытом слое и выбраны оптимально обученные.

4. Была проведена проверка идентификации параметров нейронными сетями на АД, не задействованных в обучении нейросетей. В результате проверки выяснилось, что оптимальное количество нейронов для нейросети опыта холостого хода составляет 15, ошибка идентификации параметров  $L_s$  и  $L_m$  составляет 4,3 % и 0,12 % соответственно. Оптимальное количество нейронов для нейросети опыта короткого замыкания составляет 10, ошибка идентификации параметров  $R_r$  и  $L_r$  составляет 3,2 % и 5,3 % соответственно.

## Список источников

1. Фомин М.Б., Петько В.Г., Рахимжанова И.А. и др. Электрический привод: учебное пособие. Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2020. 180 с. ISBN 978-5-600-02859-3. URL: <https://e.lanbook.com/book/172656> (дата обращения: 27.10.2023).

2. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Яковлев Ю.А., Ханнанова В.Н. Устройство идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя // Известия вузов. Проблемы энергетики 2015. № 5-6. С. 107–119. EDN: UIOYUX. (дата обращения: 27.10.2023).

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680948 РФ. Программа расчета параметров асинхронного двигателя по опытам холостого хода и короткого замыкания / В.О. Моисеев, А.Б. Лымарь, Е.Я. Омельченко. № 2021680302, Заявлено 13.12.2021; Опубл. 16.12.2021. EDN XEMMEL.

4. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2002. 41 с.

5. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Идентификация параметров асинхронных электродвигателей с неподвижным короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 5. С. 101–105. EDN: PVBCYL.

6. Wang Yu.-h., Birdwell J.D. Dynamic Identification of the Model Parameters for an Induction Motor // Conference Proceedings of IEEE SOUTHEASTCON. 1982. P. 430–433.

7. Goldberg D.E., Potvin A.F. Genetic Algorithms: Implementation Based on GAs from the MathWorks. 1994.

8. Huang K.S., Kent W., Wu Q.H., Turner D.R. Parameter Identification of an Induction Machine Using a Genetic Algorithms // Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design. Kohala Coast, HI, USA, 1999, pp. 510-515. <https://doi.org/10.1109/cacsd.1999.808700>.

9. Moons C., De Moor B. Parameter Identification of Induction Motor Drives // Automatica. 1995. No. 31 (8). P. 1137-1147. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(95\)00016-P](https://doi.org/10.1016/0005-1098(95)00016-P).

10. Attaianesi C., Damiano A., Gatto G., Marongiu I. A Perfectto Induction Motor Drive Parameters Identification // IEEE Transactions on Power Electronics. 1998. No. 13 (6). P. 1112–1122. <https://doi.org/10.1109/63.728338>.

11. Gastli A. Identification of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Using the Single-Phase Test // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999. No. 14 (1). P. 51–56. <https://doi.org/10.1109/60.749147>

12. Košťál T. Induction Machine Parameters Identification Method Suitable for Self-Commissioning // 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET). Sozopol, 2017. <https://doi.org/10.1109/ET.2017.8124357>.

13. Lee S., Yoo A., Lee H.J., Yoon Y.D., Han B.M. Identification of Induction Motor Parameters at Standstill Based on Integral Calculation // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. No. 53 (3). P. 2130–2139. <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2650141>.

14. He Y., Wang Y., Feng Y., Wang Z. Parameter Identification of an Induction Machine at Standstill Using Vector Constructing Method // *IEEE Transactions Power Electronics*. 2012. No. 27 (2). P. 905–915. <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2089699>.
15. Казаков Д.С. Обработка данных для обучения нейронной сети анализирующей состояние асинхронного электропривода // *Электротехнические системы и комплексы*. 2012. № 20. С. 402–406. EDN: RPOSWD.
16. Серебряков Н.А. Применение ансамбля глубоких нейронных сетей в задачах краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2(51). С. 52–60. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-52-60. EDN: YIBIJK.
17. Васильев Г.В., Бердонос В.Д. Методика по эффективному применению гибридных моделей нейронных сетей для прогнозирования энергопотребления // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 88–95. doi: 10.18503/2311-8318-2022-4(57)-88-95. EDN: HNIOSL.
18. Ерёменко Ю.И., Данилова М.Г., Рукавицын К.О. Цифровое моделирование в Simulink системы прямого управления момента с многослойным перцептроном // *Вестник ВГТУ*. 2016. Т. 12, № 4. С. 15–18. EDN: WIQPNF.
19. Иванов С.О., Никандров М.В., Славутский Л.А. Нейросетевое моделирование релейной защиты с временной задержкой // *Вестник ЧГУ*. 2022. № 3. С. 53–60. DOI:10.47026/1810-1909-2022-3-53-60. EDN: XHEZDO.
20. Ившин И.В., Аухадеев А.Э., Ле Кхак Тхинь. О применении нейронных сетей в расчетах рациональных режимов работы тягового электрооборудования городского электрического транспорта // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2023. Т. 15, № 1 (57). С. 106–116. EDN: FVWBPК. (дата обращения: 27.10.2023).
21. Baum E.B., Haussler D. What Size Net Gives Valid Generalization? // *Neural Computation*. 1988. No. 1. P. 151–160.
22. Göring S., Raake A. Rule of Thirds and Simplicity for Image Aesthetics using Deep Neural Networks // 2021 IEEE 23rd International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP). Tampere, Finland, 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/MMSP53017.2021.9733554.
23. Oyedare T., Park J.-M.J. Estimating the Required Training Dataset Size for Transmitter Classification Using Deep Learning // 2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). New-ark, NJ, USA, 2019. P. 1–10. doi: 10.1109/DySPAN.2019.8935823.
24. Горбаченко В.И., Алкезуини М.М.М. Моделирование объектов с распределенными параметрами на нейронных сетях // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2019. № 4 (32). С. 50–64.
25. Raghvendra Dhar Diwan. Induction Motor Testing Using MATLAB/Simulink // *International Research Journal of Engineering and Technology (IR-JET)*. 2021. Vol. 08, Issue 06, June 2021, P. 1810–1815pp. e-ISSN 2395-0056.
26. Bentounsi A., Djeghloud H., Benalla H., Birem T., Amiar H. Computer-Aided Teaching Using MATLAB/Simulink for Enhancing an IM Course with Laboratory Tests // *IEEE Transactions on Education*. Aug. 2011. Vol. 54. No. 3. P. 479–491. doi: 10.1109/TE.2010.2085046.
27. Официальный сайт Mathworks. Описание блока Asynchronous Machine. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html> (дата обращения: 27.10.2023).

## References

- Fomin M.B., Pet'ko V.G., Rakhimzhanova I.A. e.a. *Elektricheskiy privod: uchebnoye posobiye* [Electric Drive: Tutorial]. Orenburg, Orenburgskiy GAU, 2020. 180 p. ISBN 978-5-600-02859-3. URL: <https://e.lanbook.com/book/172656> (accessed 27.10.2023). [in Russian].
- Afanas'yev A.Yu., Makarov V.G., Yakovlev Yu.A., Khannanova V.N. *Ustroystvo identifikatsii parametrov trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya* [Device of Identification of Parameters of the Three-Phase Asynchronous Motor]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki — Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2015, No. 5–6, pp 107–119. EDN: UIOYUX. (accessed 27.10.2023). [in Russian].
- Moiseyev V.O., Lyamar' A.B., Omel'chenko Ye.Ya. *Programma rascheta parametrov asinkhronnogo dvigatelya po opytam kholostogo khoda i korotkogo замыканиya* [Program for Calculating the Parameters of an Asynchronous Motor Based on No-Load and Blocked Rotor Tests]. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2021680948 RF, 2021. [in Russian].
- GOST 7217-87. *Mashiny elektricheskiye vrashchayushchiyesya. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy* [State Standard 7217-87. Rotating Electrical Machines. Asynchronous Motors. Test Methods]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002. 41 p. [in Russian].

5. Glazyrin A.S., Bolovin Ye.V. Identifikatsiya parametrov asinkhronnykh elektrodvigatelye s nepodvizhnym korotkozamknutym rotorom na osnove raznostnykh skhem [Identification of Asynchronous Motors with Squirrel-Cage Rotor Parameters Based on Difference Schemes]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, Vol. 321, No. 5, pp. 101–105. EDN: PVBCYL. [in Russian].
6. Wang Yu.-h., Birdwell J.D. Dynamic Identification of the Model Parameters for an Induction Motor. *Conference Proceedings of IEEE SOUTHEASTCON*, 1982, pp. 430–433.
7. Goldberg D.E., Potvin A.F. *Genetic Algorithms: Implementation Based on GAs from the MathWorks*. 1994.
8. Huang K.S., Kent W., Wu Q.H., Turner D.R. Parameter Identification of an Induction Machine Using a Genetic Algorithms. *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design. Kohala Coast, HI, USA*, 1999, pp. 510–515. <https://doi.org/10.1109/cacsd.1999.808700>.
9. Moons C., De Moor B. *Parameter Identification of Induction Motor Drives. Automatica*, 1995, No. 31 (8), pp. 1137–1147. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(95\)00016-P](https://doi.org/10.1016/0005-1098(95)00016-P).
10. Attaianesi C., Damiano A., Gatto G., Marongiu I. A Perfect Induction Motor Drive Parameters Identification. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, No. 13 (6), pp. 1112–1122. <https://doi.org/10.1109/63.728338>.
11. Gastli A. Identification of Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Using the Single-Phase Test. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, No. 14 (1), pp. 51–56. <https://doi.org/10.1109/60.749147>.
12. Košťál T. Induction Machine Parameters Identification Method Suitable for Self-Commissioning. *2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)*, Sozopol, 2017. <https://doi.org/10.1109/ET.2017.8124357>.
13. Lee S., Yoo A., Lee H.J., Yoon Y.D., Han B.M. Identification of Induction Motor Parameters at Standstill Based on Integral Calculation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, No. 53 (3), pp. 2130–2139. <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2650141>.
14. He Y., Wang Y., Feng Y., Wang Z. Parameter Identification of an Induction Machine at Standstill Using Vector Constructing Method. *IEEE Transactions Power Electronics*, 2012, No. 27 (2), pp. 905–915. <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2089699>.
15. Kazakov D.S. Obrabotka dannykh dlya obucheniya neyronnoy seti analiziruyushchey sostoyaniye asinkhronnogo elektroprivoda [Data Processing for Training a Neural Network for Analyzing the Asynchronous Electric Drive State]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2012, No. 20, pp. 402–406. EDN: RPOSWD. [in Russian].
16. Serebryakov N.A. Primeneniye ansamblya glubokikh neyronnykh setey v zadachakh kratkosrochnogo prognozirovaniya pochasovogo elektropotrebleniya garantiruyushchego postavshchika elektroenergii [Application of Deep Neural Network Ensemble in a Problem of Short-Term Load Forecasting Guaranteed Electricity Supplier]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2021, No. 2 (51), pp. 52–60. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-52-60. EDN: YIBIJK. [in Russian].
17. Vasil'yev G.V., Berdonosov V.D. Metodika po effektivnomu primeneniyu gibridnykh modeley neyronnykh setey dlya prognozirovaniya energopotrebleniya [Methodology for Effective Application of Hybrid Models of Neural Networks for Energy Consumption Prediction]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2022, No. 4 (57), pp. 88–95. doi: 10.18503/2311-8318-2022-4(57)-88-95. EDN: HNIOSL. [in Russian].
18. Yeromenko Yu.I., Danilova M.G., Rukavitsyn K.O. Tsifrovoye modelirovaniye v Simulink sistemy pryamogo upravleniya momenta s mnogoslonym perseptronom [Digital Simulation of Direct Torque Control System Based on Multi-Layer Perceptron Neural Network in Simulink]. *Vestnik VGTU — Bulletin of VSTU*, 2016, Vol. 12, No. 4, pp. 15–18. EDN: WIQPNF. [in Russian].
19. Ivanov S.O., Nikandrov M.V., Slavutskiy L.A. Neyrosetevoye modelirovaniye releyroy zashchity s vremennoy zaderzhkoy [Neural Network Modeling of Relay Protection with a Time Delay]. *Vestnik ChGU — Bulletin of ChSU*, 2022, No. 3, pp. 53–60. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-53-60. EDN: XHEZDO. [in Russian].
20. Ivshin I.V., Aukhadayev A.E., Le Khac Thinh. O primeneniye neyronnykh setey v raschetakh ratsional'nykh rezhimov raboty tyagovogo elektrooborudovaniya gorodskogo elektricheskogo transporta [Application of Neural Networks in Rational Modes Calculations of Traction Electric Equipment Operation of Urban Electric Transport]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta — Bulletin of Kazan State Energy University*, 2023, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 106–116. EDN: FVWBPK (accessed 27.10.2023). [in Russian].

21. Baum E.B., Haussler D. What Size Net Gives Valid Generalization? *Neural Computation*, 1988, No. 1, pp. 151–160.

22. Göring S., Raake A. Rule of Thirds and Simplicity for Image Aesthetics using Deep Neural Networks. *2021 IEEE 23rd International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*. Tampere, Finland, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/MMSP53017.2021.9733554.

23. Oyedare T., Park J.-M.J. Estimating the Required Training Dataset Size for Transmitter Classification Using Deep Learning. *2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*. New-ark, NJ, USA, 2019, pp. 1-10. doi: 10.1109/DySPAN.2019.8935823.

24. Gorbachenko V.I., Alkezuini M.M.M. Modelirovaniye ob'yektov s raspredelennymi parametrami na neyronnykh setyakh [Modeling Objects with Distributed Parameters on Neural Networks]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike,*

*tekhnike, prirode i obshchestve — Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*, 2019, No. 4 (32), pp. 50–64. [in Russian].

25. Raghvendra Dhar Diwan. Induction Motor Testing Using MATLAB/Simulink. *International Research Journal of Engineering and Technology (IR-JET)*, 2021, Vol. 08, Issue 06, June 2021, pp. 1810–1815pp. e-ISSN 2395-0056.

26. Bentounsi A., Djeghloud H., Benalla H., Birem T., Amiar H. Computer-Aided Teaching Using MATLAB/Simulink for Enhancing an IM Course with Laboratory Tests. *IEEE Transactions on Education*, Aug. 2011, Vol. 54, No. 3, pp. 479-491. doi: 10.1109/TE.2010.2085046.

27. *Ofitsial'nyy sayt Mathworks. Opisaniye bloka Asynchronous Machine* [Official Website of Mathworks. Description of the Asynchronous Machine Block]. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html> (accessed 27.10.2023). [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 15.12.2023; одобрена после рецензирования 22.12.2023; принята к публикации 25.12.2023.*

*The article was submitted 15.12.2023; approved after reviewing 22.12.2023; accepted for publication 25.12.2023.*

Научная статья

УДК 621.316.53.064.241

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-45-53

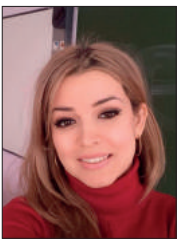
## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ



**Мусса Гумерович Баширов**

**Mussa G. Bashirov**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»  
Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный  
нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия



**Эльмира Муссаевна Баширова**

**Elmira M. Bashirova**

кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры  
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»  
Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный  
нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия



**Георгий Светославович Прокоп**

**Georgiy S. Prokop**

студент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных  
предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

### Актуальность

Электроприемники нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности требуют высоких показателей качества электрической энергии. Поскольку эти отрасли являются опорной точкой для роста экономики государства, и, как следствие, его положительной динамики в целом, то необходимо обеспечивать надежную работу исполнительных органов технологических производств данной промышленности — машин и аппаратов, средств автоматизации, работающих на электрической энергии.

### Цель исследования

Поиск и анализ технических решений по защите ответственных в технологическом процессе электроприемников от провалов напряжений.

### Методы исследования

Аналитический обзор технических средств, научной и технической литературы.

### Ключевые слова

провал напряжения, насосная установка, отпадание контактов, выбег электродвигателей, автоматический повторный пуск, повышение надежности электроснабжения, контактор, магнитный пускатель

**Результаты**

Выявлено и обосновано оптимальное техническое решение по повышению надежности электроснабжения ответственных механизмов.

**Для цитирования:** Баширов М. Г., Баширова Э. М., Прокоп Г. С. Технические решения для повышения надежности электроснабжения насосных агрегатов технологических установок нефтегазового производства при провалах напряжения // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. № 4. Т. 19. С. 45-53. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-45-53>.

Original article

## TECHNICAL SOLUTIONS FOR INCREASING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY TO PUMPING UNITS OF OIL AND GAS PRODUCTION INSTALLATIONS IN THE EVENT OF VOLTAGE DIPS

**Relevance**

Electrical receivers in the oil refining and petrochemical industries require high quality electrical energy. Since these industries are the support point for the growth of the state's economy, and, as a consequence, its positive dynamics in general, it is necessary to ensure the reliable operation of the executive bodies of the technological production of this industry - machines and apparatus, automation equipment operating on electrical energy.

**Aim of research**

Search and analysis technical solutions to protect electrical receivers critical in the technological process from voltage dips.

**Research methods**

Analytical review of technical means, scientific and technical literature.

**Results**

The optimal technical solution to improve the reliability of power supply to critical mechanisms has been identified and justified.

**Keywords**

voltage dip, pumping unit, contact loss, electric motor run-out, automatic restart, increasing the reliability of power supply, contactor, magnetic starter

**For citation:** Bashirov M. G., Bashirova E. M., Prokop G. S. *Tekhnicheskiye resheniya dlya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya nasosnykh agregatov tekhnologicheskikh ustanovok neftegazovogo proizvodstva pri provalakh napryazheniya* [Technical Solutions for Increasing the Reliability of Power Supply to Pumping Units of Oil and Gas Production Installations in the Event of Voltage Dips]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 45-53 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-45-53>.

**Введение**

В трехфазных системах электроснабжения за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения (90 % опорного напряжения), за окончание провала напряжения принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения [1].

Провалы напряжения оказывают большое влияние на непрерывные производственные процессы на химических, нефтеперерабатывающих и других предприятий со сложной технологической цепочкой выпуска продукции, где для останова и возобновления процесса требуется от нескольких часов до нескольких суток [2, 3].

Проблема заключается в том, что отпадание контактов электромеханиче-

ских коммутационных аппаратов при питании от источника переменного тока зависит от того, в какой момент времени относительно мгновенного значения напряжения происходит провал напряжения [4].

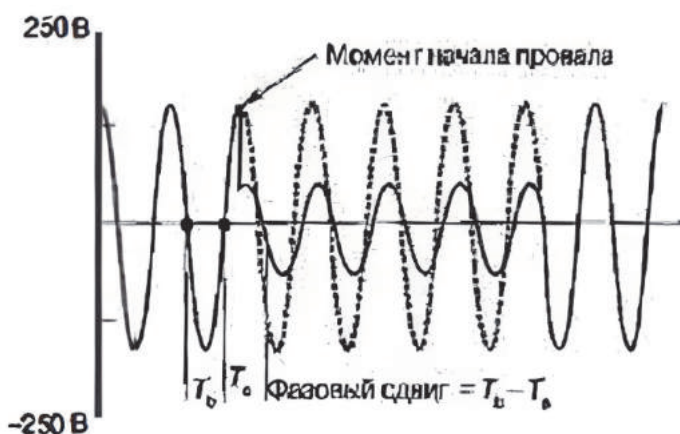
При провале напряжения до  $0,3U_{\text{ном}}$  в момент, когда мгновенное значение напряжения максимальное, вероятность отпадания контактов велика, поскольку ток протекающий в обмотке катушки контактора (магнитного пускателя), сдвинутый по фазе на  $90^\circ$  относительно напряжения, практически равен нулю, следовательно, и механическая сила тоже (рисунок 1).

Когда мгновенное значения напряжения проходит через ноль, то ток, протекающий в обмотке катушки, достигает максимального значения, как и механическая сила [5].

В результате эмпирических исследований установлена взаимосвязь длительности провала напряжения и глубины провала напряжения, при которых происходит нарушение режима работы контакторов:

— от 5 до 10 мс, когда провал напряжения произошел в момент максимума, и глубина провала напряжения составляет от  $0,75U_{\text{ном}}$  и  $0,38U_{\text{ном}}$ ;

— от 80 до 120 мс, когда провал напряжения произошел в момент минимума, и глубина провала напряжения составляет от  $0,35U_{\text{ном}}$  и  $0,60U_{\text{ном}}$ .



**Рисунок 1.** Провал напряжения до 30 % от номинального значения, произошедший в точке максимума напряжения управления электромеханическим коммутационным прибором

**Figure 1.** Voltage dip of up to 30 % of the nominal value occurring at the point of maximum voltage of an electromechanical switching device

Выбор технических решений по повышению надежности электроснабжения ответственных механизмов зависит от мощности электродвигателя, глубины и длительности провала напряжения, стоимости и многих других факторов. Это частная задача, требующая индивидуального подхода к ее решению.

В данной статье приводится сравнительный анализ возможных решений в случае, если необходимо обеспечить непрерывную работу конкретно одного либо небольшого количества низковольтных асинхронных электродвигателей мощностью до 200 кВт.

### Быстродействующий автоматический ввод резерва

Быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР) предназначен для сохранения в работе потребителей с двигательной нагрузкой при возникновении аварийного режима — потери питающего напряжения на одном из вводов 6 (10) кВ распределительного устройства (РУ) путем максимально быстрого переключения на исправный ввод без возникновения сверхтоков. Оптимизация переходных процессов обеспечивается синхронизацией момента включения БАВР с углом расхождения фаз напряжений выбегающих двигателей с напряжениями исправной секции шин в диапазоне от 0 до 30 градусов.



Работа БАПВ блокируется:

- если напряжение на исправной секции шин ниже 80 % от номинального;
- если угол фазового рассогласования между напряжениями прямой последовательности на секции шин превышает 30 электрических градусов, например, при замыкании на землю в сети 6 (10) кВ с изолированной нейтралью;
- если короткое замыкание произошло ниже вводного выключателя, но выше выключателя отходящей линии, например, на секции шин, на отходящей линии перед выключателем на электродвигатель.

Напряжение на исправной секции шин также может падать ниже допустимого уровня по ГОСТ 32144-2013 ввиду того, что электрическая сеть закольцована. В случае невыполнения данных условий, микропроцессорное устройство подает разрешение на работу штатного автоматического включения резерва (АВР). АВР не обеспечивает такого режима работы, при котором катушки магнитных пускателей и контакторов не размагнитятся до уровня, когда электромеханической силы будет недостаточно для удержания контактов в замкнутом положении.

К тому же, как показывают многочисленные исследования, на отпадание контактов большое влияние оказывает угол синусоиды напряжения, при котором начался провал. Предугадать, в какой момент начнется провал напряжения, с такой высокой точностью невозможно, следовательно, нет возможности точно сказать, что БАПВ защитит от отпадания контактов [6].

Отдельно следует сказать о стоимости внедрения БАПВ. БАПВ — это многомиллионный проект, который подразумевает внедрение дорогих современных вакуумных выключателей, так как требуется быстрое действие.

Таким образом, БАПВ в рассматриваемом случае не может быть оценен как

наиболее рациональный и экономичный, но должен приниматься во внимание при оценке проектных решений при наличии критично важных электроприемников.

### **Динамический компенсатор искажений напряжения**

Динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН) представляет собой полупроводниковый преобразователь напряжения (инверторный блок, состоящий из IGBT модулей), который подключен к сети питания потребителя и через вольтодобавочный трансформатор перераспределяет мощности таким образом, чтобы наводимое напряжение на вторичной обмотке трансформатора полностью компенсировало провал напряжения [7].

В настоящее время рынок электрооборудования предоставляет широкий выбор устройств ДКИН, начиная от малогабаритных устройств мощностью 0,25 кВА, заканчивая крупными, тяжелыми шкафами мощностью 2000 кВА. Однако стоимость данного оборудования будет оправдана только в том случае, как показывают исследования и как заявляют многие производители, если ДКИН устанавливается в сети напряжением 6 (10) кВ, и когда снижение напряжения нужно компенсировать от 0,2 до 5,0 с [8, 9].

Применение устройств ДКИН может повлечь за собой еще большие экономические издержки. Связано это с тем, что такие устройства потребляют значительное количество реактивной мощности. Как показывают исследования, снижение коэффициента реактивной мощности ведет к увеличению потерь электроэнергии [10].

Таким образом, с применением устройств ДКИН появляется необходимость в компенсации реактивной мощности. Стоимость устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) меняется в зависимости от производителя, мощности.

Следует учитывать, что устройства ДКИН работают на основе полупроводниковых элементов (транзисторов), которые в нормальном режиме могут генерировать высокочастотные электромагнитные помехи, негативно влияющие на электрическую сеть.

Из всего вышесказанного вывод следующий. ДКИН применять можно, так как он справляется с поставленной задачей, но решение в пользу ДКИН может быть принято только после аналитической оценки других мероприятий.

### **Источник бесперебойного питания**

Источник бесперебойного питания (ИБП) обеспечивает временное электроснабжение потребителей за счет накопленного аккумуляторными батареями заряда. Питание промышленных ИБП предусматривается от двух независимых взаиморезервируемых источников питания для повышения надежности формирования независимого напряжения питания.

Современные источники бесперебойного питания вполне могут обеспечить требуемую мощность. Однако ИБП — это особое техническое решение, которое применяется для обеспечения бесперебойного питания наиболее ответственных электроустановок на длительное время.

Отдельно следует упомянуть о стоимости ИБП. По сравнению с рассмотренными ранее устройствами ИБП — наиболее дорогостоящие. Эти устройства включают в себя множество компонентов, таких как инверторы, выпрямители, аккумуляторные батареи, трансформаторы и контроллеры, которые должны иметь высокую точность и надежность. Кроме того, промышленные ИБП должны соответствовать строгим стандартам безопасности и эффективности, что требует значительных затрат на их разработку, производство и тестирова-

ние, также у ИБП есть еще один существенный недостаток — габариты и масса. Размеры ИБП растут с увеличением мощности. Монтаж, доставка ИБП — затруднительны.

### **Устройство повторного пуска**

Целесообразность применения данных устройств в решении проблемы по повышению надежности электроснабжения электродвигателей доказана на практике и описана во многих источниках [11].

Устройства повторного пуска являются частным случаем схемных решений. В настоящее время нет необходимости самостоятельно разрабатывать схемы повторного самозапуска электродвигателей, так как рынок электрооборудования предлагает готовые схемы, собранные в блоки управления электродвигателем либо реле повторного включения (рисунок 2).

Такие системы позволяют сохранить технологическое оборудование в работе после прохождения кратковременных перерывов в электропитании, что особенно важно для непрерывного процесса, так как исключает потери времени и электроэнергии на их восстановление.

Натурные исследования показывают, что минимальный пусковой ток будет при уменьшении выдержки времени до 1,5–2 с. Чем меньше длится перерыв питания, тем меньше двигатели успевают затормозиться, и их пусковые токи меньше, самозапуск двигателей происходит быстрее [12, 13].

Таким образом, устройства АПВ двигателей — простое и надежное решение, которое позволяет повторно запускать электродвигатели с начальной частотой вращения, не равной нулю, и под нагрузкой (момент на валу не равен нулю). Экспериментально доказано, что пусковые токи и момент на валу в момент повторного пуска растут с увеличением

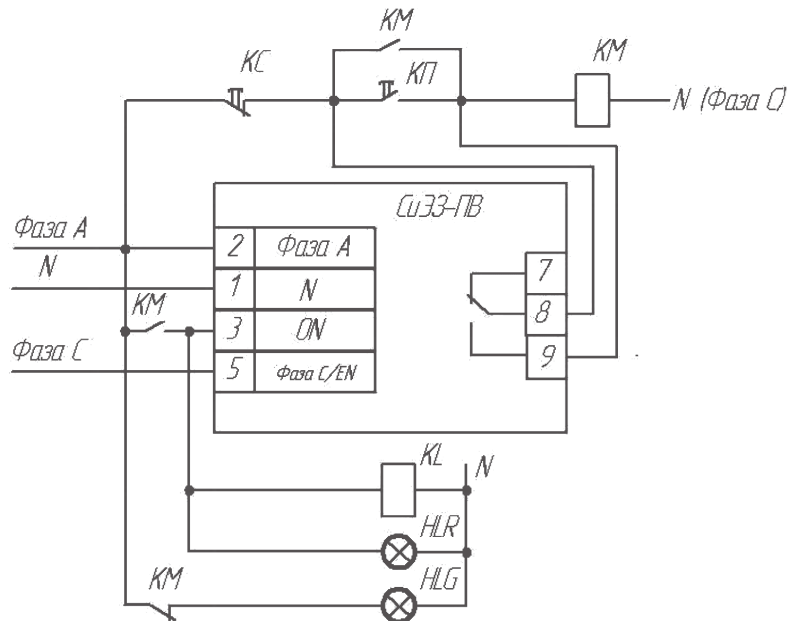


Рисунок 2. Типовая схема включения устройства

Figure 2. Typical circuit diagram of the device

выдержки времени на повторное включение, как показано на рисунке 3 [14].

На базе устройства самозапуска разработана схема защиты и управления асинхронным асинхронным двигателем (АД) мощностью 50 кВт (рисунок 4).

Устройство включает пускатель, выключенный при пропадании питания по истечении задаваемого времени с момента появления напряжения сети. При этом обеспечивается облегчённый режим работы секционного трансформатора при разнесённом по времени самозапуске электродвигателей. Устройство состоит из схемы входных сигналов, управляющего контроллера и выходного

реле. Схема входных сигналов позволяет осуществлять контроль включенного состояния пускателя (контактора), наличия фазы С или сигнала разрешения включения пускателя (контактора) и контроль уровня напряжения сети не ниже 80 % от номинального значения. Управляющий контроллер осуществляет выдачу сигнала на включение при отключении пускателя (контактора) при провале или прерывании напряжения. Включение производится через заданное время, если восстановление напряжения до уровня не менее 80 % от номинального произошло за время, не превышающее установленного времени [15].

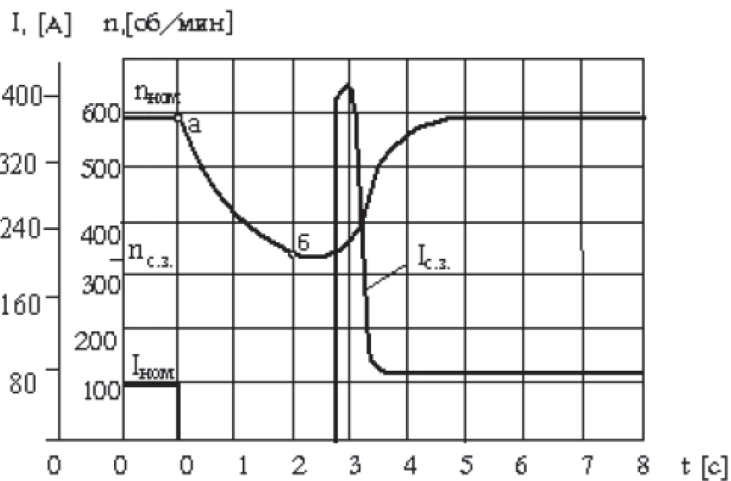


Рисунок 3. График зависимости пускового тока и частоты вращения ротора от выдержки времени

Figure 3. Graph of dependence of inrush current and rotor speed on time delay

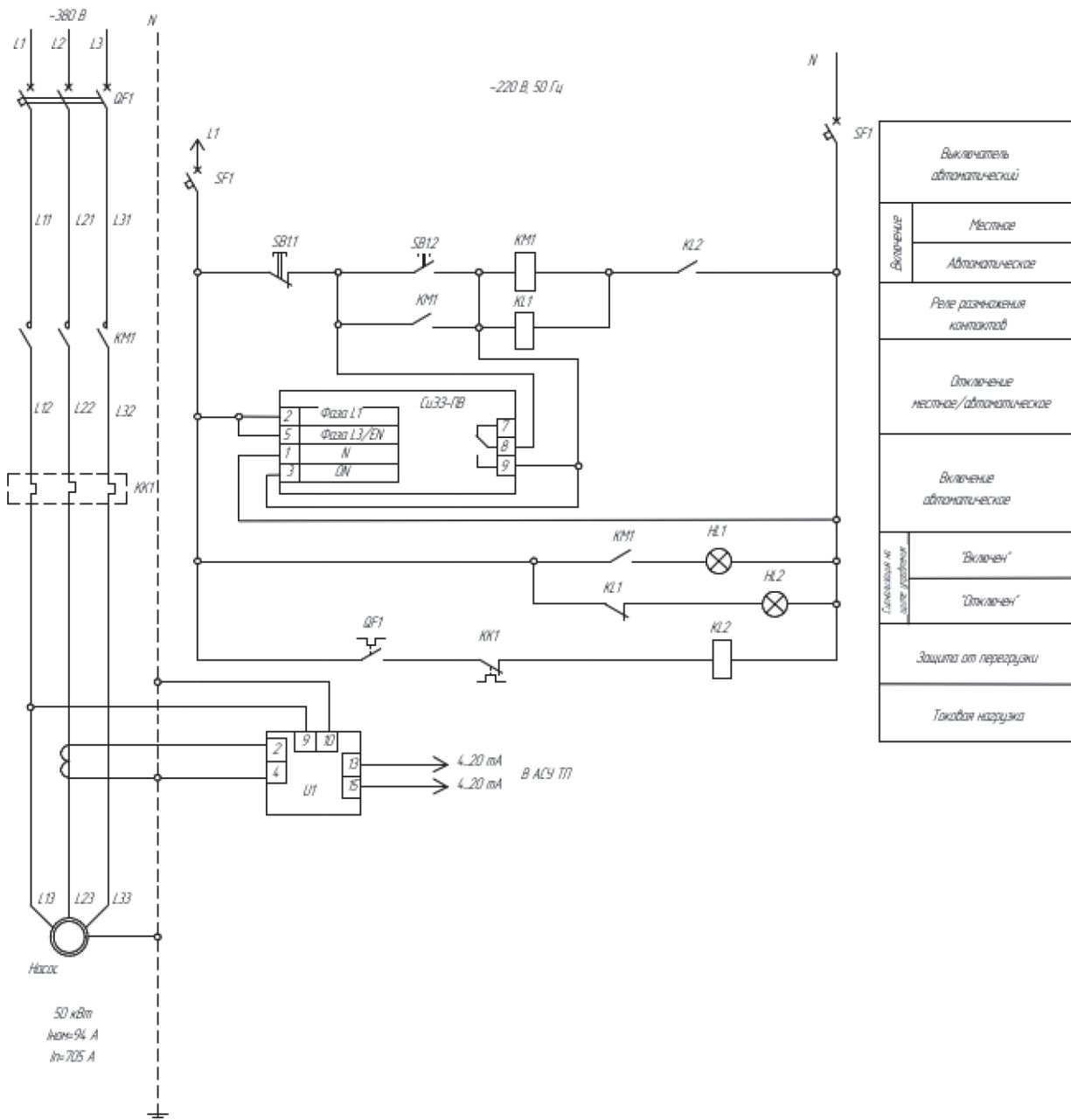


Рисунок 4. Схема защиты и управления АД

Figure 4. Protection and control scheme of asynchronous motor

**Вывод**

С учетом всех достоинств и недостатков предлагаемых решений, а также их стоимости, получен вывод, что самым эффективным и менее затратным мероприятием является разработка схем управления электродвигателем с применением устройства повторного самозапуска. Данное техническое решение позволяет избежать масштабных изменений схемы электроснабжения, сэконо-

мить на проектировании и реализации, поскольку внедрение предложенного решения не требует вмешательства проектных организаций и может быть реализовано электротехническим персоналом предприятия. Оно может иметь практическое применение на действующем производстве и позволит избежать негативного влияния нарушений в системе электроснабжения на технологический режим установки.

### Список источников

1. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
2. Рябов В.Г., Тархов Л.Г. Технологии органического и нефтехимического синтеза: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 263 с. ISBN 978-5-398-00064-1.
3. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 186 с. ISBN 978-5-383-00505-7.
4. Ершов С.В., Пигалов М.С. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12. С. 95–104. EDN: ZXGZJL.
5. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях Power quality in electrical systems: пер. с англ. А.Н. Рабодзея. М.: Додэка-XXI, 2008. 333 с. ISBN 978-5-94120-182-2.
6. Hussain Sh., Azah M., Nazri M., Khodijah M. Experimental Investigation of AC Contactor Ride through Capability during Voltage Sag // 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering / IEEE. Prague, 2010. S. 1. P. 664. doi:10.1109/EEEIC.2010.5489934.
7. Журавлев А.М. Повышение надежности полупроводниковых преобразователей и электроприводов объектов кислородно-ковертерного производства: дисс. канд. техн. наук. Челябинск, 2016. 163 с.
8. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Шклярский А.Я. Методы компенсации провалов и искажений напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий // Нефтяное хозяйство. 2014. № 8. С. 110–112. EDN: SKIXZF.
9. Динамические компенсаторы искажений напряжения DuSC: бюллетень 1608N/1608P: разработчик и изготовитель Rockwell Automation Inc. [Электронный ресурс]. Publication 1608-TD001B-EN-P, November 2018. 16 л. URL: [https://propribory.ru/static/upl/19-04-2023/-XWwsTdjxtE\\_vrJi/1608-td001\\_-en-p.pdf](https://propribory.ru/static/upl/19-04-2023/-XWwsTdjxtE_vrJi/1608-td001_-en-p.pdf).
10. Машенина Н.В. Влияние коэффициента мощности на работу электроустановок // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 4-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках выставки «Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение», Екатеринбург, 26–28 мая 2015 года. Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2015. С. 212–214. EDN: UUSAER.
11. Гуревич В.И. О режиме питания мощного контактора переменного тока при провалах напряжения в сети 0,4кВ // Электротехника и электроэнергетика. 2008. № 1. С. 70–73.
12. Носов К.Б., Дворак Н.М. Средства и способы самозапуска электродвигателей. Кемерово: Кемеровское кн. изд-во, 1985. 128 с.
13. Абидов К.Г. Самозапуск электроприводов насосных станций // Техника. Технологии. Инженерия. 2017. № 4 (6). С. 15–21. EDN: ZKBETZ.
14. Хашимов А.А., Абидов К.Г. Способ определения зоны энергоэффективного самозапуска насосной установки // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. седьмой всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Благовещенск, 04–06 июня 2013 года / Амурский государственный университет. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2013. С. 291–293. EDN: SAJTOT.
15. Система повторного включения (самозапуска) СиЭЗ-ПВ [Электронный ресурс]. URL: <http://binar-by.com/katalog-produktsii-npp-binar/sistema-povtornogo-vkljuchenija-samozapuska-sijez-pv/> (дата обращения: 15.10.2023).

### References

1. GOST R 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard R 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems]. Vved. 01.07.2014. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 19 p. [in Russian].
2. Ryabov V.G., Tarkhov L.G. *Tekhnologii organicheskogo i neftekhimicheskogo sinteza: ucheb. posobiye* [Technologies of Organic and Petrochemical Synthesis: Textbook]. Perm, Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta, 2008. 263 p. ISBN 978-5-398-00064-1. [in Russian].
3. Nepomnyashchiy V.A. *Ekonomicheskiye poteri ot narusheniya elektrosnabzheniya* [Economic Losses from Power Supply Disruptions]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 186 p. ISBN 978-5-383-00505-7. [in Russian].
4. Yershov S.V., Pigalov M.S. *Analiz sredstv i sposobov ogranicheniya vliyaniya provalov napryazheniya* [Analysis of Means and Methods of Limitation of Influence Voltage Fails]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki — News of Tula State University. Technical Science*, 2017, No. 12, pp. 95–104. EDN: ZXGZJL. [in Russian].

5. Kusko A., Tompson M. *Kachestvo energii v elektricheskikh setyakh: per. s angl.* A.N. Rabodzey. [Power Quality in Electrical Systems]. Moscow, Dodeka-XXI, 2008. 333 p. ISBN 978-5-94120-182-2. [in Russian].

6. Hussain Sh., Azah M., Nazri M., Khodijah M. Experimental Investigation of AC Contactor Ride through Capability during Voltage Sag. *2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEE*, Prague, 2010, S. 1, pp. 664. doi: 10.1109/EEEIC.2010.5489934.

7. Zhuravlev A.M. *Povysheniye nadezhnosti poluprovodnikovyykh preobrazovateley i elektroprivodov ob "yektov kislorodno-koverternogo proizvodstva: diss. kand. tekhn. nauk* [Increasing the Reliability of Semiconductor Converters and Electric Drives of Oxygen-Converter Production Facilities: Diss. Ph.D. Tech. Sci.]. Chelyabinsk, 2016. 163 p. [in Russian].

8. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Sychev Yu.A., Shklyarskiy A.Ya. Metody kompensatsii provalov i iskazheniy napryazheniya v elektricheskikh setyakh nefte dobyvayushchikh predpriyatii [The Methods of Voltage Dips and Distortion Compensation in Electrical Networks of Oil Production Enterprises]. *Neftyanoye khozyaystvo — Oil Industry*, 2014, No. 8, pp. 110–112. EDN: SKIXZF. [in Russian].

9. *Dinamicheskiye kompensatory iskazheniy napryazheniya DySC: byulleten' 1608N/1608P: razrabotchik i izgotovitel' Rockwell Automation Inc.* [Electronic Resource]. Publication 1608-TD001B-EN-P, November 2018. 16 l. URL: [https://propribory.ru/static/upl/19-04-2023/-XWwsTdjxtE\\_vrJi/1608-td001\\_-en-p.pdf](https://propribory.ru/static/upl/19-04-2023/-XWwsTdjxtE_vrJi/1608-td001_-en-p.pdf).

10. Mashenina N.V. Vliyaniye koeffitsiyenta moshchnosti na rabotu elektroustanovok [The Influence of Power Factor on the Operation of Electrical Installations]. *Sbornik dokladov 4-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Effektivnoye i kachestvennoye snabzheniye i ispol'zovaniye elektroenergii» v ramkakh vystavki «Energoberezheniye. Otopleniye. Ventilyatsiya. Vodosnabzheniye»*, Yekaterinburg, 26–28 maya 2015 goda. [Collection of Reports of the 4th International Scientific and Practical Conference «Efficient and High-Quality Supply and Use of Electricity» within the framework of the

Exhibition «Energy Saving. Heating. Ventilation. Water Supply», Ekaterinburg, May 26–28, 2015]. Yekaterinburg, OOO «Izdatel'stvo UMTS UPI», 2015, pp. 212–214. EDN: UUSAER. [in Russian].

11. Gurevich V.I. O rezhime pitaniya moshchnogo kontaktora peremennogo toka pri provalakh napryazheniya v seti 0,4kV [On the Power Supply Mode of a Powerful AC Contactor during Voltage Dips in the 0.4 kV Network]. *Elektrotehnika i elektroenergetika — Electrical Engineering and Electrical Power Engineering*, 2008, No. 1, pp. 70–73. [in Russian].

12. Nosov K.B., Dvorak N.M. *Sredstva i sposoby samozapuska elektrodvigatelye* [Means and Methods for Self-Starting Electric Motors]. Kemerovo, Kemerovskoye kn. izd-vo, 1985. 128 p. [in Russian].

13. Abidov K.G. Samozapusk elektroprivodov nasosnykh stantsiy [Self-Starting of Electric Drives of Pumping Stations]. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya — Technics. Technologies. Engineering*, 2017, No. 4 (6), pp. 15–21. EDN: ZKBETZ. [in Russian].

14. Khashimov A.A., Abidov K.G. Sposob opredeleniya zony energoeffektivnogo samozapuska nasosnoy ustanovki [A Method for Determining the Energy-Efficient Self-Start Zone of a Pumping Unit]. *Sbornik trudov sed'moy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Energetika: upravleniye, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»*, Blagoveshchensk, 04–06 iyunya 2013 goda, *Amurskiy gosudarstvennyy universitet* [Collection of Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Energy: Management, Quality and Efficiency of Energy Use», Amur State University, Blagoveshchensk, June 04–06, 2013]. 2013, pp. 291–293. EDN: SAJTOT. [in Russian].

15. *Sistema povtornogo vklyucheniya (samozapuska) SiEZ-PV* [Restart (Self-Start) System SiEZ-PV]. [Electronic Resource]. URL: <http://binar-by.com/katalog-produktsii-npp-binar/sistema-povtornogo-vkljuchenija-samozapuskasijez-pv/> (accessed 15.10.2023). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 29.10.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.

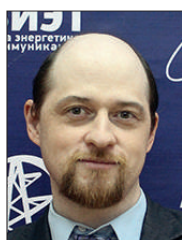
The article was submitted 29.10.2023; approved after reviewing 29.11.2023; accepted for publication 05.12.2023.

Научная статья

УДК 537.523.9

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-54-64

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОЗОНАТОРА СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ

*Денис Вилевич Максудов**Denis V. Maksudov**кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электромеханика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия*

### Актуальность

Применение озono-каталитических реакций является перспективным методом очистки воды, воздуха и выхлопных газов. Они могут быть использованы в том числе и для решения проблемы холодного старта автомобильного двигателя, позволяя проводить эффективную нейтрализацию токсичных примесей даже при низкой температуре. Оптимизация озono-каталитического устройства (по критерию минимизации удельных затрат энергии) требует разработки математической модели, учитывающей взаимное влияние друг на друга многочисленных параметров физических процессов, протекающих в каналах каталитического блока. Большое количество взаимовлияющих параметров актуализирует применение итерационных алгоритмов для численного решения системы уравнений математической модели.

### Цель исследования

Целью данной статьи является разработка математической модели физических процессов, протекающих в озонаторе, и создание на ее основе итерационного метода, который позволил бы определить изменение температуры, давления и состава газовой смеси по мере ее продвижения в каналах озонатора сотовой структуры, учитывая при этом взаимное влияние этих параметров друг на друга и на мощность барьерного разряда.

### Объекты исследования

Озоно-каталитическое устройство.

### Методы исследования

Математическое моделирование физических процессов.

### Результаты

Для решения системы уравнений, описывающей физические процессы в озono-каталитическом устройстве, был разработан итерационный алгоритм, позволяющий определить пространственное распределение параметров (температуры, давления, концентрации озона) в каналах каталитического блока сотовой структуры.

### Ключевые слова

озонатор,  
озono-каталитическое устройство, образование озона, холодный старт автомобильного двигателя, очистка выхлопных газов, газоразрядные процессы, математическое моделирование, итерационный алгоритм

**Для цитирования:** Максудов Д. В. Методика расчета озонатора сотовой структуры // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 54–64. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-54-64>.

## METHODOLOGY FOR CALCULATING AN OZONIZER WITH A HONEYCOMB STRUCTURE

### Relevance

The use of ozone-catalytic reactions is a promising method for purifying water, air and exhaust gases. They can be used, among other things, to solve the problem of cold starting of a car engine, allowing for the effective neutralization of toxic impurities even at low temperatures. Optimization of an ozone-catalytic device (according to the criterion of minimizing specific energy costs) requires the development of a mathematical model that takes into account the mutual influence of numerous parameters of physical processes occurring in the channels of the catalytic unit. A large number of mutually influencing parameters actualizes the use of iterative algorithms for the numerical solution of a system of equations of a mathematical model.

### Aim of research

The aim of this article is to develop a mathematical model of the physical processes occurring in the ozonizer, and to create on its basis an iterative method that is possible to determine the change in temperature, pressure and composition of the gas mixture as it moves through the channels of the ozonizer of a honeycomb structure, taking into account the mutual influence of these parameters to each other and to the power of the barrier discharge.

### Research objects

Ozone catalytic device.

### Research methods

Mathematical modeling of physical processes.

### Results

To solve the system of equations describing the physical processes in the ozone-catalytic device, an iterative algorithm was developed to determine the spatial distribution of parameters (temperature, pressure, ozone concentration) in the channels of the catalytic unit of the honeycomb structure.

### Keywords

ozonizer, ozone-catalytic device, ozone formation, cold start of an automobile engine, exhaust gas purification, gas-discharge processes, mathematical modeling, iterative algorithm

**For citation:** Maksudov D. V. Metodika rascheta ozonatora sotovoy struktury [Methodology for Calculating an Ozonizer with a Honeycomb Structure]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 54-64 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-54-64>.

### Введение

Озон, представляющий собой трехатомную модификацию кислорода, имеет широкий спектр применения в различных областях человеческой деятельности.

Анализ современной научно-технической литературы показывает значительный интерес исследователей к вопросам получения и применения озона. Его высокая окислительная способность делает привлекательной использование

озона, в том числе с целью обеззараживания (медицинских инструментов, пищевых продуктов и т.д.) [1–5], а также очистки воды, воздуха или выхлопных газов [6–16].

Одним из перспективных направлений применения озона является решение проблемы холодного старта автомобильного двигателя, т.е. очистка выхлопных газов в первые минуты работы двигателя, когда выхлопные газы содержат наибольшее количество токсичных при-



месей, а каталитический блок еще не прогреет, и реакции каталитической очистки не достаточно эффективны [17–21].

Как показывает анализ публикаций, одним из недостатков технических решений, применяющих озono-каталитические реакции, в том числе для очистки выхлопных газов [6–16], является то, что образование озона происходит в отдельном озонаторе, что приводит к значительным его потерям при транспортировке непосредственно в зону очистки.

Кроме того, как отмечается в [22], оптимизация процесса образования озона (по критерию минимизации удельных затрат энергии) требует разработки обобщенной математической модели, которая могла бы учитывать параметры многих физических процессов, протекающих в озono-каталитическом устройстве и оказывающих взаимное влияние друг на друга.

### Озono-каталитическое устройство

Для решения вышеуказанной проблемы холодного старта на кафедре электромеханики Уфимского университета науки и технологий было разработано озono-каталитическое устройство (озонатор), в котором для повышения эффективности работы образование озона происходит непосредственно в зоне катали-

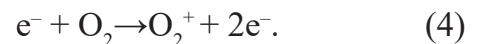
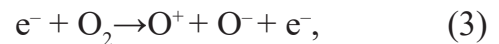
тической очистки выхлопных газов — в каналах каталитического блока сотовой структуры. Конструкция данного устройства приведена на рисунках 1 и 2.

### Математическая модель физических процессов в каналах озono-каталитического устройства сотовой структуры

В рассматриваемом озono-каталитическом устройстве основными реакциями образования и разложения озона являются реакции



которые протекают в каналах каталитического блока наряду с реакциями взаимодействия электронов барьерного разряда с молекулами кислорода



С учетом (1)–(4) изменение концентрации озона определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{d[\text{O}_3]}{dt} = K_1([\text{O}_2]_0 - [\text{O}_3]) - K_2[\text{O}_3], \quad (5)$$

где  $[\text{O}_3]$  — концентрация озона;

$[\text{O}_2]_0$  — начальная концентрация кислорода;

$$K_1 = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V}; \quad (6)$$

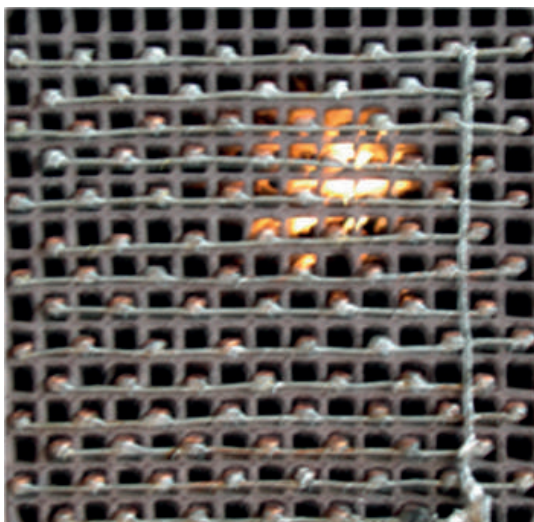
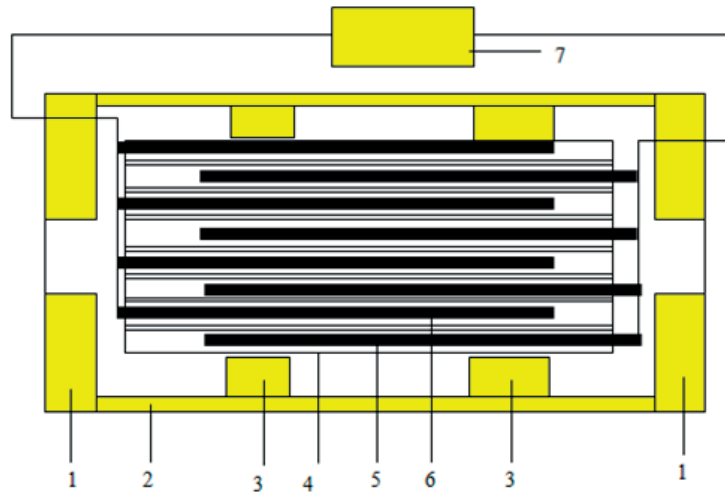


Рисунок 1. Озонатор сотовой структуры в поперечном разрезе

Figure 1. Ozonizer with honeycomb structure in cross section



1 — фланцы; 2 — диэлектрический корпус; 3 — изолирующие стойки; 4 — диэлектрик-катализатор сотовой структуры; 5, 6 — группы электродов разных потенциалов; 7 — высокочастотный источник переменного тока

1 — flanges; 2 — dielectric housing; 3 — insulating racks; 4 — dielectric-catalyst with honeycomb structure; 5, 6 — groups of electrodes of different potentials; 7 — high frequency alternating current source

**Рисунок 2.** Озонатор сотовой структуры в продольном разрезе

**Figure 2.** Ozonizer with honeycomb structure in longitudinal section

$$K_2 = A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V}; \quad (7)$$

$$dT = \frac{3600}{Q\rho_r C_r} \left( P \frac{dx}{L} - \Delta T \alpha S \right), \quad (8)$$

где  $P$  — активная мощность барьерного разряда;

$V$  — суммарный объем каналов каталитического блока;

$R$  — универсальная газовая постоянная;

$T$  — абсолютная температура;

$E_{1a}, E_{2a}$  — энергии активации реакций (1) и (2);

$A_1, A_2$  — факторы частоты реакций (1) и (2).

При этом мощность барьерного разряда зависит от температуры, давления и состава газовой смеси, проходящей через каналы каталитического блока.

На пути  $dx$  изменение температуры газовой смеси с плотностью  $\rho_r$  и теплоемкостью  $C_r$ , проходящей по каналу длиной  $L$  при объемном расходе  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч,

где  $\Delta T$  — разность между температурой данной газовой смеси и температурой среды, в которую производится отвод тепла;

$S$  — поверхность теплообмена;

$\alpha$  — коэффициент теплообмена, который, в свою очередь, зависит от температуры, давления, состава газа и других параметров.

### Итерационный алгоритм

#### для получения численного решения

Взаимное влияние большого числа параметров актуализирует применение численных методов для получения совместного решения уравнений (5)–(8). Для этого был разработан итерационный метод, позволяющий определить температуру, давление и концентрацию озона вдоль длины каналов каталитического блока:

$$\left. \begin{aligned}
& T_{0,j} = T_{r0}; \\
& P_{0,j} = P_{\text{раб}}; \\
& [O_3]_{0,j} = 0; \\
& \Delta T_{i,j} = \begin{cases} \frac{3600 \left[ P(\text{Str}) \frac{\Delta x}{L} - \frac{T_{i-1,j} - T_{i-1,j-1}}{R_{\text{обш}j}(\text{Str})} - \frac{T_{i-1,j} - T_c}{R_{\text{эл}\Sigma}(\text{Str})} \right]}{Q \rho_f C_r} & \text{для } j = \sqrt{N} / 2; \\ \frac{3600 \left[ P(\text{Str}) \frac{\Delta x}{L} - \frac{T_{i-1,j} - T_{i-1,j-1}}{R_{\text{обш}j}(\text{Str})} - \frac{T_{i-1,j} - T_c}{R_{\text{эл}\Sigma}(\text{Str})} + \frac{T_{i-1,j+1} - T_{i-1,j}}{R_{\text{обш}j+1}(\text{Str})} \right]}{Q \rho_f C_r} & \text{для } j < \sqrt{N} / 2; \end{cases} \\
& \Delta [O_3]_{i,j} = K_0 \frac{P(\text{Str})}{V} \left( \begin{array}{l} A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT_{i-1,j}}\right) \left( [O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j} \right) - \\ - A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT_{i-1,j}}\right) [O_3]_{i-1,j} \end{array} \right) \Delta t; \\
& \Delta p_{i,j} = \frac{-64QN \sqrt{T_{i-1,j}} \times M([O_3]_{i-1,j}) k}{7200 \sqrt{6R\pi d^2} \left[ h - d_n (\sqrt{N} + 1) \right]^4} \Delta x \\
& T_{i,j} = T_{i-1,j} + \Delta T_{i,j}; \\
& P_{i,j} = P_{i-1,j} + \Delta p_{i,j}; \\
& [O_3]_{i,j} = [O_3]_{i-1,j} + \Delta [O_3]_{i,j},
\end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $i$  — номер интервала длины канала каталитического блока;

$N$  — число каналов каталитического блока;

$\sqrt{N} / 2$  — число слоев каналов от центра блока до его внешней поверхности;

$j$  — номер слоя;

$T_{r0}$  — температура газовой смеси в момент входа в канал каталитического блока;

$P_{\text{раб}}$  — рабочее давление газовой смеси, Па;

$T_{i,j}$ ,  $p_{i,j}$ ,  $[O_3]_{i,j}$  — соответственно температура, давление и концентрация озона на  $i$ -м интервале в канале  $j$ -го слоя;

Str — строка, в которой перечисляются элементы массивов значений температуры, давления и концентрации озона, найденные на предыдущем  $(i-1)$ -м шаге для  $j$ -го слоя каналов, Str = ' $T_{i-1,j}$ ,  $[O_3]_{i-1,j}$ ,  $P_{i-1,j}$ ';

$M([O_3]_{i-1,j})$  — зависимость молярной массы газовой смеси от концентрации озона;

$$M([O_3]_{i-1,j}) = \sum_{k=1}^n (M_{X_k} [X_k]_{i-1,j}) + M_{O_2} ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j}) + M_{O_3} ([O_3]_{i-1,j}), \quad (10)$$

где  $[X]_k$  — концентрация  $k$ -го компонента газовой смеси;

$d_{X_k}$  — диаметр молекул  $k$ -го компонента;

$M_{X_k}$  — молярная масса  $k$ -го компонента;

$n$  — число газов, входящих в состав смеси (кроме кислорода и озона);

$[O_2]_0$  — начальная концентрация кислорода в газовой смеси;

$\Delta t$  — время, за которое газовая смесь пройдет  $i$ -й интервал канала длиной  $\Delta x$ , ч;

$$\Delta t = \frac{S_{\text{сеч}} \Delta x}{Q/3600N} = \left( \frac{h - D_{\text{д}}(\sqrt{N} + 1)}{\sqrt{N}} \right)^2 \frac{3600LN}{Qn}, \quad (11)$$

где  $Q$  — объемный расход потока газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$L$  — длина канала;

$h$  — высота/ширина блока,  $\text{м}$ ;

$D_{\text{д}}$  — толщина диэлектрических стенок между каналами,  $\text{м}$ ;

$S_{\text{сеч}}$  — площадь поперечного сечения канала,  $\text{м}^2$ .

Общее сопротивление тепловому потоку через стенки каналов  $R_{\text{общ},j}$  в (9)

$$R_{\text{общ},j}(\text{Str}) = \begin{cases} R_{\text{вн}}(\text{Str}) + R_{\text{д}} + R_{\text{н}}(T_{i-1,j}) & \text{для } j = 0; \\ 2R_{\text{вн}}(\text{Str}) + R_{\text{д}} & \text{для } j > 0; \end{cases} \quad (12)$$

где  $R_{\text{вн}}$  — сопротивление переходу тепла на внутренней поверхности канала (телопередачи при принужденной конвекции вследствие движения потока газа через канал);

$R_{\text{н}}$  — сопротивление переходу тепла на наружной поверхности блока (телопередачи при естественной или принужденной конвекции, соответственно, при отсутствии или наличии системы охлаждения);

$R_{\text{д}}$  — тепловое сопротивление слоя диэлектрика, разделяющего каналы каталитического блока;

$R_{\text{эл}\Sigma}$  — сопротивление тепловому потоку, передаваемому через электрод от газа к окружающей среде:

$$R_{\text{вн}}(\text{Str}) = \frac{1}{\alpha_{\text{нк}}(\text{Str})S};$$

$$R_{\text{эл}\Sigma}(\text{Str}) = \frac{1}{\alpha_{\text{нк}}(\text{Str}) \times (2\pi R_{\text{эл}} \Delta x)} + \frac{\Delta x \times i}{\lambda_{\text{д}}(\pi R_{\text{эл}}^2)};$$

$$R_{\text{д}} = \frac{D_{\text{д}}}{\lambda_{\text{д}}S}; \quad R_{\text{н}}(T_{i-1,j}) = \frac{1}{\alpha_{\text{ек}}(T_{i-1,j})S}, \quad (13)$$

где  $\lambda_{\text{д}}$ ,  $\lambda_{\text{д}}$  — соответственно коэффициенты теплопроводности материалов электрода и диэлектрического барьера;

$R_{\text{эл}}$  — радиус электрода,

$S$  — площадь теплообмена;

$$S = \begin{cases} \frac{h - D_{\text{д}}(\sqrt{N} + 1)}{\sqrt{N}} \Delta x & \text{для не угловых каналов;} \\ 2 \frac{h - D_{\text{д}}(\sqrt{N} + 1)}{\sqrt{N}} \Delta x & \text{для угловых каналов,} \end{cases}$$

коэффициент теплообмена для случая принудительной конвекции:

$$\alpha_{\text{нк}}(\text{Str}) = 0,023 \frac{ik\sqrt{R}}{3\pi^{3/2}D} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{6}\pi D}{\sqrt{RkS}}\right)^4 \left(\frac{\sqrt{3\pi/2}C}{iR}\right)^{0,3}} \times (T_{i-1,j})^{-0,7} Q^{0,8} [d([O_3]_{i-1,j})]^{-0,4} [M([O_3]_{i-1,j})]^{0,2} (p_{i-1,j})^{0,8}, \quad (14)$$

а коэффициенты при естественной конвекции возле горизонтальной  $\alpha_{\text{ек(в)}}$  и вертикальной  $\alpha_{\text{ек(г)}}$  внешних поверхностей каталитического блока соответственно:

$$\alpha_{\text{ек(г)}}(T_{i-1,0}) = 0,54 \frac{i^{3/4} \sqrt{pk}}{3\pi^{7/8} d \sqrt{T_{i-1,0}}} \times \sqrt[4]{\frac{\sqrt{54}gC\Delta T}{L}}; \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{ек(в)}}(T_{i-1,j}) = \frac{ik}{3\pi^{3/2}d^2L} \sqrt{\frac{RT_{i-1,j}}{M}} \times$$

$$\times \left( 0,68 + \frac{0,67d \sqrt[4]{\frac{\sqrt{54}\pi^{5/2}g\Delta TL^3C \left(\frac{pM}{R}\right)^2}{ik^2}}}{T_{i-1,j}} \left[ 1 + \left( \frac{0,492 \frac{ik}{3\pi^{3/2}}}{\frac{kT}{\sqrt{6}pp} \frac{pM}{RT_{i-1,j}}} C \right)^{9/16} \right]^{4/9} \right), \quad (16)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;

$d$  — эффективный диаметр молекул газа;

$i$  — число степеней свободы молекул газа;

$g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$L$  — характерный размер,  $\text{м}$ ;

$\Delta T$  — разность температур между нагретой стенкой и внешней охлаждающей средой;

$C$  — теплоемкость среды.

При наличии системы охлаждения  $R_{\text{н}}$  определяется по формуле:

$$R_n = \frac{(T_{\text{охл}})^{1/4} d_{\text{охл}}}{\frac{1,328}{H-h} \sqrt[3]{C_{\text{охл}} \left(\frac{i}{3\pi^{3/2}}\right)^2 \sqrt{\frac{p_{\text{охл}} Q_{\text{охл}} k}{3600(H+h)} \left(\frac{6\pi^2 M_{\text{охл}}}{R}\right)^{1/2}}} S}, \quad (17)$$

где  $T_{\text{охл}}$ ,  $p_{\text{охл}}$ ,  $Q_{\text{охл}}$ ,  $d_{\text{охл}}$ ,  $M_{\text{охл}}$  — соответственно температура, давление, объемный расход, средний диаметр молекул и молярная масса охлаждающего воздуха.

Мощность барьерного разряда в (9) определяется на  $i$ -м интервале как функция от температуры, давления и состава газовой смеси:

$$P(\text{Str}) = 2f \frac{C_6(T_{i-1,j})}{C_6(T_{i-1,j}) + C_B(\text{Str})} (U_0 - u_{\text{пр}}(\text{Str})) \times u_{\text{пр}}(\text{Str}) \times \left(1 - \frac{C_6(T_{i-1,j})}{C_6(T_{i-1,j}) + C_B(\text{Str})}\right) \times N \times (u_{\text{пр}}(\text{Str}))^2 \left(1 - \left(\frac{C_6(T_{i-1,j})}{C_6(T_{i-1,j}) + C_B(\text{Str})}\right)^2\right), \quad (18)$$

где емкость разрядного (воздушного) промежутка:

$$C_B(\text{Str}) = 8\varepsilon_0\varepsilon_B \int_{\frac{\pi}{4}}^0 \ln\left(\frac{R_{\text{эл}} \cos(\alpha)}{R_{\text{эл}} + \delta}\right) d\alpha = 8\varepsilon_0 L \left(1 + 4\pi \sum_{i=1}^m \frac{N_A p_{i-1,j}}{RT_{i-1,j}}\right) \quad (19)$$

$$[X_i] \left(\alpha_i + \frac{\mu_i^2}{3kT_{i-1,j}}\right) \int_{\frac{\pi}{4}}^0 \ln\left(\frac{R_{\text{эл}} \cos(\alpha)}{R_{\text{эл}} + \delta}\right) d\alpha;$$

где  $m$  — число газов, входящих в смесь;

$[X_i]$  — доля  $i$ -го газа в смеси;

$\alpha_i$  — поляризуемость  $i$ -го газа;

$\mu_i$  — дипольный момент  $i$ -го газа (для газов, состоящих из неполярных молекул, дипольный момент принимается равным нулю);

$\varepsilon_B$  — диэлектрическая проницаемость газовой смеси в разрядном (воздушном) промежутке;

$\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;

$L$  — длина электрода;

$\delta$  — минимальная ширина разрядного промежутка:

$$\delta = \frac{(h - D_d (\sqrt{N} - 1))}{2\sqrt{N}} - R_{\text{эл}}. \quad (20)$$

Емкость диэлектрического барьера (стенки канала каталитического блока) в (18):

$$C_6(T) = \frac{4\varepsilon_0\varepsilon(T) [h - D_d (\sqrt{N} + 1)l]}{2D_d \sqrt{N}}, \quad (21)$$

где  $l$  — длина каталитического блока, м;

$\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;

$\varepsilon(T)$  — зависимость диэлектрической проницаемости от температуры, в частности, для оксида алюминия:

$$\varepsilon(T) = 6,919 \times e^{0,001 \times T}. \quad (22)$$

Напряжение пробоя в (14) определяется по формуле:

$$u_{\text{пр}}(\text{Str}) = \frac{\pi \langle d^2 \rangle \langle E_{\text{и}} \rangle p_{i-1,j} \delta}{4kT \ln \left( \frac{\pi \langle d^2 \rangle p_{i-1,j} \delta}{4kT \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} \right)}, \quad (23)$$

где  $\langle d \rangle$ ,  $\langle E_{\text{и}} \rangle$  — соответственно средние значения для диаметра и энергии ионизации молекул газа, зависящие от его состава (в том числе и от концентрации озона);

$\gamma$  — коэффициент вторичной электронной эмиссии:

$$\gamma_{\text{и}}(T, p, E) = C \left( \frac{kTe_{\text{эл}}E}{\sqrt{2\pi} \langle d \rangle^2 p} - E_{\text{вых0}} + \sqrt{\frac{e_{\text{эл}}E}{4\pi\varepsilon_0}} \right), \quad (24)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, кВ/м;

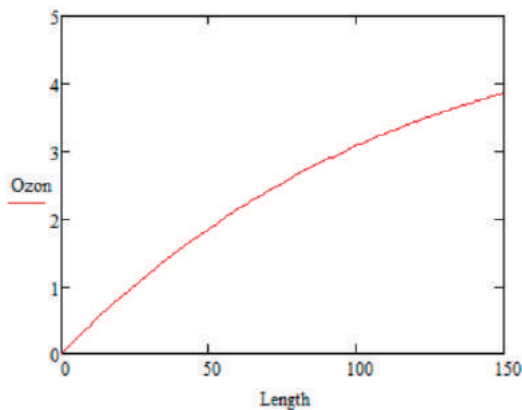
$e_{\text{эл}}$  — заряд электрона;

$E$  — напряженность электрического поля;

$E_{\text{вых0}}$  — работа выхода электрона при нулевой напряженности электрического поля.

Пример изменения концентрации озона вдоль длины канала каталитиче-

ского блока, вычисленный в соответствии с (9)–(24), показан на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Распределение концентрации озона вдоль каналов каталитического блока, вычисленное в результате итерационного процесса (9) с учетом (10)–(24), %

**Figure 3.** Distribution of ozone concentration along the channels of the catalytic block, calculated as a result of the iterative process (9) taking into account (10)–(24), %

### Выводы

В статье показан итерационный алгоритм, разработанный на основе математического моделирования физических процессов в озono-каталитическом устройстве, который позволяет определять изменение температуры, давления и состава газовой смеси по мере ее продвижения в каналах каталитического блока озонатора. При этом учитываются:

— изменение состава газовой смеси, ее температуры, давления и диэлектрической проницаемости по мере движения через каналы каталитического блока;

— влияние теплопроводности диэлектрика каталитического блока и материала электродов, влияние скорости движения газовой смеси и ее состава, параметров внешнего охлаждения озонатора (или естественной конвекции при отсутствии системы охлаждения) на распределение температуры в каналах каталитического блока озонатора;

— влияние температуры, давления газовой смеси и напряженности электрического поля на коэффициент вторичной электронной эмиссии;

— влияние температуры, давления и состава газовой смеси, пространственной структуры распределения напряженности электрического поля, частоты и амплитуды питающего напряжения, характеристик диэлектрического наполнения, конструктивных параметров озонатора на напряжение пробоя разрядного промежутка и, как следствие, на мощность барьерного разряда;

— влияние температуры, давления и состава газовой смеси на изменение концентрации озона в каналах каталитического блока, а также на распределение напряженности электрического поля.

### Список источников

1. Calabrese E.J. Human and Ecological Risk Assessment // IOA Ozone/CRC Press. Inc., USA. 1997. Vol. 3/6. P. 1–95.
2. Cheolwoo Bong, Ji Young Choi, Jinseung Bae, Sungsu Park, Kwan Soo Ko, Moon Soo Bak, Hae Suk Cheong. PHI-004 — Effectiveness of Ozone Generated by Dielectric Barrier Discharge Plasma Reactor against Multidrug-Resistant Bacteria and Clostridium Difficile Spore // International Journal of Antimicrobial Agents. September 2021. Vol. 58. Supp. 1. 2100412. doi: 10.21203/rs.3.rs-1464615/v1.
3. Niveditha A., Pandiselvam R., Prasath V. Arun, Sushil Kumar Singh, Khalid Gul, Kothakota

Anjineyulu. Application of Cold Plasma and Ozone Technology for Decontamination of Escherichia Coli in Foods — a review // Food Control. December 2021. Vol. 130. 108338. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108338.

4. Soumya Nagashri Manjunath, M. Sakar, Manmohan Katapadi, R. Geetha Balakrishna. Recent Case Studies on the Use of Ozone to Combat Coronavirus: Problems and Perspectives // Environmental Technology & Innovation. February 2021. Vol. 21. 101313. doi: 10.1016/j.eti.2020.101313.

5. Jai Hyuk Choi, Inho Han, Hong Koo Baik, Mi Hee Lee, Dong-Wook Han, Jong-Chul Park, In-Seob Lee, Kie Moon Song, Yong Sik Lim. Analysis of Sterilization Effect by Pulsed Dielectric

Barrier Discharge // *Journal of Electrostatics*. January 2006. Vol. 64. Issue 1. P. 17–22. <https://doi.org/10.1002/bdd.479>.

6. Emile Salomon, Massima Mouele, Jimoh Oladejo Tijani, Kassim Badmus. A Critical Review on Ozone and Co-Species, Generation and Reaction Mechanisms in Plasma Induced by Dielectric Barrier Discharge Technologies for Wastewater Remediation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. October 2021. Vol. 9, Issue. 5. doi: 10.1016/j.jece.2021.105758.

7. Biyuan Liu, Jian Ji, Boge Zhang, Wenjun Huang, Yanling Gan, Dennis Y. C. Leung, Haibao Huang. Catalytic Ozonation of VOCs at Low Temperature: A Comprehensive Review // *Journal of Hazardous Materials*. 15 January 2022. Vol. 422. 126847. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126847.

8. Zhiman Zhang, Li Xiang, Fawei Lin, Zhi Wang, Beibei Yan, Guanyi Chen. Catalytic Deep Degradation of Cl-VOCs with the Assistance of Ozone at Low Temperature over MnO<sub>2</sub> Catalysts // *Chemical Engineering Journal*. 15 December 2021, Vol. 426, 130814. doi:10.1016/j.cej.2021.130814.

9. Yang Li, Defu Che, Chenglong Yang, Mingyu Yao, Tingwen Zhao, Kangli Fu, Hanchen Zhao. Engineering Practice and Economic Analysis of Ozone Oxidation Wet Denitrification Technology // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. January 2021. Vol. 29. P. 401–408. doi: 10.1016/j.cjche.2020.08.042.

10. Young Sun Mok, Heon-Ju Lee, Mirosław Dors, Jerzy Mizeraczyk. Improvement in Selective Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides by Using Dielectric Barrier Discharge // *Chemical Engineering Journal*. 1 June 2005. Vol. 110. Issue 1–3. P. 79–85. doi: 10.1016/j.cej.2005.02.032.

11. Kajia Wei, Zhuo Wang, Changpei Ouyang, Xiaoxin Cao, Peng Liang, Xia Huang, Xiaoyuan Zhang. A Hybrid Fluidized-Bed Reactor (HFBR) Based on Arrayed Ceramic Membranes (ACMs) Coupled with Powdered Activated Carbon (PAC) for Efficient Catalytic Ozonation: A Comprehensive Study on a Pilot Scale // *Water Research*. 15 April 2020. Vol. 173. 115536. doi: 10.1016/j.watres.2020.115536.

12. Rasool Pelalak, Reza Alizadeh, Eslam Gharehabani. Enhanced Heterogeneous Catalytic Ozonation of Pharmaceutical Pollutants Using a Novel Nanostructure of Iron-Based Mineral Prepared via Plasma Technology: A Comparative Study // *Journal of Hazardous Materials*. 15 June 2020. Vol. 392. 122269. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122269.

13. Haixia Wu, Jiawei Fan, Weigang Chen, Chenwei Yang. Dielectric Barrier Discharge-Coupled Fe-Based Zeolite to Remove Ammonia

Nitrogen and Phenol Pollutants from Water // *Separation and Purification Technology*. 15 July 2020. Vol. 243. 116344. doi: 10.1016/j.seppur.2019.116344.

14. Xiaozhi Lin, Xufang Li, Jiaoran Fei, Luming Ma, Yuanxing Huang. In-situ Growing Protective Cr-Substituted Goethite Film on Iron Shavings (Fe<sub>0</sub>) as Efficient Catalytic Ozonation Catalysts: A Comparative Study // *Journal of Cleaner Production*. 15 March 2021. Vol. 288. 125653. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125653.

15. Kelar J., Přibyl R., Pazderka M., Kelar Tučeková Z., Zemánek M., Černák M. Change of Fundamental Properties of Dielectric Barrier Discharge due to the Alumina-Based Barrier Layer Composition // *Vacuum*. April 2020. Vol. 174. 109180. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109180.

16. Zhao Zhang, Song Zhou, Hongyuan Xi, Weijian Zhou. Study on Removing NO from Simulated Marine Diesel Engine Exhaust Gas Using the Novel Composite System of Ozone-Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>/(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO // *Chemical Engineering Journal*. 29 September 2021. 132707. doi: 10.1016/j.cej.2021.132707.

17. Maksudov D.V., Ismagilov F.R., Khairulin I.Kh., Khairulin S.R., Ismagilov Z.R. Study of Ozone Generation in the Bed of Heterogeneous Catalysts of Various Geometry // *Eurasian Chemical Technological Journal*. 2002. Vol. 4. No. 4. P. 271–276. doi: 10.18321/ectj544.

18. Ismagilov F.R., Khairulin I.K., Maksudov D.V., Okhotnikov M.V. Investigation of Ozone Concentration in the Ozone-Catalytic Device for Exhaust Gas Purification // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. No. 537(3). 032109. doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032109.

19. Maksudov D.V., Okhotnikov M.V. Modeling of the Barrier Discharge in the Exhaust Gases of Automobile // *Proceedings ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*. 2019. 8949981. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949981.

20. Maksudov D.V., Okhotnikov M.V. Applying of Ozone-Catalytic Device for Decision of «Cold Start» Problem of Automobile Engine // *Proceedings ICOECS 2020. 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*. 2020. 9278495. doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278495.

21. Maksudov D.V. Modeling of Ozone Formation in Ozone-Catalytic Device Honeycomb Structure // *Proceedings ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*. 2021. P. 19–23. doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657291.

22. Ainy Hafeez, Syed Ali Ammar Taqvi, Tahir Fazal, Fahed Javed, Zakir Khan, Umme Salma Amjad, Awais Bokhari, Nasir Shehzad, Naim Rashid, Saifur Rehman, Fahad Rehman. Optimization on Cleaner Intensification of Ozone Production Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Parametric and Comparative Study // *Journal of Cleaner Production*. 10 April 2020. Vol. 252. 119833. doi: 10.1016/j.jiec.2021.07.018.

### References

1. Calabrese E.J. Human and Ecological Risk Assessment. *IOA Ozone/CRC Press*. Inc., USA. 1997. Vol. 3/6. P. 1–95.
2. Cheolwoo Bong, Ji Young Choi, Jinseung Bae, Sungsu Park, Kwan Soo Ko, Moon Soo Bak, Hae Suk Cheong. PHI-004 — Effectiveness of Ozone Generated by Dielectric Barrier Discharge Plasma Reactor against Multidrug-Resistant Bacteria and Clostridium Difficile Spore. *International Journal of Antimicrobial Agents*, September 2021, Vol. 58, Supp. 1, 2100412. doi: 10.21203/rs.3.rs-1464615/v1.
3. Niveditha A., Pandiselvam R., Prasath V. Arun, Sushil Kumar Singh, Khalid Gul, Kothakota Anjineyulu. Application of Cold Plasma and Ozone Technology for Decontamination of Escherichia Coli in Foods — a review. *Food Control*, December 2021, Vol. 130, 108338. doi: 10.1016/j.foodcont.2021.108338.
4. Soumya Nagashri Manjunath, M. Sakar, Manmohan Katapadi, R. Geetha Balakrishna. Recent Case Studies on the Use of Ozone to Combat Coronavirus: Problems and Perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, February 2021, Vol. 21, 101313. doi: 10.1016/j.eti.2020.101313.
5. Jai Hyuk Choi, Inho Han, Hong Koo Baik, Mi Hee Lee, Dong-Wook Han, Jong-Chul Park, In-Seob Lee, Kie Moon Song, Yong Sik Lim. Analysis of Sterilization Effect by Pulsed Dielectric Barrier Discharge. *Journal of Electrostatics*, January 2006, Vol. 64, Issue 1, pp. 17–22. <https://doi.org/10.1002/bdd.479>.
6. Emile Salomon, Massima Mouele, Jimoh Oladejo Tijani, Kassim Badmus. A Critical Review on Ozone and Co-Species, Generation and Reaction Mechanisms in Plasma Induced by Dielectric Barrier Discharge Technologies for Wastewater Remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, October 2021. Vol. 9, Iss. 5. doi: 10.1016/j.jece.2021.105758.
7. Biyuan Liu, Jian Ji, Boge Zhang, Wenjun Huang, Yanling Gan, Dennis Y. C. Leung, Haibao Huang. Catalytic Ozonation of VOCs at Low Temperature: A Comprehensive Review. *Journal of*

*Hazardous Materials*, 15 January 2022, Vol. 422, 126847. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126847.

8. Zhiman Zhang, Li Xiang, Fawei Lin, Zhi Wang, Beibei Yan, Guanyi Chen. Catalytic Deep Degradation of Cl-VOCs with the Assistance of Ozone at Low Temperature over MnO<sub>2</sub> Catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 15 December 2021, Vol. 426, 130814. doi:10.1016/j.cej.2021.130814.

9. Yang Li, Defu Che, Chenglong Yang, Mingyu Yao, Tingwen Zhao, Kangli Fu, Hanchen Zhao. Engineering Practice and Economic Analysis of Ozone Oxidation Wet Denitrification Technology. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, January 2021, Vol. 29, pp. 401–408. doi: 10.1016/j.cjche.2020.08.042.

10. Young Sun Mok, Heon-Ju Lee, Mirosław Dors, Jerzy Mizeraczyk. Improvement in Selective Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides by Using Dielectric Barrier Discharge. *Chemical Engineering Journal*, 1 June 2005, Vol. 110, Iss. 1–3, pp. 79–85. doi: 10.1016/j.cej.2005.02.032.

11. Kajia Wei, Zhuo Wang, Changpei Ouyang, Xiaoxin Cao, Peng Liang, Xia Huang, Xiaoyuan Zhang. A Hybrid Fluidized-Bed Reactor (HFBR) Based on Arrayed Ceramic Membranes (ACMs) Coupled with Powdered Activated Carbon (PAC) for Efficient Catalytic Ozonation: A Comprehensive Study on a Pilot Scale. *Water Research*, 15 April 2020, Vol. 173, 115536. doi: 10.1016/j.watres.2020.115536.

12. Rasool Pelalak, Reza Alizadeh, Eslam Gharehabani. Enhanced Heterogeneous Catalytic Ozonation of Pharmaceutical Pollutants Using a Novel Nanostructure of Iron-Based Mineral Prepared via Plasma Technology: A Comparative Study. *Journal of Hazardous Materials*, 15 June 2020, Vol. 392, 122269. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122269.

13. Haixia Wu, Jiawei Fan, Weigang Chen, Chenwei Yang. Dielectric Barrier Discharge-Coupled Fe-Based Zeolite to Remove Ammonia Nitrogen and Phenol Pollutants from Water. *Separation and Purification Technology*, 15 July 2020, Vol. 243, 116344. doi: 10.1016/j.seppur.2019.116344.

14. Xiaozhi Lin, Xufang Li, Jiaoran Fei, Luming Ma, Yuanxing Huang. In-situ Growing Protective Cr-Substituted Goethite Film on Iron Shavings (Fe<sub>0</sub>) as Efficient Catalytic Ozonation Catalysts: A Comparative Study. *Journal of Cleaner Production*, 15 March 2021, Vol. 288, 125653. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125653.

15. Kelar J., Přibyl R., Pazderka M., Kelar Tučeková Z., Zemánek M., Černák M. Change of Fundamental Properties of Dielectric Barrier Discharge due to the Alumina-Based Barrier Layer



Composition. *Vacuum*, April 2020, Vol. 174, 109180. doi:10.1016/j.vacuum.2020.109180.

16. Zhao Zhang, Song Zhou, Hongyuan Xi, Weijian Zhou. Study on Removing NO from Simulated Marine Diesel Engine Exhaust Gas Using the Novel Composite System of Ozone- $\text{Na}_2\text{SO}_3/(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . *Chemical Engineering Journal*, 29 September 2021, 132707. doi: 10.1016/j.cej.2021.132707.

17. Maksudov D.V., Ismagilov F.R., Khairulin I.Kh., Khairulin S.R., Ismagilov Z.R. Study of Ozone Generation in the Bed of Heterogeneous Catalysts of Various Geometry. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2002, Vol. 4, No. 4, pp. 271–276. doi: 10.18321/ectj544.

18. Ismagilov F.R., Khairulin I.K., Maksudov D.V., Okhotnikov M.V. Investigation of Ozone Concentration in the Ozone-Catalytic Device for Exhaust Gas Purification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, No. 537(3), pp. 032109. doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032109.

19. Maksudov D.V., Okhotnikov M.V. Modeling of the Barrier Discharge in the Exhaust Gases of Automobile. *Proceedings ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical*

*Complexes and Systems*, 2019, 8949981. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949981.

20. Maksudov D.V., Okhotnikov M.V. Applying of Ozone-Catalytic Device for Decision of «Cold Start» Problem of Automobile Engine, *Proceedings — ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2020, 9278495. doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278495.

21. Maksudov D.V. Modeling of Ozone Formation in Ozone-Catalytic Device Honeycomb Structure. *Proceedings ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2021, pp. 19–23. doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657291.

22. Ainy Hafeez, Syed Ali Ammar Taqvi, Tahir Fazal, Fahed Javed, Zakir Khan, Umme Salma Amjad, Awais Bokhari, Nasir Shehzad, Naim Rashid, Saifur Rehman, Fahad Rehman. Optimization on Cleaner Intensification of Ozone Production Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Parametric and Comparative Study. *Journal of Cleaner Production*. 10 April 2020, Vol. 252, 119833. doi: 10.1016/j.jiec.2021.07.018.

*Статья поступила в редакцию 22.10.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.*

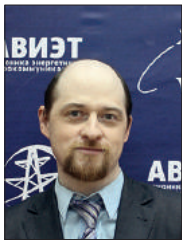
*The article was submitted 22.10.2023; approved after reviewing 29.11.2023; accepted for publication 05.12.2023.*

Научная статья

УДК 537.523.9

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-65-74

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА В ОЗОНАТОРЕ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ

*Денис Вилевич Максудов***Denis V. Maksudov**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электромеханика»,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

### Актуальность

В современном мире все большее внимание уделяется вопросам экологии. Одним из эффективных способов решения экологических проблем является применение озона — аллотропной модификации кислорода, которая обладает высокими окислительными способностями и может быть использована для очистки и стерилизации воды, воздуха и выхлопных газов.

Вместе с тем распространению технологий, связанных с применением озона, препятствует их энергоемкость. В связи с этим актуальной задачей является оптимизация конструкции озонаторов и режима его питания для уменьшения удельных затрат энергии на получение озона.

### Цель исследования

Целью данной статьи является исследование зависимости эффективности образования озона от частоты питающего напряжения и определения оптимальной частоты, при которой данная эффективность достигала бы максимального значения.

### Объекты исследования

Озонатор.

### Методы исследования

Математическое моделирование физических процессов, применение итерационного метода достижения решения.

### Результаты

Получено выражение для определения распределения напряженности электрического поля в разрядном промежутке. Разработан итерационный алгоритм, в результате работы которого получены графики зависимости критического значения частоты от амплитуды питающего напряжения, а также от температуры и давления газа, проходящего через разрядный промежуток.

### Ключевые слова

озонатор сотовой структуры, образование озона, газоразрядные процессы, математическое моделирование, итерационный алгоритм

**Для цитирования:** Максудов Д. В. Влияние частоты питающего напряжения на эффективность образования озона в озонаторе сотовой структуры // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 65-74. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-65-74>.

Original article

## INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE FREQUENCY ON THE EFFICIENCY OF OZONE FORMATION IN A CELLULAR OZONATOR

### Relevance

A promising direction for the development of domestic and foreign eIn the modern world, more and more attention is paid to environmental issues. One of the effective ways to solve environmental problems is the use of ozone - an allotropic modification of oxygen, which has high oxidizing abilities and can be used to purify and sterilize water, air and exhaust gases.

However, the spread of technologies related to the use of ozone is hampered by their energy intensity. In this regard, an urgent task is to optimize the design of ozonizers and its power supply mode to reduce the specific energy consumption for ozone production.

### The main aim

The aim of this article is to study the dependence of the efficiency of ozone formation on the frequency of the supply voltage and to determine the optimal frequency at which this efficiency would reach its maximum value.

### Research objects

Ozonizer.

### Research methods

Mathematical modeling of physical processes.

### Results

An expression is obtained to determine the distribution of the electric field strength in the discharge gap. An iterative algorithm has been developed, as a result of which graphs of the dependence of the critical frequency value on the amplitude of the supply voltage, as well as on the temperature and pressure of the gas passing through the discharge gap, are obtained.

### Ключевые слова

cellular ozonizer, ozone formation, gas-discharge processes, mathematical modeling, iterative algorithm

**For citation:** Maksudov D. V. Vliyaniye chastoty pitayushchego napryazheniya na effektivnost' obrazovaniya ozona v ozonatore sotovoy struktury [Influence of Supply Voltage Frequency on the Efficiency of Ozone Formation in a Cellular Ozonator]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 65-74 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-65-74>.

### Введение

Зависимость эффективности образования озона от частоты питающего напряжения исследовалась многими учеными [1–13].

При увеличении частоты происходит рост производительности озонатора за счет возрастания мощности барьерного разряда (которая прямо пропорциональна частоте), при этом удельные энергозатраты на получения озона существенно не меняются.

Однако когда частота достигает определенного критического значения (порядка мегагерц) при дальнейшем ее

росте удельные затраты энергии многократно возрастают (таблица 1) [6].

С точки зрения физики барьерного разряда, существование критической частоты объясняется тем, что при некоей длительности полупериода ионы, подвижность которых существенно меньше подвижности электронов, не успевают пересечь разрядный промежуток, что приводит к стабилизации канала разряда в пространстве. Вследствие этого разрядный процесс идет только в небольшой части объема разрядного промежутка при высокой температуре, что снижает эффективность образования озона и ускоряет его диссоциацию.

**Таблица 1.** Влияние частоты, давления и скорости газа на удельные энергозатраты при образовании озона

**Table 1.** Influence of frequency, pressure and gas velocity on specific energy consumption during ozone formation

| Частота, Гц        | Давление, Торр | Скорость газа, л/мин | Энергозатраты, кВт×ч/кг |
|--------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| 60                 | 750            | 0,22                 | 10.3                    |
| 60                 | 76             | 2,20                 | 23,7                    |
| $7,42 \times 10^6$ | 796            | 3,30                 | $1,36 \times 10^6$      |
| $6,65 \times 10^6$ | 800            | 45                   | $3,4 \times 10^5$       |
| $7,42 \times 10^6$ | 400            | 0,46                 | $1,8 \times 10^6$       |
| $7,42 \times 10^6$ | 200            | 0,92                 | $1,1 \times 10^5$       |
| $2,14 \times 10^7$ | 400            | 0,46                 | $1,4 \times 10^6$       |

Таким образом, определение критической частоты является актуальной задачей при поиске оптимального значения частоты питающего напряжения. Это, в свою очередь, требует определения скорости движения ионов в разрядном промежутке.

**Определение критической частоты**

Энергия иона, приобретённая им перед соударением с катодом на дистанции его свободного пробега в газовой смеси:

$$E_{и} = \frac{kTe_{и}E}{\sqrt{2\pi d^2 p}}, \quad (1)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля в прикатодной области;

$e_{и}$  — заряд иона,  $e_{и} = e_{эл}$ ;

$k$  — постоянная Больцмана,  $k \approx 1,3 \times 10^{-23}$  Дж/К;

$T$  — температура, К;

$d$  — кинетический диаметр молекул, м;

$p$  — давление, Па.

Поскольку напряженность электрического поля существенно не меняется на расстояниях, характерных для средней длины  $\lambda$  свободного пробега иона в газовой смеси в разрядном промежутке, можно определить энергию, приобретенную ионом на пути длиной  $\lambda$ , подставляя в (1) напряженность электрического поля в начале данного пути.

Моделирование распределения напряженности электрического поля производилось для конструкции озонатора, разработанной на кафедре электромеханики УУНиТ, которая включает диэлектрический блок сотовой структуры. В каналы данного блока в шахматном порядке вложены две группы электродов, между которыми имеется разность потенциалов, необходимая для возникновения барьерного разряда. В роли диэлектрических барьеров при этом выступают стенки каналов диэлектрического блока. Параметры данного озонатора приведены в таблице 2.

Для сечения канала в указанной конструкции озонатора (рисунок 1) распределение напряженности электрического

**Таблица 2.** Параметры озонатора сотовой структуры

**Table 2.** Parameters of the honeycomb structure ozonizer

| Параметр                                    | Значение  |
|---|-----------|
| Длина каталитического блока $l$ , м         | 0,15      |
| Высота/ширина каталитического блока $h$ , м | 0,07      |
| Число каналов $N$                           | 225       |
| Толщина слоя диэлектрика $D_{д}$ , м        | $10^{-3}$ |
| Напряжение источника питания $U_0$ , кВ     | 15        |

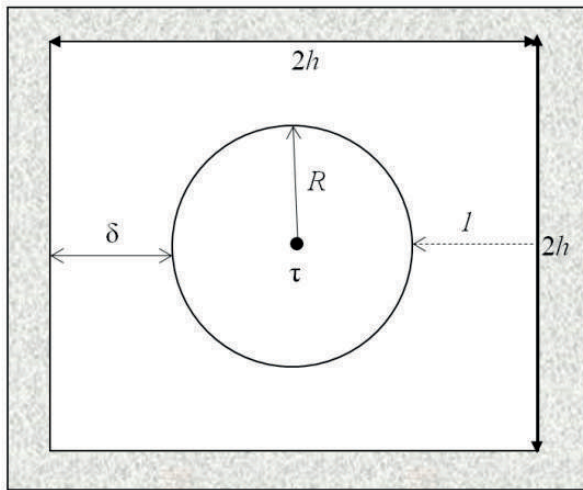


Рисунок 1. Сечение канала диэлектрического блока

Figure 1. Cross-section of the dielectric block channel

поля, определенное с помощью метода зеркальных отображений:

$$E(x, z) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0\epsilon_1} \times \left[ \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i|+|j|} \frac{1}{\sqrt{(x-2jh)^2 + (z-2ih)^2}} \right], \quad (2)$$

где  $\beta = \frac{\epsilon_d - \epsilon_b}{\epsilon_d + \epsilon_b}$ ;

$\epsilon_b$  — диэлектрическая проницаемость газовой смеси в разрядном (воздушном) промежутке;

$\epsilon_d$  — проницаемость диэлектрического барьера;

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $8,85418781762039 \times 10^{-12}$  Ф/м;

$e_i$  — заряд иона, Кл;

$\tau$  — линейная плотность заряда электрода, Кл/м;

$R$  — радиус электрода, м;

$h$  — половина ширины канала, м;

$x$  и  $z$  — координаты относительно оси электрода для точки начала движения иона (для которой определяется напряженность электрического поля) на плоскости сечения рассматриваемого канала каталитического блока, такие что  $x^2 + z^2 > R^2$ ;  $|x| < h$ ;  $|y| < h$ .

С учетом (1), (2) энергия, приобретаемая ионом на пути свободного пробега с начальными координатами  $x, y$ :

$$E_n(x, z) = \frac{kTe_n E(x, z)}{\sqrt{2\pi d^2 p}} = \frac{kTe_n \tau}{\sqrt{32\pi d^2 p \epsilon_0 \epsilon_b}} \times \left[ \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i|+|j|} \frac{1}{\sqrt{(x-2jh)^2 + (z-2ih)^2}} \right]. \quad (3)$$

Под действием электрического поля ион ускоряется на пути свободного пробега, двигаясь при этом со средней скоростью  $V_{н,ср} = \sqrt{\frac{E_n}{2m_n}}$  и максимальной скоростью  $V_{н,макс} = \sqrt{\frac{2E_n}{m_n}}$ , где  $m_n$  — масса иона.

Для случая ионизации атома кислорода  $m_n = 16 \times 1,660 \times 10^{-27} = 26,576 \times 10^{-27}$  кг.

Линейная плотность заряда электрода  $\tau$ , исходя из известного значения напряжения питания  $U_0$ :

$$\tau = \frac{2U_0 \pi \epsilon_0}{\ln\left(\frac{R+\delta}{R}\right)}, \quad (4)$$

где ширина разрядного промежутка

$$\delta = \frac{h' - d_d (\sqrt{N} + 1)}{2\sqrt{N}} - R;$$

$R$  — радиус электрода, м;

$h'$  — ширина каталитического блока, м;

$d_d$  — толщина слоя диэлектрика (толщина стенок канала), м;

$N$  — число каналов в каталитическом блоке сотовой структуры.

Для параметров озонатора, приведенных в таблице 2, линейная плотность заряда электрода  $\tau = 1,419 \times 10^{-6}$ ; напряженность поля для точки  $M$  с координатами  $(R + \delta, 0)$ , определенная в соответ-

ствии с (2),  $E_M = 5 \times 10^7$  энергия, приобретенная ионом (атомом кислорода) на пути, равном длине свободного пробега в газовой смеси (при заряде иона, равным по модулю заряду электрона,  $e_{\text{и}} = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл)  $E_{\text{и}} = 5 \times 10^{-18}$  Дж; средняя и максимальная скорости движения иона соответственно  $V_{\text{иср}} = 9,8 \times 10^3$  м/с,  $V_{\text{иmax}} = 2 \times 10^4$  м/с.

Поскольку эти скорости намного больше средней скорости теплового движения молекул воздуха (около 300 м/с при нормальной температуре), столкновение иона с молекулой можно упрощенно рассматривать как столкновение с неподвижной частицей. При столкновении иона (атома кислорода) с двухатомной молекулой кислорода массой  $m_{O_2}$ , движущейся со скоростью  $V_{O_2}$ , в соответствии с законом сохранения импульса и с учетом приближительных равенств  $m_{O_2} \approx 2m_{\text{и}}$ ,  $V_{O_2} \approx 0$ , после столкновения скорость иона

$$V'_{\text{и}} = \frac{2m_{O_2}V_{O_2} + V_{\text{иmax}}(m_{\text{и}} - m_{O_2})}{m_{\text{и}} + m_{O_2}} \approx \frac{-m_{\text{и}}V_{\text{иmax}}}{3m_{\text{и}}} = -\frac{1}{3}V_{\text{иmax}}; \quad (5)$$

скорость молекулы

$$V'_{O_2} = \frac{2m_{\text{и}}V_{\text{иmax}} + V_{O_2}(m_{O_2} - m_{\text{и}})}{m_{\text{и}} + m_{O_2}} \approx \frac{2m_{\text{и}}V_{\text{иmax}}}{3m_{\text{и}}} = \frac{2}{3}V_{\text{иmax}}. \quad (6)$$

Таким образом, после столкновения с молекулой ион отскакивает назад со скоростью равной примерно трети скорости, которую имел до столкновения. С учетом этого движение иона через разрядный промежуток можно моделировать итерационным процессом. Например, при движении по траектории 1 (рисунок 1):

$$V_{\text{иmax}}^{(0)} = 0; \quad x^{(0)} = R + \delta; \quad z^{(0)} = 0; \quad t^{(0)} = 0$$

$$V_{\text{иmax}}^{(i+1)} = \sqrt{\frac{2}{m_{\text{и}}} \left[ \frac{kTe_{\text{и}}\tau}{\sqrt{32\pi d^2 p l \epsilon_0 \epsilon_{\text{в}}}} \left[ \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i+j|} \frac{1}{\sqrt{(x_i - 2jh)^2 + (z_i - 2ih)^2}} \right] - \frac{m_{\text{и}} \left( \frac{V_{\text{иmax}}^{(i)}}{3} \right)^2}{2} \right]}$$

$$V_{\text{иср}}^{(i+1)} = \frac{V_{\text{иmax}}^{(i+1)} - \frac{1}{3}V_{\text{иmax}}^{(i)}}{2}; \quad x^{(i+1)} = x^{(i)} - \lambda = x^{(i)} - \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 p}};$$

$$z^{(i+1)} = z^{(i)}; \quad t^{(i+1)} = t^{(i)} + \frac{\lambda}{V_{\text{иср}}^{(i+1)}}, \quad (7)$$

где  $x^{(i)}$ ,  $z^{(i)}$  — координаты иона в начале  $i$ -го итерационного шага (для  $i=0$  — координаты в начале траектории; для  $i>0$  — после  $i$ -го столкновения с какой-либо молекулой) на плоскости сечения канала каталитического блока относительно точки пересечения данной плоскости с ось электрода, принятой за начало координат;

$t^{(i)}$  — время, прошедшее от момента начала движения иона до начала  $i$ -го итерационного шага;

$V_{\text{иmax}}^{(i)}$  — скорость движения иона к концу  $i$ -го шага;

$V_{\text{иср}}^{(i)}$  — средняя скорость движения иона на  $i$ -м шаге.

Итерационный процесс (7) продолжается пока  $x^{(i)} > R$ , где  $R$  — радиус электрода.

Программа, реализующая итерационный процесс (7) в среде ПК Mathcad, показана на рисунке 2. В данной программе бесконечные суммы в формуле (3) заменены конечными суммами с верхней и нижней границей  $n$ , где  $n$  — число достаточно большое, что бы такая замена не привела к существенному снижению точности расчетов.

Результаты вычислений программы, показанной на рисунке 2, для параметров озонатора, приведенных в таблице 2, показаны на рисунке 3.

Как можно видеть из данных рисунков, время перемещения иона (атома кислорода) через разрядный промежуток

с шириной  $\delta \approx 1$  мм составляет  $t = 1,358 \times 10^{-7}$  с, что соответствует критической частоте  $f_{кр} = 1 / 2t = 3,683$  МГц.

С ростом величины питающего напряжения напряженность электрического поля и, соответственно, скорость движения ионов увеличиваются, что, в свою очередь, приводит к росту критической частоты.

Зависимость критической частоты от питающего напряжения показана на рисунке 4, а.

С увеличением давления газовой смеси в разрядном промежутке уменьшаются расстояния между молекулами газа и вследствие этого уменьшается

длина свободного пробега для ионов, движущихся к катоду, и уменьшается скорость, которую они успевают приобрести на пути, равном этой длине. Уменьшение подвижности ионов ведет к увеличению времени пересечения ими разрядного промежутка и к уменьшению критической частоты.

Зависимость критической частоты от давления газовой смеси показана на рисунке 4, б (для параметров озонатора, приведенных в таблице 2).

Другим параметром, влияющим на величину критической частоты, является температура газовой смеси. При ее росте (при постоянном давлении) увеличива-

$$h := \frac{h1 - d\pi\sqrt{N}}{2\sqrt{N}} = 1.833 \times 10^{-3} \quad \tau := \frac{[U0 \cdot (2 \cdot \pi \cdot e0 \cdot e1)]}{\ln\left(\frac{h}{r}\right)} = 1.376 \times 10^{-6} \quad \beta := \left(\frac{e2 - e1}{e2 + e1}\right) = 0.807$$

$$E(x, z) := \begin{cases} \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot e0 \cdot e1} \left[ \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n \left[ (\beta)^{|i|+|j|} \cdot \frac{1}{\sqrt{(0-2j \cdot h)^2 + (r-2i \cdot h)^2}} \right] \right] & \text{if } x^2 + z^2 < r^2 \\ \frac{\tau}{4 \cdot \pi \cdot e0 \cdot e1} \left[ \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n \left[ (\beta)^{|i|+|j|} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x-2j \cdot h)^2 + (z-2i \cdot h)^2}} \right] \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

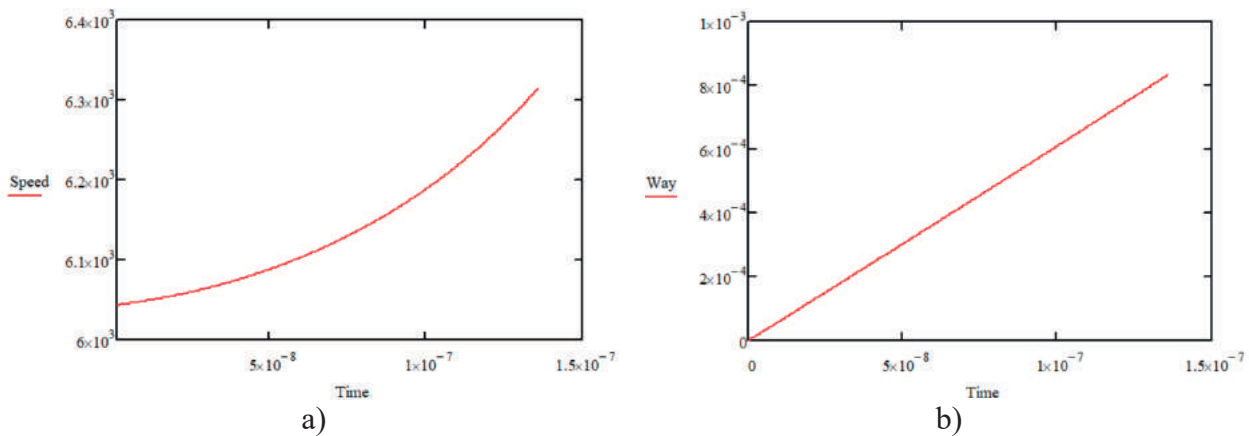
```

Way :=
x0 ← h
z0 ← 0
t0 ← 0
Vmax0 ← 0
for i ∈ 1..106
  Vmax1 ←  $\sqrt{\frac{2 \cdot \left[ \frac{k \cdot T \cdot e0 \cdot E(x_{i-1}, 0)}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot RO)^2 \cdot p}} - \frac{mi \cdot \left(\frac{Vmax_{i-1}}{3}\right)^2}{2} \right]}{mi}}$ 
  Vиср1 ←  $\frac{Vmax_1 - Vmax_{i-1}}{2}$ 
  x1 ←  $x_{i-1} - \frac{k \cdot T}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot RO)^2 \cdot p}}$ 
  z1 ← zi-1
  t1 ←  $t_{i-1} + \frac{k \cdot T}{Vиср_1}$ 
  (break) if x1 < r
h - x

```

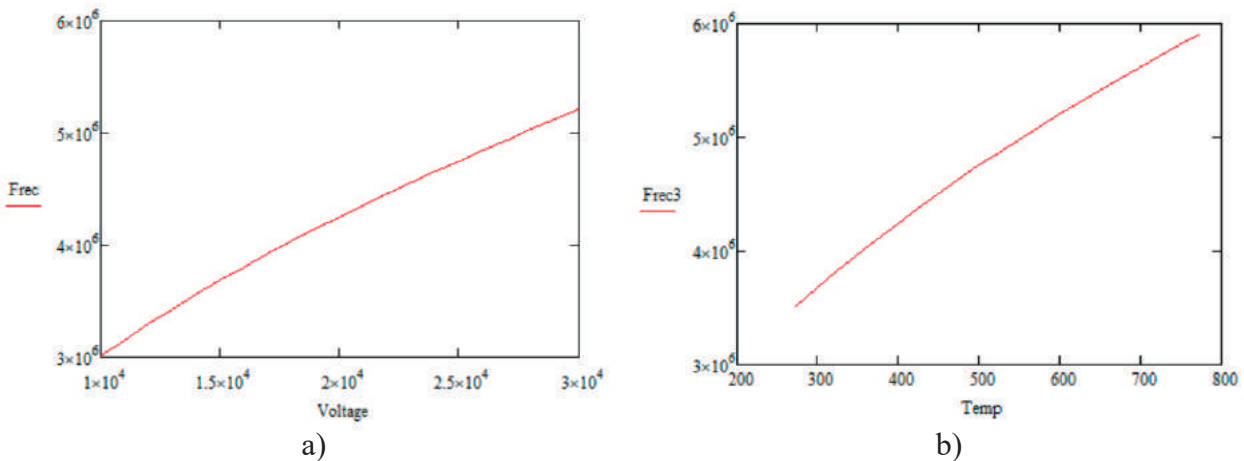
Рисунок 2. Программа, реализующая итерационный процесс (7) в среде ПК Mathcad

Figure 2. A program that implements the iterative process (7) in the Mathcad environment



**Рисунок 3.** Характеристики движения иона: зависимость скорости иона, м/с, от времени его движения, с (а); зависимость пути, пройденного ионом, м, от времени его движения, с (б) (результаты вычислений программы, показанной на рисунке 2, для параметров, приведенных в таблице 2)

**Figure 3.** Characteristics of ion movement: dependence of the ion speed, m/s, on the time of its movement, s (a); dependence of the path traveled by the ion, m, on the time of its movement, s (b) (calculation results of the program shown in Figure 2, for the parameters given in Table 2)



**Рисунок 4.** Характеристики критической частоты: зависимость критической частоты, Гц, от питающего напряжения, В (а); зависимость критической частоты, Гц, от давления газовой смеси в разрядном промежутке, Па (б) (результаты вычислений программы, показанной на рисунке 2, для параметров, приведенных в таблице 2)

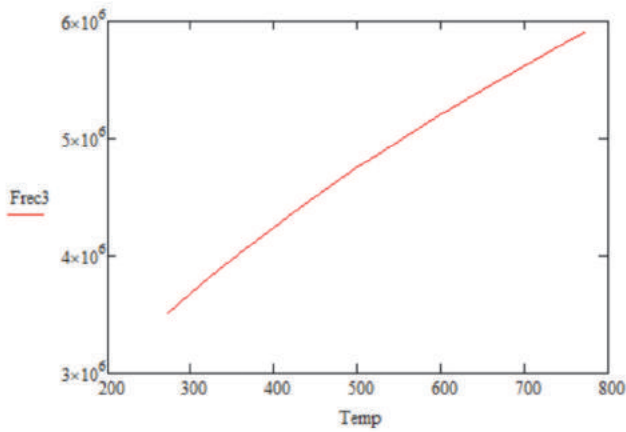
**Figure 4.** Characteristics of critical frequency: dependence of the critical frequency, Hz, on the supply voltage, V (a); dependence of the critical frequency, Hz, on the pressure of the gas mixture in the discharge gap, Pa (b) (results of the program shown in Figure 2, for the parameters given in Table 2)

ются расстояния между молекулами и длина свободного пробега ионов, увеличивается средняя скорость их движения и уменьшается время пересечения разрядного промежутка, что соответствует росту критической частоты.

Зависимость критической частоты от температуры газовой смеси показана на

рисунке 5 (для параметров озонатора, приведенных в таблице 2). Диапазон изменения температуры на этом графике выбран достаточно широким, учитывая возможное повышение температуры в канале микроразряда.





**Рисунок 5.** Зависимость критической частоты, Гц, от температуры газовой смеси в разрядном промежутке, К (результаты вычислений программы, показанной на рисунке 2, для параметров, приведенных в таблице 2)

**Figure 5.** Dependence of the critical frequency, Hz, on the temperature of the gas mixture in the discharge gap, K (calculation results of the program shown in Figure 2 for the parameters given in Table 2)

Поскольку характерное время микро-разряда составляет около  $10^{-8}$  с, можно предположить, что тепловая энергия, переданная за это время в пространство, окружающее канал микро-разряда, пренебрежимо мала и, таким образом, процесс нагрева газа в данном канале можно считать адиабатическим.

С учетом вышесказанного повышение температуры непосредственно в канале микро-разряда можно оценить по формуле:

$$\Delta T = \frac{e_{эл} N U}{\pi \left( \frac{d_{кан}}{2} \right)^2 \delta C \rho}, \quad (8)$$

где  $e_{эл}$  — заряд электрона;

$N$  — число электронов, переносимых в канале микро-разряда;

$U$  — разность потенциалов между катодом и анодом;

$\delta$  — расстояние между катодом и анодом;

$d_{кан}$  — диаметр канала микро-разряда;

$C$  — теплоемкость газовой смеси;

$\rho$  — плотность газовой смеси.

Учитывая, что диаметр канала микро-разряда находится в пределах 0,1–1,0 мм, а количество электронов переносимое в нем, имеет значение порядка  $10^9$ , можно определить для разрядного промежутка шириной 1 мм при разности потенциалов  $10^4$  В, что прирост температуры в канале находится в диапазоне от 2 К (если  $d_{кан} = 1$  мм) до 200 К

(если  $d_{кан} = 0,1$  мм) при энерговыделении  $\Delta Q = e_{эл} N U \approx 1,6 \times 10^{-6}$  Дж.

После прохождения микро-разряда происходит диссипация этой тепловой энергии вследствие процесса теплопроводности. Характерное время диссипации можно оценить, исходя из выражения:

$$\Delta t = \frac{\Delta Q}{\alpha_{то} \pi \left( \frac{d_{кан}}{2} \right) \delta \Delta T} = \frac{2 \Delta Q}{\pi \delta \lambda_{тп} \Delta T}, \quad (9)$$

где  $\alpha_{то}$  — коэффициент теплоотдачи на границе между поверхностью канала и окружающим его пространством, который оценивается как  $\alpha_{то} = \frac{\lambda_{тп}}{d_{кан}}$ , где  $\lambda_{тп}$  —

коэффициент теплопроводности газовой смеси. В частности при минимальном диаметре канала и, соответственно, его максимальном нагреве  $\Delta T = 200$  К, вычисленном выше, характерное время диссипации, оцененное по формуле (9), составляет  $1,95 \times 10^{-4}$  с.

## Выводы

Разработан итерационный метод, позволяющий моделировать движение положительных ионов, оставшихся после прохождения электронной лавины, и определить время пересечения ими разрядного промежутка озонатора.

Данный метод позволяет найти критическую частоту для заданных параметров озонатора (максимальную частоту

приложенного напряжения, при которой положительные ионы еще успевают пересечь разрядный промежуток в течение полупериода. и при превышении которой происходит резкий рост энергозатрат на получение озона).

Получены зависимости критической частоты от температуры, давления и состава газовой смеси, проходящей через

разрядный промежуток озонатора, а также от напряжения источника питания.

Данные исследования представляют интерес с точки зрения оптимизации параметров озono-каталитического устройства при его проектировании по критерию минимизации удельных энергетических затрат при образовании озона.

### Список источников

1. Жуков А.А. Положительный объемный заряд и характер снижения в области первой критической частоты // Журнал технической физики. 1967. Т. 37, Вып. 4. С. 710.

2. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Энергия, 1989. 174 с. ISBN 5-211-00415-9.

3. Fatechand R.R.T. The Electrical Breakdown of Gaseous Dielectrics at High Frequencies // Proc. Inst. Electr. Eng. September 1957. Vol. 104. Issue 6. P. 489–495. doi: 10.1049/pi-c.1957.0058.

4. Kampshulte J. Luftdurchschlag und Überschlag von 50 und 100000 Hertzю Arch, fur Electrotech. 1930. Bd 24. S. 525.

5. Lassen H. Frequenzabhängigkeit der Funkenspannung in Luft. Arch, Fur Electrotech. 1931. Bd 25. S. 322.

6. Aiba T., Freeman M.P. // Ind. Eng. Chem. Fundam. 1974. Vol. 13. No. 3. P. 179–184.

7. Haverkamp R.G., Miller B.B., Free K.W. Ozone Production in a High Frequency Dielectric Barrier Discharge Generator // Ozone: Science & Engineering. 2002. Vol. 24, Issue 5. С. 321–328. doi: 10.1080/01919510208901623.

8. Zhehua Du, Xin Lin. Characteristic Research on the Generation of Ozone Using Dielectric Barrier Discharge // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. July, 2019. P. 1–6. doi: 10.1088/1755-1315/295/4/042079.

9. Guangming Huang. Dielectric Barrier Discharge for Ozone Generation: A Thesis Presented in Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy / Department of Electronic and Electrical Engineering. University of Strathclyde. Glasgow, UK. 2016. 246 p.

10. Kogelschatz U. Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. Vol. 23. С. 1–46. doi: 10.1023/A:1022470901385.

11. Portugal S., Roy S., Lin J. Functional Relationship between Material Property, Applied Frequency and Ozone Generation for Surface

Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric air // Scientific Reports. 2017. No. 7(1). P. 6388. doi: 10.1038/s41598-017-06038-w.

12. Forte M., Jolibois J., Pons J., Moreau E., Touchard G., Cazalens M. Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity: Application to Airflow Control // Exp. Fluids. 2007. No. 43. P. 917–928. doi: 10.1007/s00348-007-0362-7.

13. Pons J., Moreau E., Touchard G. Asymmetric Surface Dielectric Barrier Discharge in Air at Atmospheric Pressure: Electrical Properties and Induced Airflow Characteristics // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. No. 38. P. 3635–3642. doi: 10.1088/0022-3727/38/19/012.

### References

1. Zhukov A.A. Polozhitel'nyy ob'yemnyy zaryad i kharakter snizheniya v oblasti pervoy kriticheskoy chastoty [Positive Space Charge and the Nature of the Decrease in the Region of the First Critical Frequency]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Journal of Technical Physics*, 1967, Vol. 37, Issue 4, pp. 710. [in Russian].

2. Samoylovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. *Fizicheskaya khimiya bar'yernogo razryada* [Physical Chemistry of Barrier Discharge]. Moscow, Energiya Publ., 1989. 174 p. ISBN 5-211-00415-9. [in Russian].

3. Fatechand R.R.T. *The Electrical Breakdown of Gaseous Dielectrics at High Frequencies*. Proc. Inst. Electr. Eng. September 1957. Vol. 104. Issue 6. P. 489–495. doi: 10.1049/pi-c.1957.0058.

4. Kampshulte J. Luftdurchschlag und Überschlag von 50 und 100000 Hertz, Arch, fur Electrotech., 1930, Bd 24, S. 525.

5. Lassen H. Frequenzabhängigkeit der Funkenspannung in Luft, Arch, Fur Electrotech., 1931. Bd 25. S. 322.

6. Aiba T., Freeman M.P. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1974, Vol. 13, No. 3, pp. 179–184.

7. Haverkamp R.G., Miller B.B., Free K.W. Ozone Production in a High Frequency Dielectric

Barrier Discharge Generator. *Ozone: Science & Engineering*, 2002, Vol. 24, Issue 5, pp. 321–328. doi: 10.1080/01919510208901623.

8. Zhehua Du, Xin Lin. Characteristic Research on the Generation of Ozone Using Dielectric Barrier Dischar. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, July, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1088/1755-1315/295/4/042079.

9. Guangming Huang. *Dielectric Barrier Discharge for Ozone Generation: A Thesis Presented in Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy*. Department of Electronic and Electrical Engineering. University of Strathclyde. Glasgow, UK. 2016. 246 p.

10. Kogelschatz U. Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2003, Vol. 23, pp. 1–46. doi: 10.1023/A:1022470901385.

11. Portugal S., Roy S., Lin J. Functional Relationship between Material Property, Applied Frequency and Ozone Generation for Surface Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric air. *Scientific Reports*, 2017, No. 7(1), pp. 6388. doi: 10.1038/s41598-017-06038-w.

12. Forte M., Jolibois J., Pons J., Moreau E., Touchard G., Cazalens M. Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity: Application to Airflow Control. *Exp. Fluids*, 2007, No. 43, pp. 917–928. doi: 10.1007/s00348-007-0362-7.

13. Pons J., Moreau E., Touchard G. Asymmetric Surface Dielectric Barrier Discharge in Air at Atmospheric Pressure: Electrical Properties and Induced Airflow Characteristics. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, No. 38, pp. 3635–3642. doi: 10.1088/0022-3727/38/19/012.

*Статья поступила в редакцию 05.12.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 25.12.2023.*

*The article was submitted 05.12.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 25.12.2023.*

Научная статья

УДК 621.316.718.5; 62-97/-98

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-75-83

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА



**Василий Валериевич Пашкин**

*Vasily V. Pashkin*

инженер-энергетик I категории, Газопромислое управление,  
ООО «Газпром добыча Ямбург», Новый Уренгой, Россия;  
аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия



**Виталий Алексеевич Шабанов**

*Vitaliy V. Shabanov*

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



**Олег Николаевич Ивашкин**

*Oleg N. Ivashkin*

Газопромислое управление, ООО «Газпром добыча Ямбург»,  
Новый Уренгой, Россия

### Актуальность

Для охлаждения газа до требуемых значений температуры в добыче и транспорте газа в России наибольшее распространение получил способ, реализуемый в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа. Установленная мощность электроприводов вентиляторов АВО газа достигает 70 % от общей установленной мощности газопромисловых объектов. Поэтому актуальным является вопрос повышения энергетической эффективности электротехнических комплексов АВО газа путём внедрения частотно-регулируемого электропривода.

### Цель исследования

Разработать способ частотного управления и исследовать технологические особенности работы аппаратов АВО газа с двухступенчатой схемой охлаждения, который обеспечивает минимальное потребление электроэнергии.

### Ключевые слова

аппарат воздушного охлаждения,  
частотно-регулируемый электропривод,  
энергосбережение,  
ресурсосбережение,  
асинхронный двигатель,  
аппарат воздушного охлаждения газа,  
тепловой коэффициент полезного действия

**Методы исследования**

Математические методы расчета и анализа, программный комплекс Mathcad.

**Результаты**

На основе разработанного оптимизационного алгоритма выбора оптимальных частот вращения электродвигателей секции АВО газа показано, что наиболее эффективно увеличение теплового коэффициента полезного действия можно использовать при отдельном частотном управлении электроприводами вентиляторов каждой ступени. Для отдельного частотного управления разработана целевая функция оптимального управления частотно-регулируемым электроприводом АВО газа по критерию минимума потребляемой мощности.

**Для цитирования:** Пашкин В. В., Шабанов В. А., Ивашкин О. Н. Оптимизационный алгоритм управления частотно-регулируемым электроприводом в электротехническом комплексе двухступенчатого охлаждения газа // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 75-83. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-75-83>.

Original article

## A METHOD FOR CONTROLLING A FREQUENCY-CONTROLLED DRIVE OF THE GAS AIR COOLING APPARATUS WITH TWO-STAGE COOLING

**Relevance**

To cool the gas to the required temperature values in gas production and transportation in Russia, the most widespread has been implemented in the device of air-cooled gas. The installed capacity of electric drives of fans of gas air cooling devices reaches 70 % of the total installed capacity of gas field facilities. Therefore, the issue of increasing the energy efficiency of electrical complex of gas air cooling device by introducing a frequency-controlled electric drive is relevant.

**Aim of research**

To develop a method of frequency control and to investigate the technological features of the operation of gas air cooling devices with a two-stage cooling scheme that ensures minimal electricity consumption.

**Research methods**

Mathematical methods of calculation and analysis, Mathcad software package.

**Results**

Based on the developed optimization algorithm for selecting the rotational speeds of the motors of the section of the gas air cooling apparatus, it is shown that the most effective increase in thermal efficiency can be used with separate frequency control of the fans of the section of each stage. For separate frequency control, the objective function of optimal control of the frequency-controlled electric drive of the gas air cooling apparatus according to the criterion of minimum power consumption has been developed.

**Keywords**

air cooling unit, frequency-controlled electric drive, energy saving, resource saving, asynchronous motor, gas air cooling unit, thermal efficiency ratio

**For citation:** Pashkin V. V., Shabanov V. A., Ivashkin O. N. Optimizatsionnyy algoritm upravleniya chastotno-reguliruyemym elektroprivodom v elektrotekhnicheskom komplekse dvukhstupenchatogo okhlazhdeniya gaza [A Method for Controlling a Frequency-Controlled Drive of the Gas Air Cooling Apparatus with Two-Stage Cooling]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 75-83. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-75-83>.

**Введение**

Одним из важнейших технологических параметров газа, добываемого на месторождениях Крайнего Севера, является температура газа. Для обеспечения требуемой производительности газоперекачивающих агрегатов, эффективности осушки газа до требуемой точки росы, снижения теплового воздействия на грунты многолетней мерзлоты и изоляцию трубопровода межпромыслового коллектора, для снижения льдо- и гидратообразования в линейных и теплообменных частях технических устройств при внутрипромысловых технологических операциях температура газа должна поддерживаться в заданных диапазонах.

Для приведения температуры газа к заданным значениям используются аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа, в которых производится охлаждение газа воздушным потоком окружающего воздуха при помощи вентиляторов. Установки воздушного охлаждения газа представляют собой электротехнический комплекс с многодвигательной

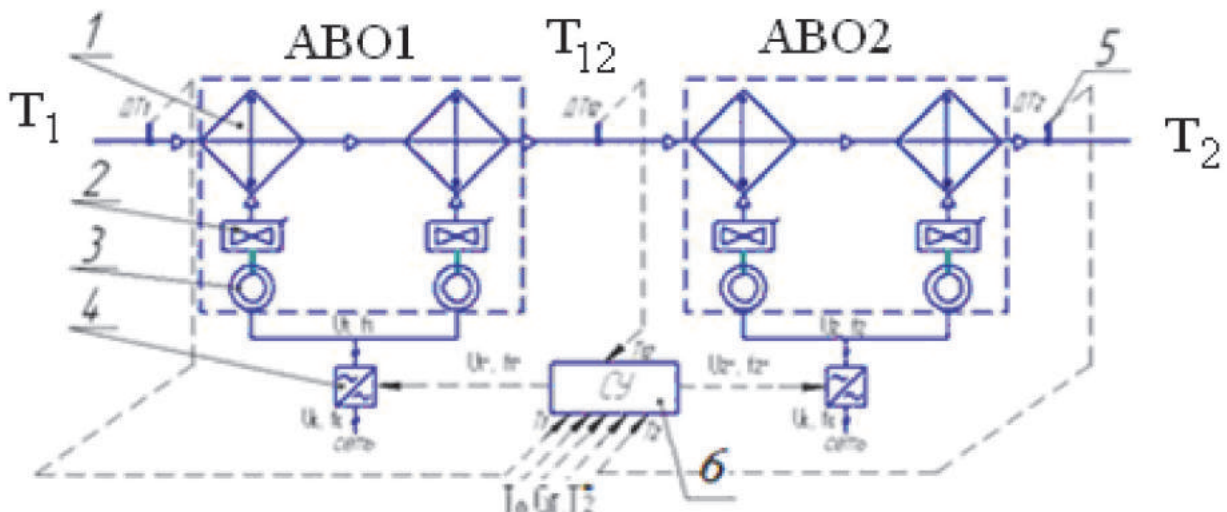
системой электроприводов вентиляторов АВО и являются основными потребителями электроэнергии газовых промыслов и компрессорных станций.

Согласно требованиям к технологическим режимам, приведённым в [1], при температуре газа свыше 40 °С рекомендуется применение двухступенчатого охлаждения «сырого» газа. В таком случае АВО выполняются по двухгрупповой схеме с последовательно включенными парами АВО, образующих секции.

На рисунке 1 приведена типовая технологическая схема секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением.

**Исследование двухступенчатой секции АВО газа**

Анализ существующих способов управления АВО газа для регулирования температуры газа [2–7] показал, что в данных способах управления электроприводом не учитываются свойства и особенности двухступенчатых секций АВО газа, несмотря на распространённость таких технологических схем в



1 — теплообменная секция АВО; 2 — осевой вентилятор; 3 — электродвигатель; 4 — преобразователь частоты; 5 — датчик температуры; 6 — система управления

1 — heat exchange section of the air cooling device; 2 — axial fan; 3 — electric motor; 4 — frequency converter; 5 — temperature sensor; 6 — control system

**Рисунок 1.** Технологическая схема секции АВО газа с двухступенчатым охлаждением

**Figure 1.** Flow chart of 2-stage section of gas air-cooling unit

добычных комплексах. Двухступенчатые системы охлаждения с точки зрения управления имеют существенные отличия, т.к. выходная температура газа первого АВО одновременно является входной для второго. Данное обстоятельство позволяет подойти к регулированию электроприводами АВО газа одной секции с точки зрения повышения энергетической эффективности, т.к. температура газа между двумя секциями и тепловые производительности АВО могут быть выбраны на основе тепловых характеристик и создаваться при различных режимах работы вентиляторов.

Тепловой коэффициент полезного действия (КПД) АВО — основной параметр, которым характеризуется эффективность охлаждения газа в установках воздушного охлаждения [8], определяется выражением:

$$\eta = \frac{(T_{\text{вх.}} - T_{\text{вых.}})}{(T_{\text{вх.}} - T_0)}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{вх.}}$  — температура газа на входе в АВО, °С;

$T_{\text{вых.}}$  — температура газа на выходе из АВО, °С;

$T_0$  — температура охлаждающего воздуха, °С.

Особенностью двухступенчатой схемы охлаждения газа является взаимное влияние тепловых КПД каждой секции. Двухступенчатые системы охлаждения с точки зрения регулирования температуры газа на выходе имеют существенные отличия, т.к. выходная температура газа первого АВО одновременно является входной для второго [9, 10]. При этом результирующая температура на выходе секции может быть получена при разном распределении температур газа между ступенями секции. Данное обстоятельство позволяет подойти к регулированию секции с точки зрения повышения энергетической эффективности, т.к. при допустимой по технологическому режиму температуре

газа на выходе из секции температура газа между двумя АВО может варьироваться в зависимости от режима работы вентиляторов.

Определение оптимальных частот вращения электроприводов вентиляторов для поддержания требуемой температуры на выходе из секции при двухступенчатой схеме охлаждения по заданным значениям температуры газа на входе основано на определении общего теплового КПД секции  $\eta_c$ , состоящей из двух подключенных последовательно аппаратов АВО1 и АВО2.

На основании уравнений КПД каждой ступени по (1) можно получить, что тепловой КПД секции из двух АВО равен [9, 10]:

$$\eta_c = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (2)$$

где  $\eta_c$  — КПД двухступенчатой секции;

$\eta_1$  и  $\eta_2$  — КПД 1-й и 2-й ступеней.

Результирующий тепловой КПД по формуле (2) можно получить при разном распределении теплового КПД между ступенями, следовательно, и при разной частоте вращения электродвигателей вентиляторов АВО1 и АВО2. Для этого вместо одного общего преобразователя частоты на две ступени, как показано на рисунке 1, на каждую ступень устанавливается свой преобразователь. При этом задача повышения энергетической эффективности двухступенчатой схемы сводится к минимизации потребляемой мощности частотно-регулируемыми электроприводами (ЧРП) вентиляторов. Задача эта решается путем выбора оптимальных частот вращения вентиляторов при раздельном регулировании частоты на каждой ступени.

Потребляемая мощность каждого ЧРП вентилятора пропорциональна кубу частоты напряжения питания [8, 11, 12]. При частоте  $f_1$  напряжения питания электродвигателей АВО1 и частоте  $f_2$  напряжения питания электродвигателей АВО2

суммарная потребляемая мощность принимает вид:

$$N_{\Sigma} = 2 \cdot N_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_c}\right)^3 + 2 \cdot N_{\text{ном.}} \cdot \left(\frac{f_2}{f_c}\right)^3. \quad (3)$$

Выражение (3) является целевой функцией. При этом критерий оптимизации записывается в виде:

$$N_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Переменными аргументами в целевой функции являются частоты  $f_1$  и  $f_2$  на выходе ЧРП первой и второй ступеней секции АВО газа.

Поиск оптимального значения частот  $f_1$  и  $f_2$  должен выполняться при заданном значении температуры на выходе секции или при заданном значении теплового КПД секции. Значение заданной температуры или заданного теплового КПД определяет требуемый режим охлаждения газа и является ограничением, которое накладывается на решение целевой функции. Для учета этого ограничения удобно отношение частот в целевой функции выразить через отношение тепловых КПД [13]:

$$\left(\frac{f}{f_c}\right) = \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{ном.}}}\right)^{1,25}. \quad (5)$$

При этом ограничение на решение целевой функции сводится к выполнению равенства (2) при разных значениях

тепловых КПД двух ступеней секции АВО, то есть при изменении частот напряжения питания на выходе ЧРП.

Оптимизационный алгоритм был реализован в математическом пакете Mathcad и зарегистрирован как программа для ЭВМ [14]. На примере статистических наблюдений работы установки воздушного охлаждения газа дожимной компрессорной станции рассмотрим эффективность использования рассчитанных оптимальных частот вращения вентиляторов АВО, распределение температур вдоль двухступенчатой секции охлаждения при дискретном и частотном регулировании представлено на рисунке 2.

При дискретном способе регулирования в работе находится один вентилятор. Дальнейшее охлаждение газа в секции двухступенчатого охлаждения происходит конвекционным способом. При этом нет возможности регулировать температуру на выходе секции. В отличие от дискретного регулирования при использовании частотного регулирования можно поддерживать температуру на выходе двухступенчатой секции охлаждения во всём диапазоне допустимых температур в соответствии с технологическим регламентом эксплуатации от 20 °С до 25 °С.

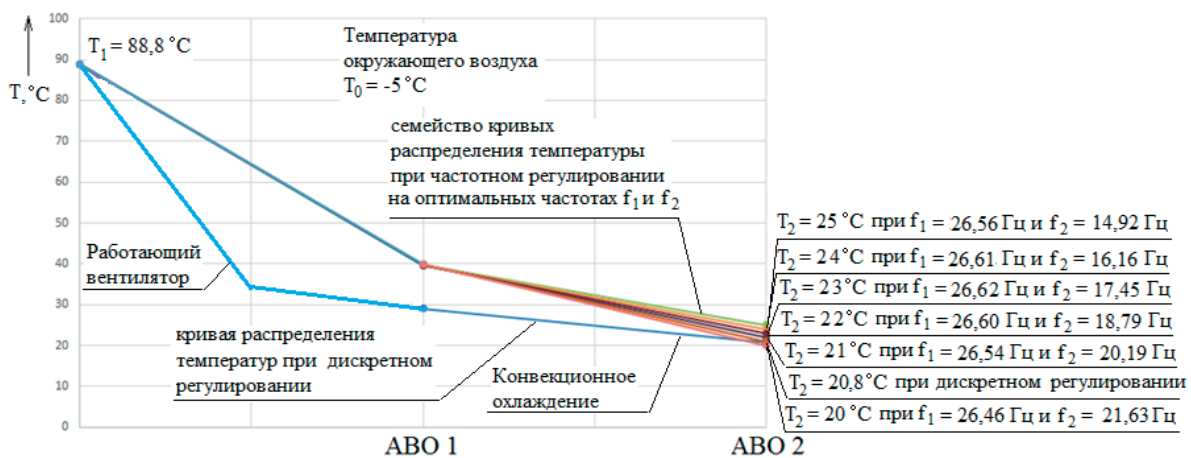


Рисунок 2. Распределение температуры вдоль двухступенчатой секции охлаждения при дискретном и частотном регулировании

Figure 2. Temperature distribution along the 2-stage cooling section at discrete and frequency control



Семейство кривых распределения температур вдоль АВО1 при частотном регулировании сливается в одну линию из-за близкого значения оптимальных частот  $f_1$  при всех температурах на выходе секции, и тем самым оказывается практически одинаковой температура на выходе АВО1. Семейство кривых распределения температур вдоль двухступенчатой секции охлаждения при частотном регулировании проходит выше соответствующей кривой при дискретном регулировании при всех соответствующих температурах на выходе секции. Это свидетельствует о более равномерном отводе тепла вдоль двухступенчатой секции охлаждения, что и позволяет снизить потребляемую мощность.

В таблице 1 приводятся значения потребляемой мощности при дискретных переключениях, взятые из статистики работы установки воздушного охлаждения газа дожимной компрессорной станции № 5 ООО «Газпром добыча Ямбург», и результаты расчёта при использовании оптимальных частот вращения вентиляторов.

При дискретном способе управления, когда в работе находится один вентиля-

тор двухступенчатой секции охлаждения, обеспечивается только один режим охлаждения с температурой газа на выходе 20,8 °С. При этом потребляемая мощность 37 кВт. При оптимальном частотном регулировании поддержание температуры на выходе двухступенчатой секции охлаждения возможно во всём диапазоне допустимых температур в соответствии с технологическим регламентом эксплуатации от 20 °С до 25 °С. Потребляемая мощность на охлаждение газа при увеличении температуры газа, поддерживаемой на выходе двухступенчатой секции АВО газа, снижается, что связано с необходимостью отводить меньшее количества тепла и, соответственно, с меньшим потреблением мощности вентиляторами. Если принять потребляемую мощность при дискретном способе управления за 100 %, то мощность, потребляемая при частотном управлении, в зависимости от требуемой температуры на выходе двухступенчатой секции охлаждения, составляет от 45,8 % до 35,3 %, что более чем в 2 раза меньше, чем при способе дискретных переключений.

**Таблица 1.** Результаты расчёта потребляемой мощности

**Table 1.** Results of power consumption calculation

| Способ управления       | Температура на выходе секции $T_2$ , °С | Тепловой КПД секции, $\eta_c$ | Суммарная потребляемая мощность $\Sigma P$ , кВт | Потребляемая мощность относительно способа дискретных переключений, % |
|-------------------------|---|-------------------------------|--|---|
| Дискретные переключения | 20,8                                    | 0,725                         | 37,00  | 100   |
| Частотный               | 20*                                     | 0,733                         | 16,96  | 45,8  |
| Частотный               | 21                                      | 0,723                         | 15,94  | 43,1  |
| Частотный               | 22                                      | 0,712                         | 15,06  | 40,7  |
| Частотный               | 23                                      | 0,701                         | 14,31  | 38,7  |
| Частотный               | 24                                      | 0,691                         | 13,66  | 36,9  |
| Частотный               | 25**                                    | 0,680                         | 13,08  | 35,3  |

Примечания:  
 \* — минимально допустимая температура по технологическому регламенту, °С;  
 \*\* — максимально допустимая температура по технологическому регламенту, °С.

## Выводы

1. Особенностью двухступенчатой схемы охлаждения газа является взаимное влияние тепловых КПД каждой ступени. Показано, что взаимное влияние тепловых КПД двух ступеней наиболее эффективно, можно использовать при раздельном частотном управлении электроприводами вентиляторов каждой ступени.

2. На основе уравнения для общего теплового КПД секции, состоящей из двух подключенных последовательно ступеней аппаратов АВО1 и АВО2, получена целевая функция оптимального раздельного управления ЧРП АВО газа каждой ступени по критерию минимума

потребляемой мощности. Определение оптимальных частот вращения электроприводов вентиляторов выполняется при заданном значении температуры газа на выходе.

На примере работы установки воздушного охлаждения газа дожимной компрессорной станции показано, что использование оптимальных частот вращения вентиляторов АВО газа при раздельном частотном управлении с оптимальным распределением тепловой нагрузки между ступенями охлаждения позволяет уменьшить потребление мощности по отношению к способу регулирования дискретными переключениями более чем в два раза.

## Список источников

1. СТО 2-2.3-377-2009. Регламент эксплуатации серийных АВО северных месторождений при температурах окружающего воздуха до минус 50 °С. М.: ЦКБН, 2009. С. 10, 4.

2. Пат. № 2458256 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/00. Способ автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения газа / А.М. Абакумов, С.В. Алимов, Л.А. Мигачёва, В.Н. Мосин, Д.В. Плешаков. № 2010112551/06, Заявлено 31.03.2010; Оpubл. 10.08.2012. Бюл. № 22.

3. Пат. № 91605 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/00. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, Л.А. Мигачёва, В.Н. Мосин, Д.В. Плешаков. № 2009136833/22, Заявлено 05.10.2009; Оpubл. 20.02.2010. Бюл. № 5.

4. Пат. № 106310 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/02. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа / О.В. Крюков. № 2011111667/07, Заявлено 28.03.2011; Оpubл. 10.07.2011. Бюл. № 19.

5. Пат. № 91606 РФ, МПК С 2 F 04 D 27/02. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, П.А. Захаров, Д.А. Аникин, Д.С. Дадонов. Заявлено 20.02.2010, Оpubл. 10.07.2011. Бюл. № 19.

6. Scherbinin S., Krasnov A., Prakhova M. Predictive Gas Air-Cooling Unit Automated Control Systems // Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. 2020. P. 312–317. DOI:10.1109/RusAutoCon-49822.2020.9208034. EDN: FOERTO.

7. Kroger, Detlev G. Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers: Thermal-Flower Performance Evaluation and Design. 2004. URL: <https://scholar.sun.ac.za/items/92c5ba61-b8f6-47d1-93b7-0ed269b451d2>.

8. Устинов Е.В. Расчет теплового КПД аппаратов воздушного охлаждения газа с инверторным приводом // Научный журнал Российского газового общества. 2014. № 4. С. 93–97.

9. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А. Способ управления частотно-регулируемым приводом АВО газа при двухступенчатом охлаждении // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 3. С. 177-194. <http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2019-3-177-194>. DOI: 10.17122/ogbus-2019-3-177-194. EDN: SCZFMW.

10. Пашкин В.В., Ивашкин О.Н. Алгоритм выбора оптимальных частот вращения вентиляторов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа с частотным приводом // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов / отв. ред. В.А. Шабанов; редкол.: С.Г. Конесев, М.И. Хакимьянов, П.А. Хлюпин, Р.Т. Хазиева. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. С. 62-66. EDN: SWCADS.

11. Корнилов В.Ю., Масков Л.Р. Разработка модели электротехнического комплекса для аппаратов воздушного охлаждения газа газового промысла № 1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной системой электроснабжения в программе matlab/simulink // Известия высших учебных заведений. Проблемы энерге-

тики. 2022. Т.24. №2. С. 50–71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-50-71. EDN: MUGGPH.

12. Ziyodullo E., Holboiv F. Modernization of Control Systems of Electric Drives of Mine Lifting Machines. E3S Web of Conferences: 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, Kemerovo, 3–5 October 2018 г. Kemerovo: EDP Sciences, 2018. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103006>.

13. Прибытков И. А. Теоретические основы теплотехники / Под ред. И.А. Прибыткова. М.: Академия, 2004. 464 с.

14. Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615234 «Программа расчёта оптимальных частот вращения электроприводов АВО газа в двухступенчатой схеме охлаждения газа» / В.В. Пашкин, О.Н. Ивашкин, В.А. Шабанов. 2015612035, Заявлено 23.05.2015; Оpubл. 23.06.2015.

## References

1. STO 2-2.3-377-2009. *Reglament ekspluatatsii seriynykh AVO severnykh mestorozhdeniy pri temperaturakh okruzhayushchego vozdukhha do minus 50 °S* [STO 2-2.3-377-2009. Regulations for the Operation of Serial Air Coolers in Northern Fields at Ambient Temperatures Down to Minus 50 °C]. Moscow, TsKBN Publ., 2009. P. 10, 4. [in Russian].

2. Abakumov A.M., Alimov S.V., Migachova L.A., Mosin V.N., Pleshakov D.V. *Sposob avtomaticheskogo upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Method for Automatic Control of Gas Air Cooling Devices]. Patent No. 2458256, 2012. [in Russian].

3. Kiyanov N.V., Kryukov O.V., Migachova L.A., Mosin V.N., Pleshakov D.V. *Sistema upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Control System for Gas Air Cooling Devices]. Patent No. 91605, 2010. [in Russian].

4. Kryukov O.V. *Sistema upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Control System for Gas Air Cooling Devices]. Patent No. 106310, 10.07.2011. [in Russian].

5. Kiyanov N.V., Kryukov O.V., Zakharov P.A., Anikin D.A., Dadonov D.S. *Sistema upravleniya apparatami vozdushnogo okhlazhdeniya gaza* [Control System for Gas Air Cooling Devices]. Patent No. 91606, 2011. [in Russian].

6. Scherbinin S., Krasnov A., Prakhova M. Predictive Gas Air-Cooling Unit Automated Control Systems. *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020*, 2020, pp. 312–317. doi: 10.1109/RusAuto-Con49822.2020.9208034. EDN: FOERTO.

7. Kroger, Detlev G. *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers: Thermal-Flower Performance Evaluation and Design*. 2004. URL: <https://scholar.sun.ac.za/items/92c5ba61-b8f6-47d1-93b7-0ed269b451d2>.

8. Ustinov Ye.V. Raschet teplovogo KPD apparatov vozdushnogo okhlazhdeniya gaza s invertornym privodom [Calculation of the Thermal Efficiency of Gas Air Cooling Devices with Inverter Drive]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva — Scientific Journal of the Russian Gas Society*, 2014, No. 4, pp. 93–97. [in Russian].

9. Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A. Sposob upravleniya chastotno-reguliruyemym privodom AVO gaza pri dvukhstupenchatom okhlazhdenii [Control Method of Variable Frequency Drive of Air-Cooled Heat Exchanger under Two-Stage Cooling]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» — Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 3, pp. 177–194. <http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2019-3-177-194>. doi: 10.17122/ogbus-2019-3-177-194. EDN: SCZFMW. [in Russian].

10. Pashkin V.V., Ivashkin O.N. Algoritm vybora optimal'nykh chastot vrashcheniya ventilyatorov AVO gaza v dvukhstupenchatoy skheme okhlazhdeniya gaza s chastotnym privodom [Algorithm for Selecting the Optimal Rotation Speeds of Gas Air Coolers in a Two-Stage Gas Cooling Scheme with a Frequency Drive]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Povysheniye nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»*, otv. red. V.A. Shabanov; redkol.: S.G. Konesev, M.I. Khakim'yanov, P.A. Khlyupin, R.T. Khaziyeva [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]; Resp. Ed. V.A. Shabanov; Editorial Board: S.G. Konesev, M.I. Khakimyanov, P.A. Khlyupin, R.T. Khaziyeva]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2015, pp. 62–66. EDN: SWCADS. [in Russian].

11. Kornilov V.YU., Maskov L.R. Razrabotka modeli elektrotekhnicheskogo kompleksa dlya apparatov vozdushnogo okhlazhdeniya gaza gazovogo promysla No. 1 OOO «Gazprom dobycha Yamburg» s tsentralizovannoy sistemoy elektro-snabzheniya v programme matlab/simulink [Development of a Model of an Electrical Complex for Gas Air Cooling Devices of Gas Field №1 Gazprom Dobycha Yamburg Llc with a Centralized Power Supply System in the Matlab/Simulink Program]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki — News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2022, Vol. 24, No. 2, pp. 50–71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-50-71. EDN: MUGGPH. [in Russian].

12. Ziyodullo E., Holboiv F. Modernization of Control Systems of Electric Drives of Mine Lifting Machines. *E3S Web of Conferences: 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, Kemerovo, 3–5 October 2018 g.* Kemerovo, EDP Sciences, 2018. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103006>.

13. Pribytkov I.A. *Teoreticheskiye osnovy teplotekhniki* [Theoretical Foundations of Heat Engineering]. Ed. by I.A. Pribytkov. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 464 p. [in Russian].

14. Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A. *Programma raschota optimal'nykh chastot vrashcheniya elektroprivodov AVO gaza v dvukhstupenchatoy skheme okhlazhdeniya gaza* [Program for Calculating the Optimal Rotation Speeds of Electric Gas Air Cooler Drives in a Two-Stage Gas Cooling Scheme]. Certificate of the Russian Federation on State Registration of a Computer Program No. 2015615234, 2015. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 06.12.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 25.12.2023.*

*The article was submitted 06.12.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 25.12.2023.*

Научная статья

УДК 621.316.925.1

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-84-94

## АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ПАРАМЕТРЫ АВАРИЙНОГО И ДОАВАРИЙНОГО РЕЖИМОВ

*Александр Владимирович Сорокин**Alexander V. Sorokin**старший преподаватель «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия**Виталий Алексеевич Шабанов**Vitaliy V. Shabanov**кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры  
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*

### Актуальность

Однофазные замыкания на землю являются наиболее часто встречающимся видом повреждений в сетях с изолированной нейтралью. При этом не существует универсальных решений для локализации и поиска однофазных замыканий. Наличие информации о емкостных токах поврежденной линии может стать основой для разработки новых алгоритмов релейной защиты и автоматики для локализации и ликвидации однофазных замыканий в сетях с изолированной нейтралью. Современной тенденцией в распределительных сетях 6–35 кВ является разработка и внедрение технологий интеллектуальных электрических сетей, которые позволяют производить высокоточные измерения и передачу данных. В статье представлен алгоритм вычисления емкостных токов при однофазных замыканиях на землю, использующий технологии интеллектуальных электрических сетей.

### Цель исследования

Разработка алгоритма вычисления емкостных токов линии при однофазном замыкании на землю с использованием параметров аварийного и доаварийного режимов. 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.

### Ключевые слова

однофазное замыкание на землю, сети с изолированной нейтралью, поперечная емкостная проводимость линии

## Результаты

Представлен и подробно описан алгоритм вычисления емкостных токов при однофазном замыкании на землю, использующий параметры аварийного и доаварийного режимов. Проведенные исследования разработанного алгоритма с помощью имитационного моделирования показали высокую точность вычисления емкостных токов в режиме однофазного замыкания на землю.

**Для цитирования:** Сорокин А. В., Шабанов В. А. Алгоритм вычисления емкостных токов при однофазном замыкании на землю, использующий параметры аварийного и доаварийного режимов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 84-94. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-84-94>.

Original article

## AN ALGORITHM FOR CALCULATING CAPACITIVE CURRENTS IN SINGLE-PHASE EARTH FAULT USING THE PARAMETERS OF EMERGENCY AND PRE-EMERGENCY MODES

### Relevance

Single-phase earth faults are the most common type of damage in networks with an isolated neutral. At the same time, there are no universal solutions for localization and search of single-phase circuits. The availability of information on the capacitive currents of a damaged line can become the basis for the development of new relay protection and automation algorithms for the localization and elimination of single-phase short circuits in networks with an isolated neutral. The current trend in 6–35 kV distribution networks is the development and implementation of intelligent power grid technologies that allow for high-precision measurements and data transmission. The article presents, developed by the authors, an algorithm for calculating capacitive currents in single-phase earth faults using technologies of intelligent electrical networks.

### Aim of research

Development of an algorithm for calculating capacitive line currents in single-phase earth fault using the parameters of emergency and pre-emergency modes. Creation of a simulation model of a device implementing the developed algorithm, and subsequent evaluation of the algorithm based on the results of simulation modeling.

### Research methods

The study of the developed method was performed in the Matlab Simulink software package.

### Results

An algorithm for calculating capacitive currents in a single-phase earth fault using the parameters of emergency and pre-emergency modes is presented and described in detail. The conducted studies of the developed algorithm using simulation modeling have shown high accuracy in calculating capacitive currents in the single-phase earth fault mode.

### Keywords

single-phase earth fault, networks with isolated neutral, transverse capacitive line conductivity

**For citation:** Sorokin A. V., Shabanov V. A. Algoritm vychisleniya yemkostnykh tokov pri odnofaznom zamykanii na zemlyu, ispol'zuyushchiy parametry avariynogo i doavariynogo rezhimov [An Algorithm for Calculating Capacitive Currents in Single-Phase Earth Fault Using the Parameters of Emergency and Pre-Emergency Modes]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 84-94 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-84-94>.

## Введение

В сетях с изолированной нейтралью для защиты линий от однофазных замыканий на землю применяется токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП). Это наиболее простой и распространенный тип селективной защиты, основанный на контроле тока нулевой последовательности, который замеряется в начале линии [1]. Отстраивается такая защита от собственного емкостного тока линии нулевой последовательности. Для выделения токов нулевой последовательности в сетях среднего напряжения чаще всего используется трансформатор тока нулевой последовательности.

Как известно, ток нулевой последовательности, зафиксированный в начале линии, обусловлен емкостью всех неповрежденных линий сети и не равен току нулевой последовательности в месте замыкания. При этом ток нулевой последовательности, замеренный в начале поврежденной линии, не содержит собственный емкостной ток нулевой последовательности поврежденной линии. Это является причиной невозможности применения ТЗНП в сетях, у которых емкость одной из линий сопоставима с суммарной емкостью остальных присоединений сети или больше её. Наличие информации о комплексах емкостных токов поврежденной линии могло бы стать основой для совершенствования существующего алгоритма ТЗНП.

Кроме того, в настоящее время разрабатываются и совершенствуются двухсторонние методы определения расстояния до однофазного замыкания на землю, требующие наличие информации о комплексах емкостных токов, протекающих в емкостях неповрежденных фаз относительно земли и в междуфазных емкостях [2].

Очевидно, что емкостные токи контролируемой линии можно предвари-

тельно определить расчетным путем и использовать результаты расчета в разрабатываемых алгоритмах. Однако применение предварительного расчета при определении емкостных токов сопровождается рядом проблем. Во-первых, емкостные параметры линии могут существенно отличаться от паспортных и справочных данных, что приводит к значительным погрешностям вычисления. В соответствии с [3], погрешность вычисления емкостных токов редко получается меньше 15 %. Во-вторых, модули и аргументы комплексов емкостных токов, протекающих в емкостях неповрежденных фаз относительно земли, зависят от комплексов фазных напряжений неповрежденных фаз, которые в свою очередь зависят от ряда факторов, описанных в [4]. Среди них можно выделить: наличие и величина переходного сопротивления, удаленность места замыкания, величина суммарного емкостного тока сети. Учесть эти факторы в предварительно вычисленном значении комплексов емкостных токов невозможно. Таким образом, значения емкостных токов поврежденной линии, полученные в результате предварительного расчета, могут существенно отличаться от реальных значений и не могут быть использованы в алгоритмах релейной защиты и определения места повреждения (ОМП).

В типовой инструкции по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ и в литературе [3, 5] представлены методы прямого и косвенного измерения тока однофазного замыкания, предназначенные для настройки дугогасящих реакторов. Известны альтернативные косвенные методы определения тока однофазного замыкания на землю, основанные на включения резистивного или емкостного элемента между испытуемой фазой и землей, с дальнейшим замером и ана-

лизом фазных и линейных напряжений [6, 7]. Однако прямые и косвенные измерения также не позволяют учесть влияние отмеченных выше факторов на величину тока однофазного замыкания в режиме реального времени и не могут быть применены в алгоритмах релейной защиты и средствах ОМП, предназначенных для поиска и ликвидации однофазных замыканий на землю в режиме реального времени.

Современные тенденции развития электрических сетей предполагают постепенное внедрение каналов связи, использующих различные технологии передачи данных [8, 9]. Кроме того, в современных алгоритмах ОМП известно совместное использование электрических параметров аварийного и доаварийного (предшествующего) режимов [10–12]. Опираясь на возможность анализа электрических параметров доаварийного и аварийного режимов, замеренных с двух сторон контролируемой линии, авторами статьи был разработан алгоритм вычисления емкостных токов при однофазных замыканиях на землю. По принципу действия алгоритм не использует паспортных и справочных данных, не требует применения дополнительных устройств и позволяет определить емкостной ток поврежденной линии в режиме реального времени. Это позволяет исключить погрешности, связанные с несоответствием паспортных данных с реальными значениями и учесть все факторы, влияющие на емкостные токи. Это позволяет применить вычисленные значения в алгоритмах релейной защиты и ОМП.

В статье использованы следующие обозначения: для параметров доаварийного режима — нижний индекс «L»; для параметров аварийного режима — нижний индекс «S»; для параметров, зафиксированных в начале линии — верхний индекс «/»; для параметров, зафиксиро-

ванных в конце линии — верхний индекс «//».

### Емкостные токи контролируемой линии в доаварийном и аварийном режимах

Как известно, линии электропередачи характеризуются продольными сопротивлениями линии и поперечной емкостной проводимостью [13]. Емкостная проводимость линии электропередачи зависит от емкости между фазами линии  $C_{\text{МФ}}$  и емкостью фаз относительно земли  $C_0$ . Треугольник междуфазных емкостей преобразуется в эквивалентную звезду междуфазных емкостей для упрощения анализа [14, 15]. На рисунке 1 представлена схема замещения линии с эквивалентной звездой междуфазных емкостей и звездой, образованной емкостями относительно земли.

В доаварийном режиме в начале линии (через трансформаторы тока ТА1) протекают следующие токи:

1. фазные токи нагрузки  $\dot{I}_{\phi(H)L}$ ;
2. емкостные токи  $\dot{I}_{\phi(CM)L}$ , обусловленные междуфазными емкостями;
3. емкостные токи  $\dot{I}_{\phi(C0)L}$ , обусловленные емкостями фаз относительно земли.

В конце линии (через трансформаторы тока ТА2) протекают только токи нагрузки  $\dot{I}_{\phi(H)L}$ . При этом разность токов в начале и конце линии в доаварийном режиме будет содержать только емкостные токи:

$$\Delta \dot{I}_{\phi L} = \dot{I}'_{\phi L} - \dot{I}''_{\phi L} = \dot{I}_{\phi(C0)L} + \dot{I}_{\phi(CM)L}. \quad (1)$$

Как известно, при металлическом однофазном замыкании на землю напряжение в поврежденной фазе уменьшается до нуля, а в неповрежденных фазах увеличивается до уровня линейного. Возникает напряжение смещения нейтрали. При увеличении переходного сопротивления напряжения в неповрежденных фазах и напряжение смещения нейтрали уменьшаются, а в поврежден-



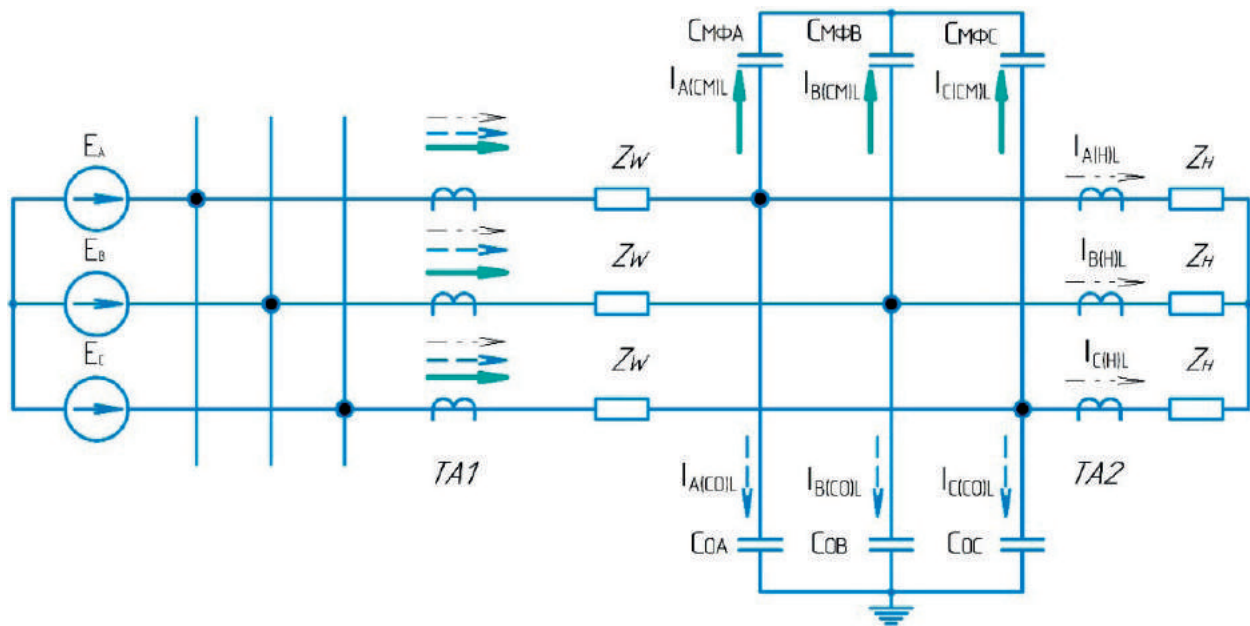


Рисунок 1. Схема контролируемой линии

Figure 1. Diagram of the controlled line

ной — увеличиваются. При изменении переходного сопротивления концы векторов фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали перемещаются по

полуокружностям [16]. На рисунке 2 представлена векторная диаграмма, построенная в предположении, что поврежденной является фаза «А».

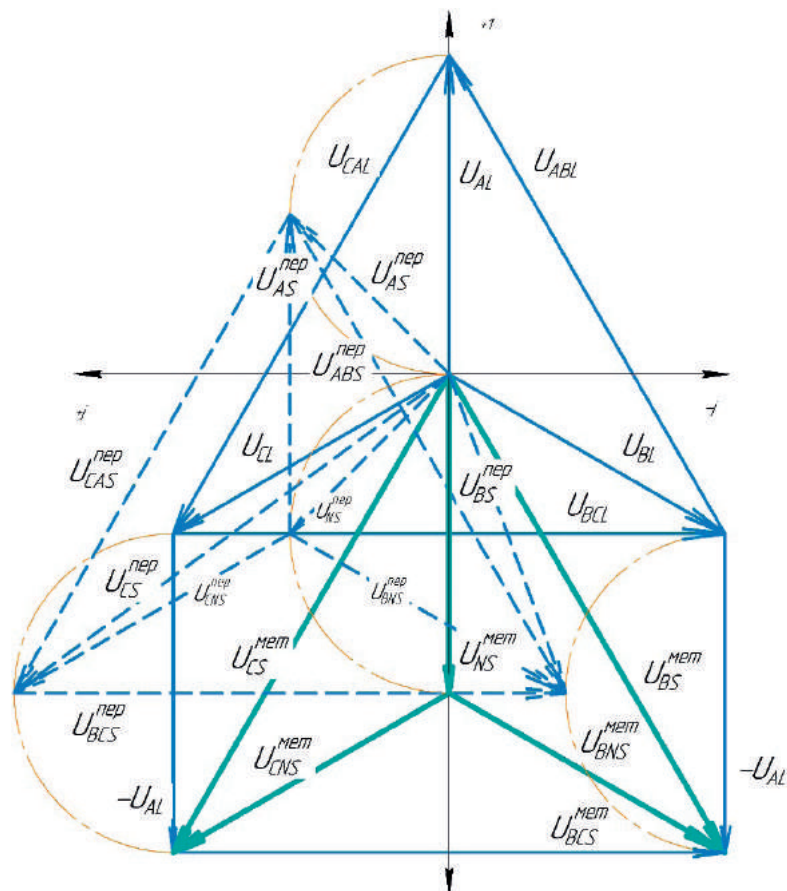


Рисунок 2. Векторные диаграммы фазных напряжений

Figure 2. Vector diagrams of phase voltages

Емкостные токи, протекающие в преобразованных междуфазных емкостях эквивалентной звезды междуфазных емкостей в доаварийном режиме:

$$\dot{I}_{\Phi(CM)L} = \frac{\dot{U}_{\Phi L}}{jX_{(CM)}}; \quad (2)$$

где  $\dot{U}_{\Phi L}$  — фазное напряжение доаварийного режима;

$X_{(CM)}$  — междуфазное емкостное сопротивление.

После возникновения однофазного замыкания емкостные сопротивления, образующие эквивалентную звезду междуфазных емкостных сопротивлений, остаются неизменными. Каждое емкостное сопротивление эквивалентной звезды оказывается под действием напряжения соответствующей фазы по отношению к искусственной нейтральной точке —  $\dot{U}_{ANS}$ ;  $\dot{U}_{BNS}$ ;  $\dot{U}_{CNS}$  (рисунок 2). Емкостные токи, протекающие в преобразованной междуфазной емкости в аварийном режиме:

$$\dot{I}_{\Phi(CM)S} = \frac{\dot{U}_{\Phi S} - \dot{U}_{NS}}{jX_{(CM)}}. \quad (3)$$

где  $\dot{U}_{\Phi S}$  — фазное напряжение аварийного режима;

$\dot{U}_{NS}$  — напряжение смещения нейтрали.

Напряжения на емкостных сопротивлениях, образующих эквивалентную звезду междуфазных емкостей, остаются неизменными после возникновения однофазного замыкания, вне зависимости от наличия переходного сопротивления и его величины. При этом емкостные токи, протекающие в эквивалентной звезде междуфазных емкостей, также остаются неизменными после возникновения однофазного замыкания:

$$\dot{I}_{\Phi(CM)S} = \dot{I}_{\Phi(CM)L}. \quad (4)$$

Фазные емкостные токи, протекающие в емкостях фаз относительно земли в доаварийном режиме:

$$\dot{I}_{\Phi(C0)L} = \frac{\dot{U}_{\Phi L}}{jX_{(C0)}}; \quad (5)$$

где  $X_{(C0)}$  — емкостное сопротивление фазы относительно земли.

При возникновении однофазного замыкания на землю токи в емкостях неповрежденных фаз относительно земли:

$$\dot{I}_{H\Phi(C0)S} = \frac{\dot{U}_{H\Phi S}}{jX_{(C0)}}, \quad (6)$$

где  $\dot{U}_{H\Phi S}$  — напряжение неповрежденной фазы в аварийном режиме.

Емкостные токи, протекающие в емкостях фаз относительно земли, изменяются пропорционально изменению фазных напряжений соответствующих фаз:

$$\frac{\dot{I}_{H\Phi(C0)S}}{\dot{I}_{H\Phi(C0)L}} = \frac{\dot{U}_{H\Phi S}}{\dot{U}_{H\Phi L}}. \quad (7)$$

С учетом равенства (4) изменение разностей фазных токов в неповрежденной фазе после возникновения однофазного замыкания:

$$\begin{aligned} \delta \dot{I}_{H\Phi S} &= \Delta \dot{I}_{H\Phi S} - \Delta \dot{I}_{H\Phi L} = \\ &= \delta \dot{I}_{H\Phi(C0)S} = \dot{I}_{H\Phi(C0)S} - \dot{I}_{H\Phi(C0)L}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Delta \dot{I}_{H\Phi S}$  — разность фазных токов в неповрежденной фазе в аварийном режиме.

По аналогии с (1) для разности фазных токов неповрежденных фаз в аварийном режиме можно записать:

$$\Delta \dot{I}_{H\Phi S} = \dot{I}'_{H\Phi S} - \dot{I}''_{H\Phi S} = \dot{I}_{H\Phi(C0)S} + \dot{I}_{H\Phi(CM)S}. \quad (9)$$

Из выражений (1), (4), (7), (9) после преобразований можно получить формулу для вычисления емкостных токов, протекающих в емкостях неповрежденных фаз на землю, в доаварийном режиме:

$$\dot{I}_{H\Phi(C0)S} = \frac{\Delta \dot{I}_{H\Phi S} - \Delta \dot{I}_{H\Phi L}}{\frac{\dot{U}_{H\Phi S}}{\dot{U}_{H\Phi L}} - 1}; \quad (10)$$

и в аварийном режиме:

$$\dot{I}_{\text{HФ(CO)L}} = \frac{\Delta \dot{I}_{\text{HФL}} - \Delta \dot{I}_{\text{HФС}}}{\frac{\dot{U}_{\text{HФL}}}{\dot{U}_{\text{HФС}}} - 1}. \quad (11)$$

### Алгоритм вычисления емкостных токов

Для вычисления емкостных токов необходимо выполнение нижеприведенных действий.

1. В нормальном режиме фиксируются электрические величины доаварийного режима: фазные токи в начале контролируемой линии —  $\dot{I}'_{\text{ФL}}$  и в ее конце —  $\dot{I}'_{\text{ФL}}$ , а также фазные напряжения в начале линии —  $\dot{U}'_{\text{ФL}}$ .

2. После возникновения однофазного замыкания фиксируются электрические величины аварийного режима: фазные токи в начале контролируемой линии —  $\dot{I}''_{\text{ФС}}$  и в ее конце —  $\dot{I}''_{\text{ФС}}$ , а также фазные напряжения в начале линии —  $\dot{U}'_{\text{ФС}}$ .

3. По напряжениям, зафиксированным в аварийном режиме, определяются поврежденная и неповрежденные фазы. Селективные алгоритмы определения поврежденной фазы описаны в [17–19].

4. Вычисляются разности фазных токов по значениям, зафиксированным в доаварийном режиме по (1).

5. Вычисляются разности фазных токов по значениям, зафиксированным в аварийном режиме по (9).

6. Вычисляются емкостные токи, протекающие в емкостях неповрежденных фаз относительно земли, в доаварийном режиме по (10) и в аварийном режиме по (11).

Для вычисления тока в месте замыкания выполняются следующие расчеты.

7. Вычисляются емкостные токи, протекающие в неповрежденных фазах через преобразованную междуфазную емкость по электрическим величинам аварийного режима:

$$\dot{I}_{\text{HФ(CM)}} = \Delta \dot{I}_{\text{HФС}} - \dot{I}_{\text{HФ(CO)S}}; \quad (12)$$

или с использованием электрических величин доаварийного режима:

$$\dot{I}_{\text{HФ(CM)}} = \Delta \dot{I}_{\text{HФL}} - \dot{I}_{\text{HФ(CO)L}}. \quad (13)$$

Вычисляется емкостной ток эквивалентной междуфазной емкости в поврежденной фазе:

$$\dot{I}_{\text{ПФ(CM)}} = -(\dot{I}_{\text{HФ1(CM)}} + \dot{I}_{\text{HФ2(CM)}}). \quad (14)$$

8. Вычисляется ток, протекающий в месте однофазного замыкания:

$$\dot{I}_{\text{OЗЗ}} = \Delta \dot{I}_{\text{ПФС}} - \dot{I}_{\text{ПФ(CM)}}. \quad (15)$$

где  $\Delta \dot{I}_{\text{ПФС}}$  — разность фазных токов в поврежденной фазе в аварийном режиме.

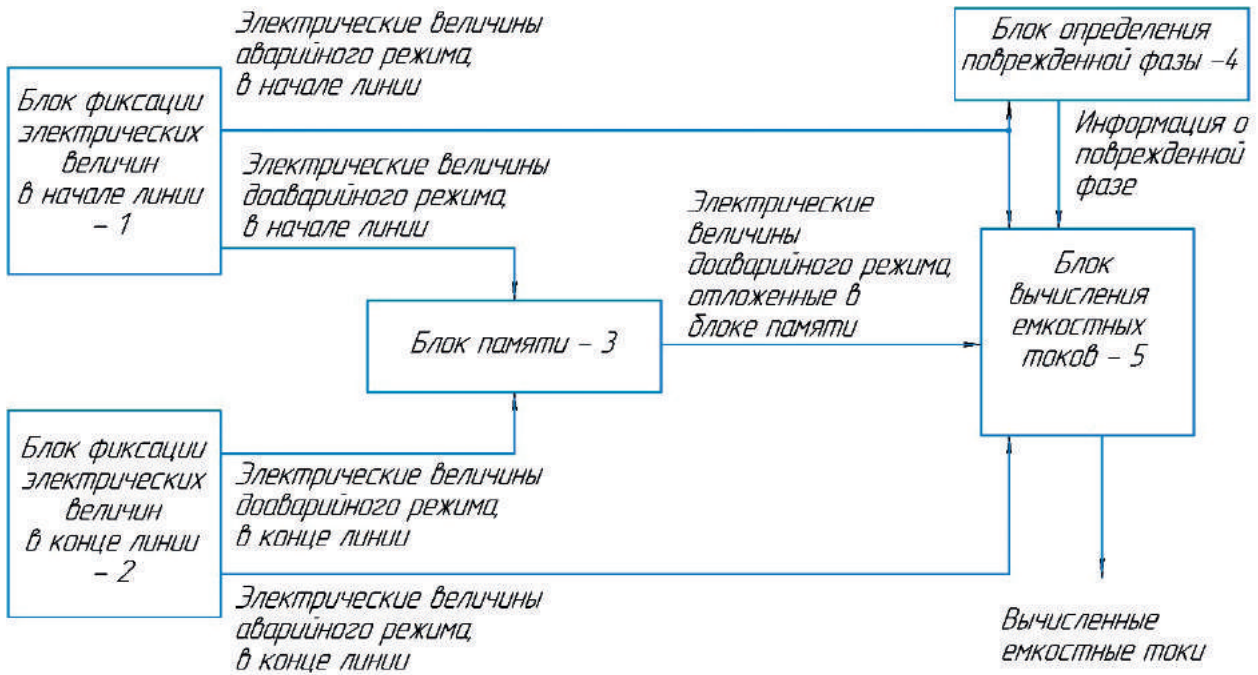
Структурная схема, поясняющая работу алгоритма определения емкостных токов, представлена на рисунке 3.

### Исследование работы алгоритма

Для анализа работы разработанного метода определения емкостных токов были разработаны модели сети и устройства определения емкостных токов в программном комплексе Matlab Simulink. В таблице 1 представлены параметры сети.

При исследовании измерялись на модели и вычислялись по предложенному алгоритму емкостные токи поврежденной линии в неповрежденных фазах В и С. Исследование алгоритма производилось при изменении двух влияющих факторов — расстояния до однофазного замыкания на землю и переходного сопротивления в месте однофазного замыкания. Для оценки точности алгоритма выполнен расчет относительных погрешностей по величине тока и углу. Результаты исследования приведены в таблице 2.

Из анализа таблицы 2 следует, что во всех проведенных экспериментах токовые и угловые погрешности емкостных токов неповрежденных фаз не превышают 2 %. На работу алгоритма определения емкостных токов не оказывают существенного влияния ни наличие переходного сопротивления, ни расстояние до однофазного замыкания.



**Рисунок 3.** Структурная схема устройства, реализующего алгоритм определения емкостных токов

**Figure 3.** Block diagram of a device implementing an algorithm for determining capacitive currents

**Таблица 1.** Основные характеристики модели сети

**Table 1.** Main characteristics of the network model

| Параметры сети   | Значение  |
|--|-----------|
| Номинальное напряжение, кВ                             | 6         |
| Тип линий  | кабельные |
| Суммарная протяженность линий, отходящих от шин ПС, км | 15        |
| Протяженность контролируемой линии, км                 | 5         |
| Суммарный емкостной ток сети, А                        | 8,2       |

**Таблица 2.** Результаты исследования

**Table 2.** The results of the research

| Величина переходного сопротивления            | 0 Ом                    |                         |                         | 200 Ом                  |                        |                        |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
|   | 0                       | 0,5                     | 1                       | 0                       | 0,5                    | 1                      |
| Расстояние до замыкания, о.е.                 | 0                       | 0,5                     | 1                       | 0                       | 0,5                    | 1                      |
| Измеренное значение — $\dot{I}_{B(C0)S}$ , А  | $1,6e^{-j61,8^\circ}$   | $1,56e^{-j61,5^\circ}$  | $1,54e^{-j61,4^\circ}$  | $1,28e^{-j70,2^\circ}$  | $1,27e^{-j71,5^\circ}$ | $1,24e^{-j69,8^\circ}$ |
| Вычисленное значение — $\dot{I}_{B(C0)S}$ , А | $1,62e^{-j60,9^\circ}$  | $1,59e^{-j60,7^\circ}$  | $1,57e^{-j60,6^\circ}$  | $1,26e^{-j70,7^\circ}$  | $1,29e^{-j70,3^\circ}$ | $1,23e^{-j69,4^\circ}$ |
| Токовая погрешность, %                        | -1,25                   | -1,92                   | -1,95                   | 1,56                    | -1,57                  | 0,81                   |
| Угловая погрешность, %                        | 1,46                    | 1,3                     | 1,3                     | -0,71                   | 1,68                   | 0,57                   |
| Измеренное значение — $\dot{I}_{C(C0)S}$ , А  | $1,59e^{-j120,5^\circ}$ | $1,57e^{-j121,5^\circ}$ | $1,55e^{-j122,1^\circ}$ | $1,62e^{-j134,3^\circ}$ | $1,64e^{-j135^\circ}$  | $1,6e^{-j135,2^\circ}$ |
| Вычисленное значение — $\dot{I}_{C(C0)S}$ , А | $1,62e^{-j120,8^\circ}$ | $1,6e^{-j121,8^\circ}$  | $1,58e^{-j122,5^\circ}$ | $1,6e^{-j133,8^\circ}$  | $1,67e^{-j135^\circ}$  | $1,6e^{-j134,7^\circ}$ |
| Токовая погрешность, %                        | -1,89                   | -1,91                   | -1,94                   | 1,23                    | -1,83                  | 0                      |
| Угловая погрешность, %                        | -0,25                   | -0,25                   | -0,33                   | 0,37                    | 0                      | 0,37                   |

## Выводы

1. Предложен алгоритм вычисления емкостных токов линии при однофазном замыкании на землю в сетях, использующий параметры доаварийного и аварийного режимов, позволяющий вычислять емкостные токи, обусловленные емкостной проводимостью поврежденной линии.
2. Исследование работы алгоритма, выполненное на имитационной модели

## Список источников

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2007. 639 с. ISBN 5-06-004826-8.
2. Сорокин А.В. Двухсторонний метод определения места однофазного замыкания на землю с использованием параметров аварийного и доаварийного режимов // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 5. С. 94–107. EDN: GEAADT.
3. Черников А.А. Компенсация емкостных токов в сетях незаземленной нейтралью. М.: Энергия, 1974. 96 с.
4. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Признаки поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 3–4. С. 89–100. doi: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89-100. EDN: HBMKZO.
5. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 150 с.
6. Утегулова Д.Б. Методы определения параметров изоляции и тока однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью // Наука и техника Казахстана. 2001. № 2. С. 186–191. EDN: YOBSNV.
7. Утегулов Б.Б., Утегулов А.Б., Уахитова А.Б., Бегентаев Б.М. Разработка методов определения токов однофазного замыкания на землю и утечки в несимметричной сети с изолированной нейтралью // Наука и техника Казахстана. 2010. № 1. С. 18–20. EDN: YPXFHW.
8. Шатров А.Ф. Структура активно-адаптивных электрических сетей: учебник. М.: Научная библиотека, 2022. 126 с. ISBN 978-5-907497-40-5.
9. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I. Improving the Efficiency and Reliability of RPA Systems of Digital Step-Down Substations and Digital Grids // E3S Web of Conferences. 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202021601044.
10. Phadke A.G., Thorp J.S. Computer Relaying for Power Systems. 2nd ed.. 2009. 344 p. ISBN 978-0-470-05713-1.
11. Козлов В.Н., Павлов А.О., Бычков Ю.В. Развитие микропроцессорных средств определения места повреждения на линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 2 (15). EDN: SEHBQX.
12. Murari Mohan Saha, Jan Jozef Izykowski, Eugeniusz Rosolowski. Fault-Location on Power Networks. Springer-Verlag London Limited, 2010.
13. Dashti Rahman. Accuracy Improvement of Impedance-Based Fault Location Method for Power Distribution Network Using Distributed-Parameter Line Model // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2014. No. 24 (3). doi: 10.1002/etep.1690.
14. Авербух А.М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. Л.: Энергия, 1975. 416 с.
15. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. Л.: Энергия, 1979. 184 с.
16. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы: учебник для электротехнических и энергетических вузов. М.: Энергия, 1970. 520 с.
17. Сорокин А.В., Шабанов В.А. Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 2. С. 52–62. doi: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-52-62. EDN: BNPORH.
18. Сорокин А.В. Метод определения поврежденной фазы в режиме однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Уфа, 13–16 апреля 2022 года. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. С. 74–78. EDN: JXCFRA.

19. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Использование модулей фазных напряжений для выбора поврежденной фазы при замыканиях на землю // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 92–100. doi: 10.25206/1813-8225-2023-187-92-100. EDN: PBQVHP.

## References

1. Andreyev V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya: uchebnyy dlya vuzov* [Relay Protection and Automation of Power Supply Systems: a Textbook for Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 639 p. ISBN 5-06-004826-8. [in Russian].
2. Sorokin A.V. Dvukhstoronniy metod opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu s ispol'zovaniyem parametrov avariynogo i doavariynogo rezhimov [A Two-Way Method for Determining the Location of a Single-Phase Earth Fault, Using the Parameters of Emergency and Pre-Emergency Modes]. *Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal «Nauchnyye trudy KubGTU»* — Scientific Works of the Kuban State Technological University, 2023, No. 5, pp. 94–107. EDN: GEADT. [in Russian].
3. Chernikov A.A. *Kompensatsiya yemkostnykh tokov v setyakh nezazemlennoy neytral'yu* [Compensation of Capacitive Currents in Networks with an Ungrounded Neutral]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 96 p. [in Russian].
4. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Priznaki povrezhdennoy fazy pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu [Features of a Faulty Phase at Single Phase-to-Ground Faults]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities*, 2022, Vol. 18, No. 3–4, pp. 89–100. doi: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89-100. EDN: HBMKZO. [in Russian].
5. Tsapenko Ye.F. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV* [Ground Faults in 6–35 kV Networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 150 p. [in Russian].
6. Utegulova D.B. Metody opredeleniya parametrov izolyatsii i toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Methods for Determining the Insulation Parameters and Single-Phase Ground Fault Current in Networks with an Isolated Neutral]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana — Science and Technology of Kazakhstan*, 2001, No. 2, pp. 186–191. EDN: YOBSNV. [in Russian].
7. Utegulov B.B., Utegulov A.B., Uakhitova A.B., Begentayev B.M. Razrabotka metodov opredeleniya tokov odnofaznogo zamykaniya na zemlyu i utechki v nesimmetrichnoy seti s izolirovannoy neytral'yu [Development of Methods for Determining Single-Phase Ground Fault and Leakage Currents in an Asymmetrical Network with an Isolated Neutral]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana — Science and Technology of Kazakhstan*, 2010, No. 1, pp. 18–20. EDN: YPXFVW. [in Russian].
8. Shatrov A.F. *Struktura aktivno-adaptivnykh elektricheskikh setey: uchebnyy* [Structure of Active-Adaptive Electrical Networks: Textbook]. Moscow, Nauchnaya biblioteka, 2022. 126 p. ISBN 978-5-907497-40-5. [in Russian].
9. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khromtsov E.I. Improving the Efficiency and Reliability of RPA Systems of Digital Step-Down Substations and Digital Grids. *E3S Web of Conferences*, 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202021601044.
10. Phadke A.G., Thorp J.S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. 2009. 344 p. ISBN 978-0-470-05713-1.
11. Kozlov V.N., Pavlov A.O., Bychkov Yu.V. Razvitiye mikroprotsessornykh sredstv opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektropredachi [Trends of Microprocessor-Based Relays for Fault Location on Power Transmission Lines]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya — Relay protection and automation*, 2014, No. 2 (15). EDN: SEHBQX. [in Russian].
12. Murari Mohan Saha, Jan Jozef Izykowski, Eugeniusz Rosolowski. *Fault-Location on Power Networks*. Springer-Verlag London Limited, 2010.
13. Dashti Rahman. Accuracy Improvement of Impedance-Based Fault Location Method for Power Distribution Network Using Distributed-Parameter Line Model. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2014. No. 24 (3). doi: 10.1002/etep.1690.
14. Averbukh A.M. *Releynaya zashchita v zadachakh s resheniyami i primerami* [Relay Protection in Problems with Solutions and Examples]. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 416 p. [in Russian].
15. Averbukh A.M. *Primery raschetov nepolnofaznykh rezhimov i korotkikh zamykaniy* [Examples of Calculations of Open-Phase Modes and Short Circuits]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 184 p. [in Russian].
16. Ul'yanov S.A. *Elektromagnitnyye perekhodnyye protsessy: uchebnyy dlya elektrotekhnicheskikh i energeticheskikh vuzov* [Electromagnetic Transient Processes: a textbook for Electrical Engineering and Energy Universities]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 520 p. [in Russian].
17. Sorokin A.V., Shabanov V.A. Algoritm opredeleniya povrezhdennoy fazy pri odnofaznom zamykanii na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Algorithm for Determining the

Damaged Phase during a Single-Phase Earth Fault in Networks with an Isolated Neutral]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities*, 2022, Vol. 18, No. 2, pp. 52–62. doi: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-52-62. EDN: BNPORH. [in Russian].

18. Sorokin A.V. Metod opredeleniya povrezhdennoy fazy v rezhime odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Method for Determining a Damaged Phase in the Mode of a Single-Phase Ground Fault in Networks with an Isolated Neutral]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovaniye predpriyatiy»* [Collection of

Scientific Papers of the VII International Scientific and Technical Conference «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, 13–16 aprelya 2022 goda. Ufa, Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet, 2022, pp. 74–78. EDN: JXCFRA. [in Russian].

19. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Ispol'zovaniye moduley faznykh napryazheniy dlya vybora povrezhdennoy fazy pri zamykaniyakh na zemlyu [The Use of Phase Voltage Modules to Select the Damaged Phase in Case of Single-Phase Earth Fault]. *Omskiy nauchnyy vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2023, No. 3 (187), pp. 92–100. doi: 10.25206/1813-8225-2023-187-92-100. EDN: PBQVHP. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 11.12.2023; одобрена после рецензирования 14.12.2023; принята к публикации 18.12.2023.*

*The article was submitted 11.12.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 18.12.2023.*

Научная статья

УДК 621.313.333

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-95-107

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ



*Михаил Юрьевич Петушков*

*Mikhail Yu. Petushkov*

*доктор технических наук, доцент,*

*профессор кафедры электроники и микроэлектроники,*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,*

*Магнитогорск, Россия*



*Сергей Сергеевич Холодилов*

*Sergey S. Kholodilov*

*соискатель кафедры электроники и микроэлектроники,*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,*

*Магнитогорск, Россия*

### Актуальность

В настоящее время можно добиться существенного повышения технико-экономических показателей предприятий за счет повышения надежности электрического и механического оборудования. В этом случае происходит увеличение времени между текущими и капитальными ремонтами, и значительно сокращаются эксплуатационные расходы и вместе с ними материальные и другие ресурсы. Металлургическое производство является самым затратным по электропотреблению, в нем сконцентрировано значительное количество электроприводов. Больше ста лет асинхронные электрические машины занимают ключевые позиции в регулируемом электроприводе переменного тока. Наряду с ними в последние десятилетия активно развиваются новые типы электрических машин, которые конструктивно в активной части не содержат обмоток на роторе, ротор несимметричный в магнитном отношении, на статоре может быть одна или две обмотки. К таким машинам относят синхронные реактивные и индукторные электрохимические преобразователи. Все исследования носят частный характер и не охватывают весь класс электрических машин в целом. Нет единых аналитических зависимостей для электромагнитного момента, активной и реактивной мощностей, коэффициента мощности, методов инженерных расчетов машин, методов оптимизации, единых подходов к синтезу управляющих воздействий на статорные обмотки, расчету потерь, не рассматриваются особенности синтеза таких машин для конкретных производственных механизмов с учетом характера нагрузочных и скоростных диа-

### Ключевые слова

спектр, генераторный режим, токовая диагностика, вейвлет-анализ, СДПМ, сигнатурный анализ



грамм и режимов работы в расширенном диапазоне скоростей и моментов нагрузки. В связи с вышеизложенным комплексное исследование синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) является актуальным, при этом существует необходимость определения диагностических признаков неисправностей как зарождающихся, так и проявившихся.

#### **Цель исследования**

Статья посвящена вопросам получения диагностической информации в генераторном режиме СДПМ. Показано, что генераторный режим является эффективным режимом для получения диагностического сигнала, позволяющим в полной мере реализовать методы математического анализа сигналов, без внесения погрешностей в виде спектральных составляющих от работы преобразователей.

#### **Методы исследования**

В работе применены методы теоретических и экспериментальных исследований. Для проведения теоретических исследований использовались программные пакеты Excel и MathCad; программный пакет MatLab для проведения вейвлет-анализа и анализа Фурье; программный пакет Elcut для разработки компьютерной модели и проведения имитационного моделирования; основы теории вейвлетов.

#### **Результаты**

Режим генератора является эффективным режимом получения диагностического сигнала, позволяющим в полной мере реализовать методы математического анализа сигналов, не внося ошибок в виде спектральных составляющих, которые неизбежно возникают при работе преобразователей любого типа.

Использование режима генератора в системах диагностики СДПМ позволяет получить значительно более чистый диагностический сигнал, что повышает точность диагностики, снижает количество ложных диагнозов и минимизирует эффект маскировки. Этот режим не требует каких-либо изменений в структуре системы управления, т.к. при работе любого СДПМ так или иначе при снижении скорости или остановке, двигатель кратковременно работает в генераторном режиме.

**Благодарности:** Выражаем благодарность компании MathWorks за предоставление доступа к студенческой версии программы MatLab для выполнения вейвлет-преобразований и выполнения математического моделирования.

**Для цитирования:** Петушков М. Ю., Холодилов С. С. Определение диагностического сигнала для мониторинга синхронных двигателей с постоянными магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 95-107. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-95-107>.

Original article

## **DEFINITION OF A DIAGNOSTIC SIGNAL FOR MONITORING PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS**

#### **Relevance**

Nowadays, it is possible to achieve a significant increase in the technical and economic indicators of enterprises by improving the reliability of electrical and mechanical equipment. In this case, the time between current and overhaul repairs is increased and operating costs and, together with them, material and other resources are significantly reduced. Metallurgical

#### **Keywords**

spectrum, oscillator mode, current diagnostics, wavelet analysis, PMSM, signature analysis

production is the most expensive in terms of electrical consumption and a significant number of electric drives are concentrated there. For more than a hundred years, asynchronous electric machines have occupied key positions in regulated AC electric drives. Along with them, new types of electric machines have been actively developed in recent decades, which structurally in the active part do not contain windings on the rotor, the rotor is asymmetrical in magnetic relation, the stator can have one or two windings. Such machines include synchronous reactive and inductor electromechanical converters. All studies are of a private nature and do not cover the whole class of electric machines as a whole. There are no unified analytical dependencies for electromagnetic torque, active and reactive powers, power factor, methods of engineering calculations of machines, optimization methods, unified approaches to the synthesis of control actions on stator windings, calculation of losses, the peculiarities of synthesis of such machines for specific production mechanisms are not considered, taking into account the nature of load and speed diagrams and modes of operation in an extended range of speeds and load torques. In connection with the above-mentioned, a comprehensive study of permanent magnet synchronous motor (PMSM) is relevant, and there is a need to determine the diagnostic signs of faults both incipient and manifested.

#### **Aim of research**

The article is devoted to the issues of obtaining diagnostic information in the generator mode of PMSM. It is shown that the generator mode is an effective mode for obtaining a diagnostic signal, allowing to fully implement the methods of mathematical analysis of signals, without introducing errors in the form of spectral components from the work of converters.

#### **Research methods**

The methods of theoretical and experimental research were applied in the work. To conduct theoretical studies used software packages Excel and MathCad; software package MatLab for wavelet analysis and Fourier analysis; software package Elcut to develop a computer model and simulation modeling; the basics of wavelet theory.

#### **Results**

The generator mode is an effective mode of obtaining the diagnostic signal, which allows to fully implement the methods of mathematical analysis of signals without introducing errors in the form of spectral components, which inevitably occur during the operation of converters of any type.

The use of the generator mode in PMSM diagnostic systems allows obtaining a much cleaner diagnostic signal, which increases the diagnostic accuracy, reduces the number of false diagnoses and minimizes the masking effect. This mode does not require any changes in the structure of the control system, because during the operation of any PMSM, one way or another, when the speed is reduced or stopped, the motors briefly operates in generator mode.

**Acknowledgements:** We express our gratitude to MathWorks for providing access to the student version of MatLab for performing wavelet transformations and mathematical modeling.

**For citation:** Petushkov M. Yu., Kholodilov S. S. Opredeleniye diagnosticheskogo signala dlya monitoringa sinkhronnykh dvigateley s postoyannymi magnitami [Definition of a Diagnostic Signal for Monitoring Permanent Magnet Synchronous Motors]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 95-107. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-95-107>.

## Введение

Токовая диагностика электропривода основана на наличии в спектре потребляемого тока гармонических составляющих различной частоты, в том числе побочных составляющих, характеризующих дефекты электромагнитной системы электродвигателя [1–3]. Каждая неисправность вносит в частотный спектр гармоники, характерные для каждого типа неисправности. Любая механическая поломка вносит изменения в воздушный немагнитный зазор, в индуктивность системы и, следовательно, влияет на спектральные составляющие потребляемого тока, по появлению и изменению которых можно судить о характере неисправности, времени ее возникновения, степени влияния на характеристики двигателя [4]. Неисправности могут изменить суммарные энергии отдельных или всех частотных уровней. Однако предварительный расчет характеристических частот и их отражение в реальном сигнале приводят к ложной идентификации неисправности, поскольку реальные дефекты могут вызвать большее изменение частотного спектра. Кроме того, существует эффект маскировки, когда характеристические частоты скрываются другими источниками шума в двигателе [5]. Чтобы преодолеть эти проблемы, предложены дискретный вейвлет-анализ и спектр более высокого порядка в ненагруженном состоянии [6, 7]. Кроме того, применяется модифицированный биспектр, основанный на функции амплитудной модуляции токового сигнала и используемый для одновременного объединения как нижней, так и верхней боковых полос, а также разработана эффективная диагностическая функция для классификации отказов на основе биспектрального анализа [8]. Для обнаружения неисправностей в электромагнитах был предложен подход, основанный на GLRT (обобщенном

коэффициенте правдоподобия Гаусса), точность этого подхода была доказана численным анализом [9]. Также для обработки токового сигнала и выделения сигнатуры, связанной с выходом из строя стержня ротора на холостом ходу, можно использовать преобразование Гильберта, однако его реальная эффективность еще не доказана [10]. Некоторые интеллектуальные подходы к диагностике отказов в системе активных магнитных подшипников с одним входом и одним выходом были разработаны и экспериментально продемонстрированы с использованием расширенной модели линейной динамики объекта вместе с фильтром Калмана для оценки состояний отказа [11]. Для анализа неисправностей исполнительных механизмов в системе подшипников с магнитной левитацией также используются оценка состояния и оценка параметров для обнаружения и идентификации этих неисправностей [12]. В дополнение к чисто электрическим вариантам было предложено акустическое обнаружение неисправностей коллекторных двигателей с использованием классификаторов ближайшего среднего (NM) и машины опорных векторов (SVM) для классификации данных. Хотя эффективность вышеперечисленных подходов доказана, соответствующие алгоритмы сложны, что приводит к тому, что скорость диагностики не соответствует требованиям высокоскоростных приводов с магнитными подшипниками [13] по времени появления гармонических составляющих.

Для преодоления эффекта маскировки сигнала, а также для исключения ложной идентификации несуществующих неисправностей в качестве источника диагностической информации предлагается использовать генераторный режим синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) и ток линии в данном режиме.

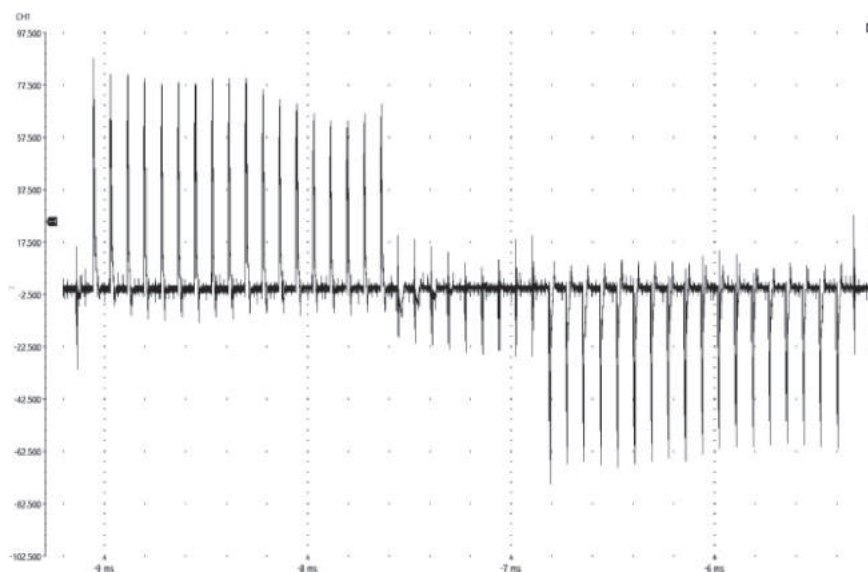
### Особенности получения диагностической информации СДПМ

Рассмотрим типичный случай работы СДПМ с использованием векторной системы управления, реализующей синусоидальную форму тока в обмотках с помощью ШИМ. На рисунке 1 показан график токового сигнала, снятого с линии СДПМ. На рисунке 2 представлен график напряжения на той же линии относительно нейтрали.

Следует обратить внимание на ШИМ-модуляцию, при которой формируется

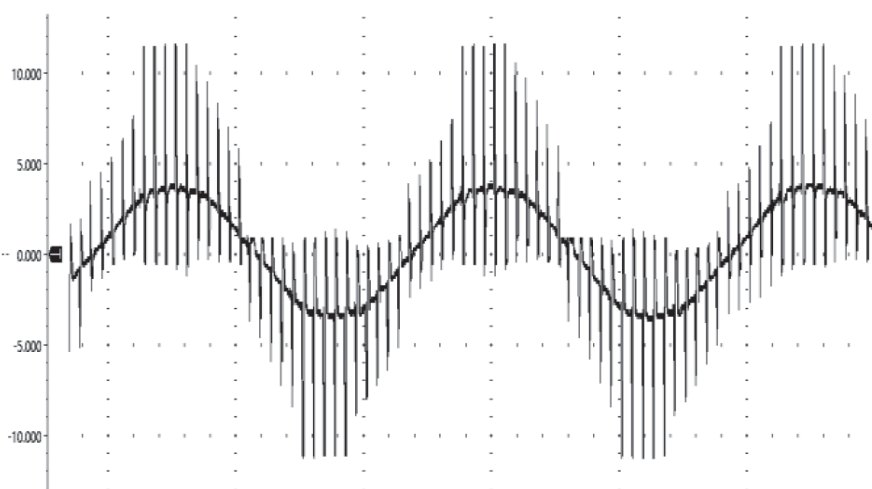
синусоида ШИМ для управления обмотками СДПМ. Анализ этого сигнала без фильтрации с целью поиска сигнатур неисправностей может привести к большому количеству ложных результатов как ложноположительных, так и ложноотрицательных.

Если, например, прямой анализ Фурье позволяет выявить спектры сигнатур неисправностей, оказывающих существенное влияние на сигнал, то неисправности, вклад которых в сигнал хотя бы на 1 порядок меньше амплитуды основного сигнала, обнаружить будет



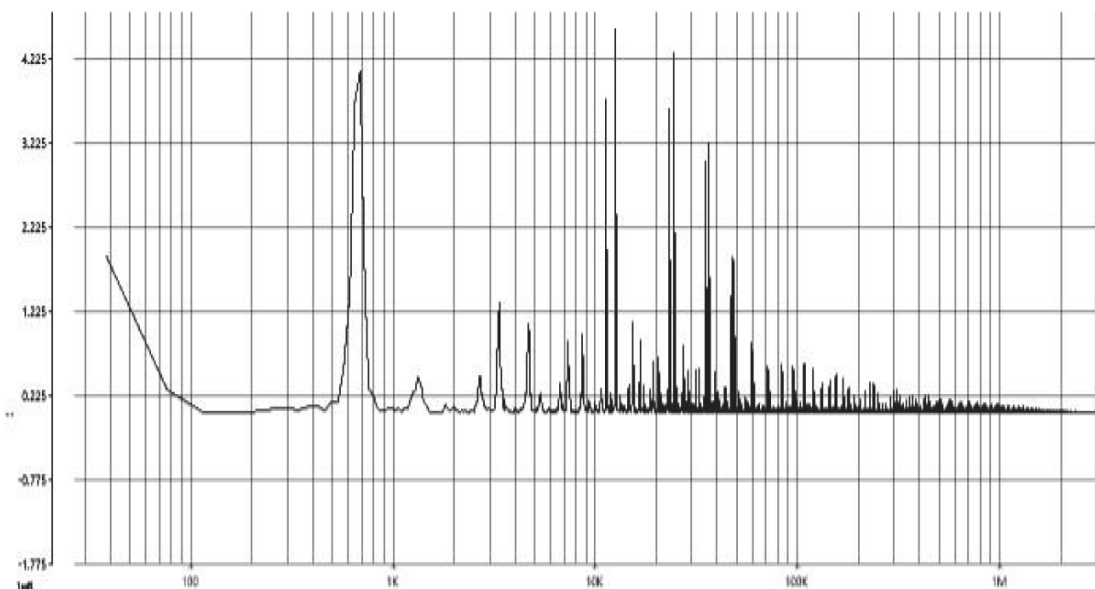
**Рисунок 1.** График линейного тока СДПМ

**Figure 1.** Linear current plot of the PMSM



**Рисунок 2.** Фазное напряжение относительно нейтрали

**Figure 2.** Phase voltage relative to neutral



**Рисунок 3.** Спектр сигнала тока исправного СДПМ, векторное управление

**Figure 3.** Current signal spectrum of a serviceable PMSM, vector control

практически невозможно, как было показано в [14]. То же самое относится и к вейвлет-преобразованию, как еще более чувствительному методу, использование которого в сильно зашумленном сигнале не всегда оправдано, особенно при поиске сигнатур неисправностей, не вносящих существенного вклада в спектр сигнала. Для наглядности сравним ток исправного и неисправного СДПМ, на рисунке 3 показан спектр сигнала, график которого показан на рисунке 1, исправного СДПМ.

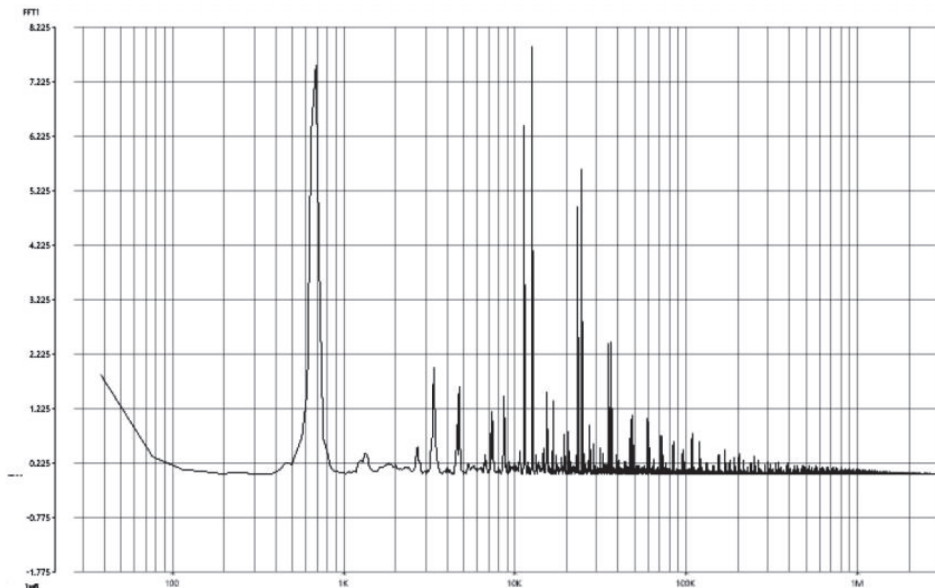
График рисунка 3 построен в логарифмическом масштабе и отображает достаточно типичную картину для СДПМ с векторным управлением. Как видно, основная гармоника составляет 700 Гц, что при 14 магнитах дает частоту 3000 об/мин, спектр высоких частот, соответствующих основной частоте ШИМ, представляет собой целый набор частотных спектров, простирающихся до 1 МГц, что соответствует 98-й гармонике ШИМ-сигнала. На рисунке 4 показан спектр токового сигнала того же СДПМ с внесенной неисправностью — эксцентриситетом ротора. Амплитуда

эксцентриситета не превышает зазор в подшипниках на оси, что соответствует 0,15 мм. Частота сигнала  $f$  при эксцентриситете ротора с учетом количества магнитов в СДСМ определяется по формуле:

$$f = \frac{f_{\text{осн}}}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  — количество постоянных магнитов СДПМ. Следовательно, учитывая формулу (1), получаем частоту гармоники эксцентриситета, равную 50 Гц.

Сравнивая два спектра, видим, что фактически разницы в спектрах в логарифмическом масштабе нет. При выборе шкалы по нормальному масштабу разницы также практически нет, что проверено экспериментально. Именно в таких случаях явно проявляется недостаток анализа Фурье как метода выявления неисправности из-за эффекта расширения спектра. Однако как вейвлет-анализ, так и прямое сравнение сигналов при использовании примитивных систем управления практически не дают эффекта. Аналогичные результаты получаются и при других неисправностях, таких как короткозамкнутые витки, крошение и разрушение магнитов, смещение



**Рисунок 4.** Спектр сигнала тока СДПМ с эксцентриситетом ротора, векторное управление

**Figure 4.** Current signal spectrum of PMSM with rotor eccentricity, vector control

ние магнитов и вообще нарушение геометрии магнитной системы. Следует отметить, что сложные системы управления, использующие фильтрацию, подавление гармоник и т.п., широко применяются только с относительно дорогими приводами, стоимость которых значительно превышает стоимость систем управления с вышеперечисленными функциями. Однако даже в случае векторных систем управления фильтрация гармоник часто отсутствует, как в примере выше. В случае диагностики бесщеточных двигателей постоянного тока (БДПТ) степень загрязнения спектра еще выше. В результате вышеуказанных недостатков анализа сигнала, снятого с линии в режиме нагрузки, были исследованы и предложены способы получения диагностической информации из сигнала СДПМ в режиме генератора.

#### **Генераторный режим как источник диагностической информации**

Рассмотрим генераторный режим работы СДПМ, который довольно легко

реализуется замыканием ключей управления, при этом обмотки СДПМ фактически находятся в  $Z$ -состоянии и могут служить источником ЭДС для диагностической аппаратуры. На рисунке 5 представлена типовая мостовая схема включения силовых транзисторов в системе управления СДПМ. По такой схеме реализованы как синусные контроллеры управляемые ШИМ, так и трапецеидальные, да и вообще в принципе любая система преобразования энергии постоянного тока в переменный многофазный. Если рассматривать данную систему управления как систему управления СДПМ электромобилей или приводов с необходимостью реализации дополнительных режимов, то, очевидно, что возникают как минимум два дополнительных режима управления:

— Режим холостого хода — в этом режиме достаточно снять управляющее напряжение с затворов всех транзисторов. Встроенные защитные диоды включены встречно-параллельно, поэтому машина будет находиться в свободном

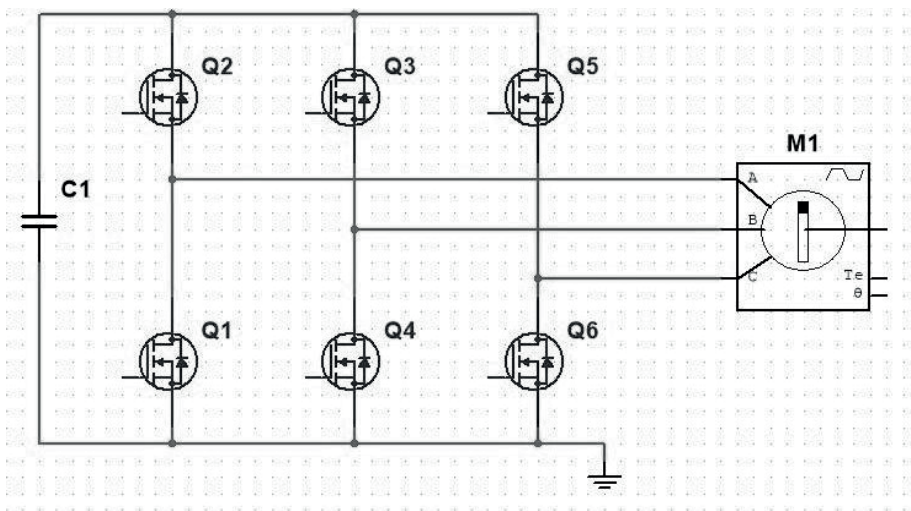


Рисунок 5. Мостовая схема включения силовых транзисторов

Figure 5. Bridge circuit for power transistors

вращении и действовать как генератор ЭДС, этот режим будет рассмотрен далее как источник диагностической информации.

— Режим динамического торможения — в этом режиме 2 или 3 транзистора верхней или нижней группы переводятся в режим насыщения, при этом обмотки СДПМ фактически закорачиваются, и происходит динамическое торможение. Более того, в отличие от двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя СДПМ имеет ненулевой тормозной момент даже при отсутствии вращения. Частично этот режим можно использовать и для получения диагностической информации, особенно он будет полезен при поиске короткозамкнутых витков.

Любой СДПМ по своему принципу является генератором ЭДС синусоидальной или трапециевидной формы. Данное утверждение основано на конструктивных особенностях СДПМ, а именно на наличии в конструкции постоянных магнитов. Наведенная ЭДС даже без нагрузки несет информацию о процессах, происходящих внутри СДПМ, т.е. несет диагностическую информацию. Еще больше диагностической информации можно получить, подключив к

нагрузке генерируемую ЭДС. Рассмотрим работу СДПМ в генераторном режиме и реализацию этого режима в системе управления СДПМ.

На рисунке 6 показан график управления скоростью и моментом как в положительном, так и в отрицательном направлении, процесс в квадрантах 1 и 3 определяется как двигательный, что означает, что скорость и крутящий момент совпадают по направлению. Процесс в квадрантах 2 и 4 соответствует генераторному режиму, иногда его называют регенеративным режимом.

Это означает, что скорость и крутящий момент направлены в противоположные стороны. Крутящий момент и скорость двигателя имеют разные направления вращения, это заставит двигатель производить мощность. Данную энергию можно вернуть в электрическую систему.

На рисунке 7 показаны два графика работы двигателя, увеличивающие скорость за счет крутящего момента двигателя в положительном направлении. На второй фазе скорость все еще положительна, а крутящий момент отрицателен — двигатель останавливается, работает как генератор. Работа третьей фазы будет аналогична первой фазе, но направление

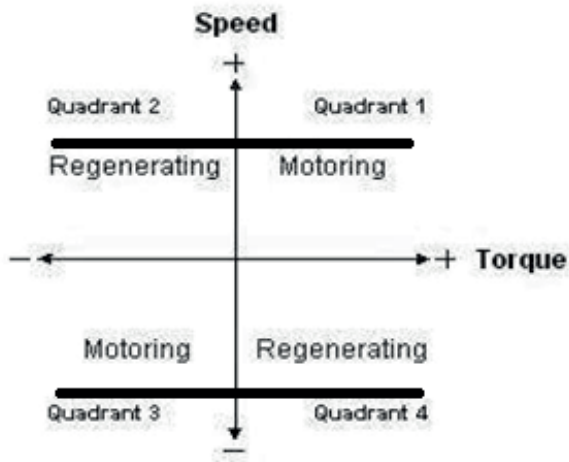


Рисунок 6. График скорости и момента СДПМ

Figure 6. Speed and torque graph of the PMSM

противоположно исходному, что по-прежнему является функцией двигателя, фаза 4 аналогична второй фазе, но с противоположным направлением. В генераторном режиме обмотки СДПМ будут индуцировать ЭДС индукции, которая в рабочем режиме является противо-ЭДС. Этот процесс описывается стандартными уравнениями электромагнитной индукции.

При вращении ротора на каждой обмотке активной длины  $L$  наводится ЭДС индукции, равная:

$$e_i = B_i L v, \quad (2)$$

где  $B_i$  — магнитная индукция, индуцируемая в каждом  $i$ -ом витке;

$v$  — скорость проводника относительно магнитного поля

Суммарная мгновенная величина ЭДС, наведенная во всей обмотке одной фазы, будет равна сумме всех ЭДС, наведенных на каждом витке и на каждом отдельном проводнике. Если предположить, что положение ротора определяется углом  $\vartheta$ , образованным плоскостью фазной обмотки А и осью полюса ротора S, в направлении вращающегося поля, то для фазы А распределение магнитной индукции обмотки статора можно определить с помощью выражения:

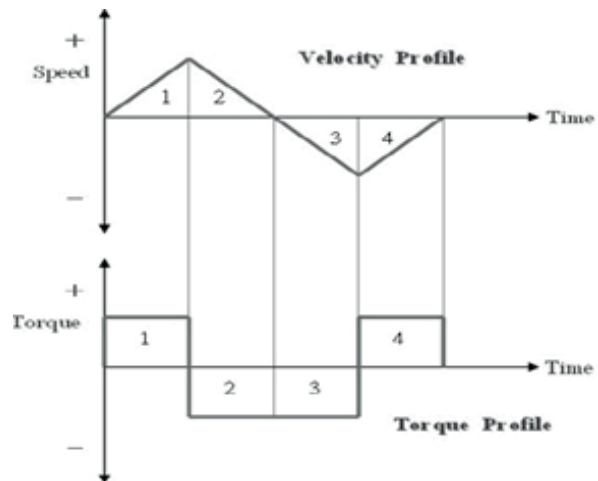


Рисунок 7. График скорости и момента двигателя

Figure 7. Motor speed and torque graph

$$B(\alpha) = B_m \cos(\alpha - \vartheta), \quad (3)$$

где  $\alpha$  — угол, между направлением вращения магнитного поля статора и плоскостью обмотки фазы А.

Опуская стандартные математические преобразования, учитывая закон Фарадея, получаем выражение для ЭДС обмотки А:

$$e_A = \frac{6}{\pi} w B_m l R \frac{d\vartheta}{dt} \cos \vartheta = C_e \frac{d\vartheta}{dt} \cos \vartheta; \quad (4)$$

$$C_e = \frac{6}{\pi} w B_m l R = \frac{2}{3} C_m, \quad (5)$$

где  $C_e$  — электрическая постоянная для машины.

Учитывая сдвиг фаз в пространстве, получаем для остальных обмоток:

$$e_B = \frac{d\vartheta}{dt} \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (6)$$

$$e_C = \frac{d\vartheta}{dt} \cos\left(\vartheta - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Согласно приведенным уравнениям, СДПМ независимо от конструкции представляет собой генератор трехфазной ЭДС. Конструкция влияет на форму генерируемой ЭДС, различают двигатели трапециевидной и синусоидальной формы, на рисунке 8 показаны формы индукции генерируемой ЭДС при вращении.

Согласно уравнению (4), величина ЭДС зависит от приложенной магнитной индукции, а форма индуцированного



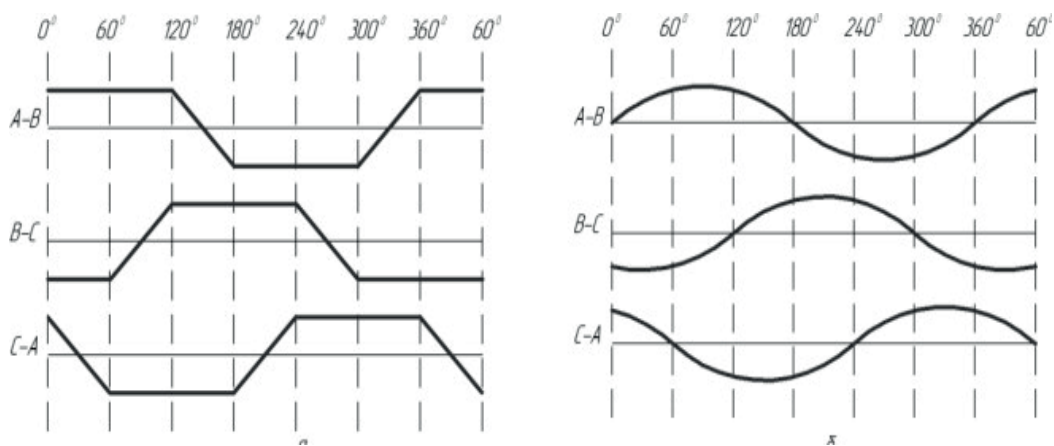


Рисунок 8. Форма ЭДС в зависимости от конструкции

Figure 8. EMF shape depending on the design

сигнала будет зависеть от конструкции магнитной системы, плотности намагничивания каждого постоянного магнита, формы статора, ротора и других характеристики, т.е. помимо формы, определяемой принципиальными отличиями конструкции, на саму ЭДС будет влиять ряд факторов, присущих конструкции или возникающих в процессе эксплуатации. Поэтому если учесть, что любые повреждения, даже незначительные, прямо или косвенно влияют на магнитное поле, магнитную проницаемость, магнитную индукцию и другие параметры, то можно сделать вывод, что любая неисправность влияет на спектральные характеристики генерируемой ЭДС.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что, анализируя спектр ЭДС генерируемой СДСМ в генераторном режиме, можно получить эталонную спектральную картину на исправном двигателе, и в последующем, отслеживая изменения спектральных характеристик, сделать выводы о наличии или об отсутствии определенных изменений в работе СДСМ и, следовательно, о наличии или отсутствии неисправностей, откладывающих свой отпечаток на спектральных характеристиках генерируемых ЭДС и тока в случае эквивалентного опыта холостого хода и короткого замыкания (замыкания на нагрузку) для обмоток СДПМ [15].

Для проверки возможности получения диагностического сигнала в генераторном режиме, т.е. для оценки влияния неисправностей на ЭДС в генераторном режиме используем СДСМ, содержащий 6 обмоток, образующих 3 фазы, и 8 магнитов, схема которого представлена на рисунке 9.

Обмотки двигателя расположены радиально напротив друг друга и находятся в одном знаке магнитного поля, что приводит к однонаправленному расположению обмоток. При этом напряжения с каждой катушки по одной фазе суммируются, т.к. соединяются последовательно с учетом направления обхода катушки. Если обратиться к уравнению (6), (7), то хорошо видно, что полная ЭДС определяется суммированием ЭДС от каждого витка, связанного магнитным потоком. Тогда график тока в генераторном режиме с активной нагрузкой в случае исправного двигателя будет представлять собой практически идеальную синусоиду или косинусоиду с начальным смещением.

Рассмотрим случай, когда произошло уменьшение коэрцитивной силы (частный случай размагничивания), например, в результате перегрева или нарушения технологии изготовления, или неисправности регулятора управления, в результате которого отдельный магнит

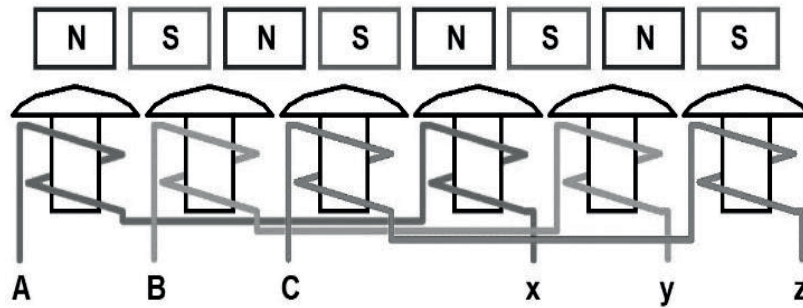


Рисунок 9. Схема СДПМ, 6 сердечников, 8 магнитов

Figure 9. Diagram of SDPM, 6 cores, 8 magnets

находился длительное время под действием магнитного поля противоположного знака с индукцией, превышающей его собственную.

Тогда уравнение (4) необходимо видоизменить, так как для одной группы обмоток  $B_m$  будет иметь меньшее значение, т.е. перед  $j$ -м проводником и после  $j+n$  проводника (где  $n$  — количество витков одной катушки)  $B_m$  имеет такое же значение, а на интервале от  $j$ -го до  $j+n$  проводника  $B_m$  имеет меньшее значение:

$$e^A = (2B_m l v \sum_{i=0}^j \cos(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha)) + (2B_{m1} l v \sum_{i=j}^{j+n} \cos(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha)) + (2B_m l v \sum_{i=j+n+1}^{w-1} \cos(\vartheta + \frac{\pi}{6} - \frac{\Delta\alpha}{2} - i \cdot \Delta\alpha)) . \quad (7)$$

Для этой неисправности описание наиболее простое, поскольку уменьшение коэрцитивной силы одного магнита не требует дополнительных преобразований. На рисунке 10 представлена кривая тока, снятая с обмотки фазы А для конструкции двигателя, представленной на рисунке 9, со сниженной коэрцитивной силой одного постоянного магнита.

В данном случае за коэффициент уменьшения коэрцитивной силы было принято значение 0,7. Совершенно аналогично преобразование производится на трапециевидном двигателе и вообще на любой магнитной системе с постоянными магнитами. Справедливость данного анализа подтверждается законом Фарадея, т.е. ЭДС магнитного потока является производной магнитного потока, в то же время магнитный поток

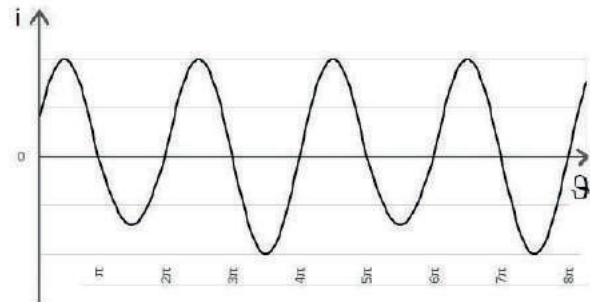


Рисунок 10. График тока в случае неисправности одного магнита

Figure 10. Current graph in case of failure of one magnet

является функцией модуля вектора магнитной индукции, взятого по объему, тогда для анализа характеристик магнитной системы, достаточно проанализировать спектр наведенной ЭДС. Также отметим, что  $e_A$  в (8) не зависит от частоты, т.е. спектральные составляющие ЭДС, разобранные по фазам, зависят только от колебаний различных порядков в магнитной системе, что необходимо для диагностики.

### Выводы

1. Проанализированы типичные неисправности СДПМ, которые возникают при работе данного типа двигателя в различных отраслях техники, в особенности это касается современного транспорта. Показано, что данные неисправности могут быть критичными для СДПМ, а также что любое изменение конфигурации магнитной системы влияет на линейный ток.

2. Проанализированы существующие методы диагностики СДПМ, выявлено, что большая часть данных методов основана на методах диагностики асинхронных приводов. Следует отметить, что некоторые методы диагностики, основанные на методах диагностики асинхронных переводов, применимы для диагностики СДПМ. Однако в отличие от асинхронных приводов СДПМ имеет некоторые отличительные особенности, в частности наличие высококоэрцитивных постоянных магнитов, что накладывает особенности на диагностику данного типа привода, в частности возможность использования генераторного режима.

#### Список источников

1. Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Петушков В.В., Купцов В.В. Современные методы диагностики и разработки асинхронных двигателей. 2010. 247 с. ISBN 978-5-9967-0155-1.
2. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S., Valyaev A.V. Signature Analysis of the Line Current of Permanent Magnet Synchronous Motors // Proceedings — 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 May 2021. Sochi, 2021. P. 283–287. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446323. EDN: DIRIZD.
3. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S. Application of Wavelet Analysis for Synchronization of Current Signals in the Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors // Proceedings — 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2022. P. 367–372. doi: 10.1109/PEAMI58441.2023.10299906.
4. Toliyat Hamid A., Subhasis N., Seungdeog C., Homayoun M. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis // CRC Press. 2012. P. 161. doi: 10.1201/b13008. ISBN 9781315221984.
5. Ilonen J., Kamarainen J.K., Lindh T., Ahola J., Kalviainen H., Partanen J. Diagnosis Tool for Motor Condition Monitoring // IEEE Transactions on Industry Applications. 2005. Vol. 41. No. 4. P. 963–971. doi: 10.1109/TIA.2005.851001.
6. Bouzida A., Touhami O., Ibtouen R. Fault Diagnosis in Industrial Induction Machines through Discrete Wavelet Transform // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. No. 58. P. 4385–4395. doi: 10.1109/TIE.2010.2095391.
7. Gu F., Wang T., Alwodai A. A New Method of Accurate Broken Rotor Bar Diagnosis Based on Modulation Signal Bispectrum Analysis of Motor Current Signals // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. No. 50–51. P. 400–413. doi: 10.1016/j.ymssp.2014.05.017.
8. Cade I.S., Keogh P.S., Sahinkaya M.N. Fault Identification in Rotor/Magnetic Bearing Systems Using Discrete Time Wavelet Coefficients // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2005. No. 10(6). P. 648–657. doi: 10.1109/TMECH.2005.859834.
9. Panadero R.P., Sanchez M.P., Guasp M.R. Improved Resolution of the MCSA Method via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor Asymmetries at Very Low Slip // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2009. No. 24. P. 52–59. doi: 10.1109/TEC.2008.2003207.
10. Noel N.K., Tammi K., Buckner G.D. Intelligent Kalman Filtering for Fault Detection on an Active Magnetic Bearing System // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2008. No. 25(12). P. 2757–2764. doi: 10.1115/DSCC2008-2122.
11. Tsai N.C., King Y.H., Lee R.M. Fault Diagnosis for Magnetic Bearing Systems // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. No. 23(4). P. 1339–1351. doi: 10.1016/j.ymssp.2008.08.012.
12. Aydin I., Karakose M., Akin E. An Approach for Automated Fault Diagnosis Based on a Fuzzy Decision Tree and Boundary Analysis of a Reconstructed Phase Space // ISA Transactions. 2014. No. 53. P. 220–229. doi: 10.1016/j.isatra.2013.11.004.

13. Nguyen N.P., Hong S.K. Sliding Mode Thau Observer for Actuator Fault Diagnosis of Quadcopter UAVs // *Applied Sciences*. 2018. No. 8. P. 1893. doi: 10.3390/app8101893.

14. Осипов Д.С. Модели и методы вейвлет-анализа несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей 0,4–110 кВ: дисс. ... д-ра техн. наук / Омский государственный технический университет. 2019. 305 с.

15. Гаврилов Р.С., Мустафаев Ю.Н. Управление синхронными машинами с постоянными магнитами: учебное пособие. СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2019. 78 с.

## References

1. Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Petushkov V.V., Kuptsov V.V. *Sovremennyye metody diagnostiki i razrabotki asinkhronnykh dvigateley* [Modern Methods of Diagnostics and Development of Asynchronous Motors]. 2010. 247 p. ISBN 978-5-9967-0155-1. [in Russian].

2. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S., Valyaev A.V. Signature Analysis of the Line Current of Permanent Magnet Synchronous Motors. *Proceedings — 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 May 2021*. Sochi, 2021. P. 283–287. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446323. EDN: DIRIZD.

3. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S. Application of Wavelet Analysis for Synchronization of Current Signals in the Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors. *Proceedings — 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2022, pp. 367–372. doi: 10.1109/PEAMI58441.2023.10299906.

4. Toliyat Hamid A., Subhasis N., Seungdeog C., Homayoun M. *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*. CRC Press, 2012, pp. 161. doi: 10.1201/b13008. ISBN 9781315221984.

5. Ilonen J., Kamarainen J.K., Lindh T., Ahola J., Kalviainen H., Partanen J. Diagnosis Tool for Motor Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, Vol. 41, No. 4, pp. 963–971. doi: 10.1109/TIA.2005.851001.

6. Bouzida A., Touhami O., Ibtouen R. Fault Diagnosis in Industrial Induction Machines through Discrete Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, No. 58, pp. 4385–4395. doi: 10.1109/TIE.2010.2095391.

7. Gu F., Wang T., Alwodai A. A New Method of Accurate Broken Rotor Bar Diagnosis Based on Modulation Signal Bispectrum Analysis of Motor Current Signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, No. 50–51, pp. 400–413. doi: 10.1016/j.ymssp.2014.05.017.

8. Cade I.S., Keogh P.S., Sahinkaya M.N. Fault Identification in Rotor/Magnetic Bearing Systems Using Discrete Time Wavelet Coefficients. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, No. 10(6), pp. 648–657. doi: 10.1109/TMECH.2005.859834.

9. Panadero R.P., Sanchez M.P., Guasp M.R. Improved Resolution of the MCSA Method via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor Asymmetries at Very Low Slip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, No. 24, pp. 52–59. doi: 10.1109/TEC.2008.2003207.

10. Noel N.K., Tammi K., Buckner G.D. Intelligent Kalman Filtering for Fault Detection on an Active Magnetic Bearing System // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2008. No. 25(12). P. 2757–2764. doi: 10.1115/DSCC2008-2122.

11. Tsai N.C. King Y.H., Lee R.M. Fault Diagnosis for Magnetic Bearing Systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, No. 23(4), pp. 1339–1351. doi: 10.1016/j.ymssp.2008.08.012.

12. Aydin I., Karakose M., Akin E. An Approach for Automated Fault Diagnosis Based on a Fuzzy Decision Tree and Boundary Analysis of a Reconstructed Phase Space. *ISA Transactions*, 2014, No. 53, pp. 220–229. doi: 10.1016/j.isatra.2013.11.004.

13. Nguyen N.P., Hong S.K. Sliding Mode Thau Observer for Actuator Fault Diagnosis of Quadcopter UAVs. *Applied Sciences*, 2018, No. 8, pp. 1893. doi: 10.3390/app8101893.

14. Osipov D.S. *Modeli i metody veyvlet-analiza nesinusoidal'nykh nestatsionarnykh rezhimov elektricheskikh setey 0,4–110 kV: diss. ... d-ra tekhn. nauk, Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet* [Models and Methods of Wavelet Analysis of Non-Sinusoidal Non-Stationary Modes of Electrical Networks 0.4–110 kV: Diss. ... Dr. Eng. Sci., Omsk State Technical University]. 2019, 305 p. [in Russian].

15. Gavrilov R.S., Mustafayev Yu.N. *Upravleniye sinkhronnymi mashinami s postoyannymi magnitami: uchebnoye posobiye* [Control of Synchronous Machines with Permanent Magnets: Textbook]. Saint-Petersburg, Balt. gos. tekhn. un-t, 2019. 78 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 13.12.2023; одобрена после рецензирования 20.12.2023; принята к публикации 22.12.2023.

The article was submitted 13.12.2023; approved after reviewing 20.12.2023; accepted for publication 22.12.2023.

Научная статья

УДК 621.313.12

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-108-119

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОПОРШНЕВЫХ АГРЕГАТОВ С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ



**Азат Венерович Зайниев**

**Azat V. Zayniev**

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



**Венер Фанусович Шайдуллин**

**Vener F. Shaydullin**

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



**Марат Ильгизович Хакимьянов**

**Marat I. Khakimyanov**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

В процессе добычи углеводородного сырья выделяется попутный нефтяной газ (ПНГ), который сам по себе является ценным топливом. Ранее выделяющийся при добыче попутный газ просто сжигался, что являлось нерациональным и вредным для окружающей среды. Однако в современных условиях нефтедобывающие компании стремятся использовать попутный газ.

Одной из наилучших доступных технологий утилизации попутного нефтяного газа и выработки электрической энергии является применение на нефтегазодобывающих предприятиях газопоршневых агрегатов (ГПА) с синхронными генераторами, получивших широкое распространение в настоящее время.

Прогресс в методах проектирования и технологиях производства электрических машин выражается, в том числе, в увеличении их надежности, однако, очевидно, что полностью избежать отказов не удастся.

Проблема решения вопросов оценки и обеспечения надежности ГПА, используемых для утилизации попутного нефтяного газа на

### Ключевые слова

надежность, вероятность безотказной работы, синхронный генератор, газопоршневой агрегат, метод анализа иерархий, вектор приоритетов

нефтедобывающих предприятиях, с каждым годом становится все более актуальной, так как с недостаточной надежностью связываются серьезные потери экономического и экологического характера: аварийные остановки ГПА приводят к остановке фондов нефтедобывающих скважин и вынужденному сжиганию ПНГ на свече открытого типа с выбросом большого количества парниковых газов.

#### **Цель исследования**

Исследование надежности газопоршневых агрегатов на основе весовых показателей их элементов (функциональных узлов).

#### **Методы исследования**

В исследовании использованы метод анализа иерархий (метод Саати) и метод «слабейшего звена».

#### **Результаты**

В статье применена методика оценки показателей надежности оборудования на основе весовых показателей функциональных узлов с учетом важности критериев надежности. Вес узла рассчитывается по методу анализа иерархий (методу Саати). В соответствии с предложенной методикой выполнен расчет вероятности безотказной работы рассматриваемых машин для периода нормальной эксплуатации. Сделаны выводы о приоритизации технического воздействия на функциональные элементы.

**Для цитирования:** Зайниев А. В., Шайдуллин В. Ф., Хакимьянов М. И. Определение надежности элементов газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами методом анализа иерархий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 108-119. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-108-119>.

Original article

## **DETERMINING THE RELIABILITY OF ELEMENTS OF GAS PISTON UNITS WITH SYNCHRONOUS GENERATORS BY THE METHOD OF HIERARCHY ANALYSIS**

#### **Relevance**

In the process of extracting hydrocarbon raw materials, associated petroleum gas (APG) is released, which in itself is a valuable fuel. Previously, associated gas released during extraction was simply burned, which was irrational and harmful to the environment. However, in modern conditions, oil companies tend to use associated gas.

One of the best available technologies for the utilization of associated petroleum gas and the generation of electric energy is the use of gas piston units (GPU) at oil and gas producing enterprises, which are widely used at the present time.

Progress in design methods and production technology of electric machines is expressed, among other things, in increasing their reliability, however, it is obvious that it will not be possible to completely avoid failures.

The problem of solving issues of assessing and ensuring the reliability of GPU used for the utilization of associated petroleum gas at oil-producing enterprises is becoming more and more urgent every year, since serious losses of an economic and environmental nature are associated with insufficient reliability: emergency stops of GPU lead to the shutdown of funds of oil-producing wells and forced burning of APG on an open-type candle with the release of a large amount of the amount of greenhouse gases.

#### **Keywords**

reliability, probability of trouble-free operation, synchronous generator, gas piston unit, hierarchy analysis method, priority vector

**Aim of research**

To study the reliability of gas piston units based on the weight indicators of their elements (functional units).

**Research methods**

The research uses the hierarchy analysis method (Saaty method) and the «weakest link» method.

**Results**

The article uses a methodology for evaluating equipment reliability indicators based on the weight indicators of functional units, taking into account the importance of reliability criteria. The node weight is calculated using the hierarchy analysis method (Saaty method). In accordance with the proposed methodology, the probability of trouble-free operation of the considered machines for the period of normal operation is calculated. Conclusions are drawn about the prioritization of technical impact on functional elements.

**For citation:** Zayniyev A. V., Shaydullin V. F., Khakim'yanov M. I. Opredeleniye nadezhnosti elementov gazoporshnevnykh agregatov s sinkhronnymi generatorami metodom analiza iyerarkhiy [Determining the Reliability of Elements of Gas Piston Units with Synchronous Generators by the Method of Hierarchy Analysis]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 108-119 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-108-119>.

**Введение**

Современные газопоршневые агрегаты (ГПА) с синхронными генераторами переменного тока и приводом от газопоршневых двигателей внутреннего сгорания являются достаточно сложными устройствами, имеющими в своем составе как двигатель внутреннего сгорания (ДВС), так и электрическую машину.

Основной проблемой при эксплуатации таких установок является сложность обеспечения высокой надежности и длительных сроков безаварийной работы.

Для оценки надежности электромеханического оборудования в настоящее время применяют такие методы, как системный анализ [1], статистические методы [2], метод вложенных цепей Маркова [3], математическое моделирование [4].

Главными недостатками перечисленных методов являются существенная стоимость либо большая трудоемкость их реализации, связанная с необходимостью обработки большого объема статистических данных.

Таким образом, применение альтернативных методов для оценки надежности ГПА является актуальной задачей.

Рассмотрим возможность использования для оценки надежности ГПА метода анализа иерархий, который рекомендует нахождение отношений важности критериев через их парные сравнения по шкале от 1 до 9 [5–7].

**Оценка надежности**

Метод анализа иерархий (МАИ) — математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений, который не предписывает лицу, принимающему решение, какого-либо «правильного» решения, а позволяет ему в интерактивном режиме найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом согласуется с его пониманием сути проблемы и требованиями к её решению. Основным достоинством метода анализа иерархий является высокая универсальность — метод может применяться для решения самых разнообразных задач.

Анализ проблемы принятия решений в МАИ начинается с построения иерархической структуры посредством декомпозиции задачи на отдельные составляющие и установления функциональных отношений между ними.

Следующим этапом анализа является определение приоритетов, представляющих относительную важность или предпочтительность элементов построенной иерархической структуры, с помощью процедуры парных сравнений. Безразмерные приоритеты позволяют обоснованно сравнивать разнородные факторы, что является отличительной особенностью МАИ. Далее выполняется вычисление главного собственного вектора для каждой матрицы. После нормализации он становится вектором приоритетов. Методика определения вектора приоритетов приведена в работе [5]. Главный собственный вектор матрицы служит критерием степени согласованности полученных суждений: чем ближе значение главного собственного вектора к размерности матрицы, тем большей степенью согласованности она обладает.

Отклонение от согласованности выражается величиной, которая называется индексом согласованности (ИС) и определяется соотношением:

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\max}$  — максимальное собственное значение матрицы;

$n$  — размерность матрицы.

Согласованность суждений для каждой конкретной задачи оценивают путем сравнения ИС и случайного индекса согласованности (СИ), который представляет собой ИС, сгенерированный случайным образом [5]. Отношение ИС к среднему значению СИ называется отношением согласованности (ОС):

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СИ}}. \quad (2)$$

Отношение согласованности считается приемлемым, если оно лежит в пределах 0–0,1 включительно [5].

На заключительном этапе осуществляется иерархический синтез. Он заключается в перемножении матрицы локальных приоритетов на вектор-столбец приоритетов критерия вышестоящего уровня.

Применим описанную методику к определению весовых коэффициентов надежности газопоршневых агрегатов на основе весовых показателей их элементов.

Для решения нашей задачи единичные показатели надежности будут выступать в качестве критериев.

ГОСТ Р 53176-2008 [8] устанавливает следующие показатели надежности ГПА:

- $T_0$  — средняя наработка на отказ;
- $T_b$  — среднее время восстановления работоспособного состояния;
- $K_{т.и}$  — коэффициент технического использования;
- $R_{к.р.}$  — назначенный ресурс до капитального ремонта;
- $S_{90,9}$  — 90 %-ый срок сохраняемости в эксплуатации.

Выполним декомпозицию ГПА на основные элементы (функциональные узлы  $\text{ФУ}_1, \text{ФУ}_2, \text{ФУ}_3, \dots, \text{ФУ}_n$ ), обеспечивающие его работоспособность.

Синхронный генератор газопоршневого агрегата:

- $\text{ФУ}_1$  — сердечник статора (ССГ);
- $\text{ФУ}_2$  — обмотка статора (ОСГ);
- $\text{ФУ}_3$  — ротор (РГ);
- $\text{ФУ}_4$  — возбуждатель на постоянных магнитах (ВГ);
- $\text{ФУ}_5$  — подшипники (ПГ).

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) газопоршневого агрегата:

- $\text{ФУ}_6$  — коленчатый вал (КВ);
- $\text{ФУ}_7$  — турбокомпрессор (ТК);
- $\text{ФУ}_8$  — система зажигания (СЗ);



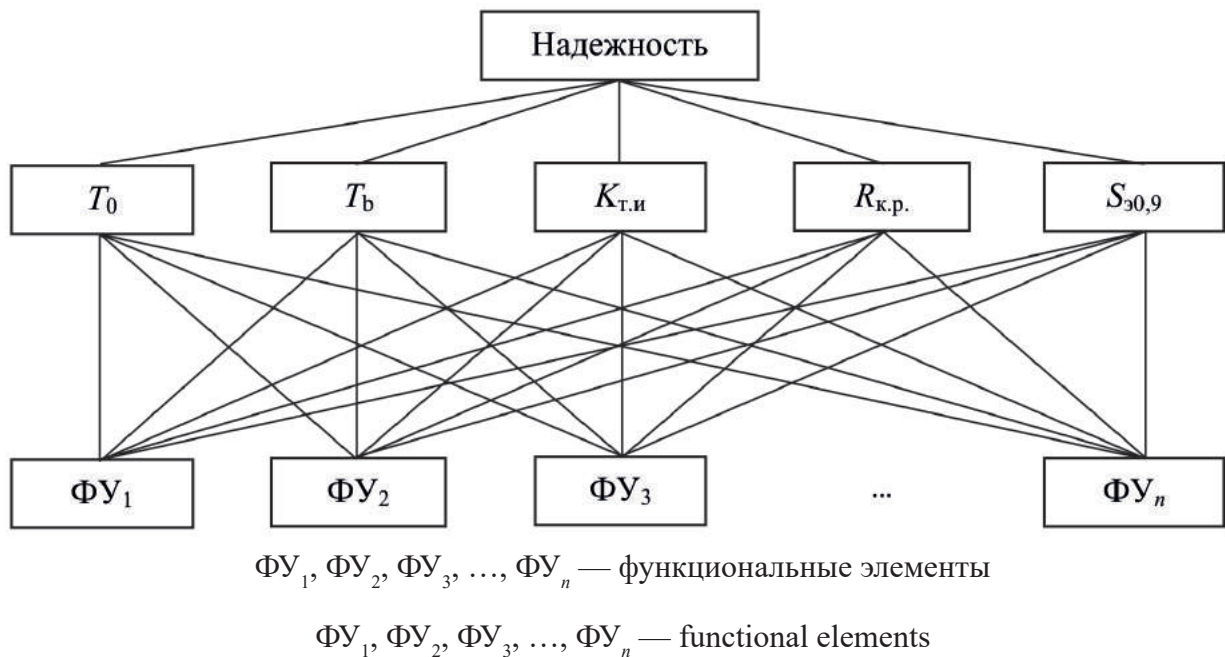
- $\PhiУ_9$  — система охлаждения (СО);
- $\PhiУ_{10}$  — механизм газораспределения (МГ);
- $\PhiУ_{11}$  — система смазки (СС);
- $\PhiУ_{12}$  — топливная система (ТС);
- $\PhiУ_{13}$  — кривошипно-шатунный механизм (КШМ);
- $\PhiУ_{14}$  — цилиндро-поршневая группа (ЦПГ);
- $\PhiУ_{15}$  — регулятор частоты вращения (РЧВ);

- $\PhiУ_{16}$  — подшипники скольжения (ПС).

Тогда иерархическую структуру МАИ можно представить в следующем виде (рисунок 1).

Оценим важность критериев в соответствии со шкалой Саати [5].

Матрица парных сравнений критериев и результаты расчета вектора приоритетов по методу МАИ представлены в таблице 1.



**Рисунок 1.** Иерархическая структура определения весовых коэффициентов целевой функции

**Figure 1.** Hierarchical structure of determining the weighting coefficients of the objective function

**Таблица 1.** Матрица оценок важности критериев второго уровня относительно общей цели и вектор приоритетов

**Table 1.** A matrix of assessments of the importance of second-level criteria relative to the overall goal and a vector of priorities

| Показатель             | $T_0$ | $T_b$ | $K_{т.и}$ | $R_{к.р.}$ | $S_{э0,9}$ | Вектор приоритетов |
|------------------------|-------|-------|-----------|------------|------------|--------------------|
| $T_0$                  | 1     | 2     | 5         | 2          | 2          | 0,375              |
| $T_b$                  | 1/2   | 1     | 2         | 1          | 1          | 0,180              |
| $K_{т.и}$              | 1/5   | 1/2   | 1         | 1/2        | 1/2        | 0,086              |
| $R_{к.р.}$             | 1/2   | 1     | 2         | 1          | 1          | 0,180              |
| $S_{э0,9}$             | 1/2   | 1     | 2         | 1          | 1          | 0,180              |
| ИС = 0,002; ОС = 0,001 |       |       |           |            |            |                    |

Как видно из анализа таблицы 1, средняя наработка на отказ  $T_0$  является наиболее важным критерием второго уровня иерархии.

В связи с тем, что в состав ГПА входят электрическая машина и двигатель внутреннего сгорания, основанные на разных принципах действия и имеющие разные значения вероятности безотказной работы, а также в целях сокращения размерности матриц, в дальнейшем при применении МАИ будем их рассматривать отдельно.

В соответствии с [5] по каждому критерию составляется таблица парных сравнений для элементов декомпозиции ДВС и синхронного генератора, где количество строк и столбцов соответствует количеству этих элементов.

В таблицах 2 и 3 приведены расчеты вектора приоритетов для синхронного генератора и ДВС по критерию «средняя наработка на отказ».

Аналогичным образом рассчитываются векторы приоритетов для синхронного генератора и ДВС по критериям

**Таблица 2.** Матрица оценок важности критериев третьего уровня относительно критерия «средняя наработка на отказ» и вектор приоритетов для синхронного генератора

**Table 2.** A matrix of assessments of the importance of the third-level criteria relative to the «average time to failure» criterion and a priority vector for a synchronous generator

| Элемент                | ПГ  | ССГ | ОСГ | РГ  | ВГ  | Вектор приоритетов |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| ПГ                     | 1   | 5   | 1/3 | 1/3 | 3   | 0,145              |
| ССГ                    | 1/5 | 1   | 1/9 | 1/9 | 1/2 | 0,034              |
| ОСГ                    | 3   | 9   | 1   | 1   | 9   | 0,393              |
| РГ                     | 3   | 9   | 1   | 1   | 7   | 0,374              |
| ВГ                     | 1/3 | 2   | 1/9 | 1/7 | 1   | 0,053              |
| ИС = 0,011; ОС = 0,010 |     |     |     |     |     |                    |

**Таблица 3.** Матрица оценок важности критериев третьего уровня относительно критерия «средняя наработка на отказ» и вектор приоритетов для двигателя внутреннего сгорания

**Table 3.** A matrix of assessments of the importance of the third-level criteria relative to the «average time to failure» criterion and a priority vector for the internal combustion engine

| Элемент                | КВ | ТК  | СЗ  | СО  | МГ  | СС  | ТС  | КШМ | ЦПГ | РЧВ | ПС  | Вектор приоритетов |
|------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| КВ                     | 1  | 1/3 | 1/7 | 1/5 | 1/4 | 1/4 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 0,028              |
| ТК                     | 3  | 1   | 1/2 | 1/2 | 1   | 2   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0,086              |
| СЗ                     | 7  | 2   | 1   | 1   | 2   | 2   | 3   | 2   | 2   | 3   | 2   | 0,177              |
| СО                     | 5  | 2   | 1   | 1   | 1   | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 0,140              |
| МГ                     | 4  | 1   | 1/2 | 1   | 1   | 1   | 2   | 1   | 1   | 2   | 1   | 0,100              |
| СС                     | 4  | 1/2 | 1/2 | 1   | 1   | 1   | 2   | 1   | 1   | 2   | 1   | 0,094              |
| ТС                     | 2  | 1   | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0,066              |
| КШМ                    | 3  | 1   | 1/2 | 1/2 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0,081              |
| ЦПГ                    | 3  | 1   | 1/2 | 1/2 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0,081              |
| РЧВ                    | 2  | 1   | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0,066              |
| ПС                     | 3  | 1   | 1/2 | 1/2 | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0,081              |
| ИС = 0,021; ОС = 0,014 |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |                    |

«среднее время восстановления работоспособного состояния», «коэффициент технического использования», «назначенный ресурс до капитального ремонта», «90 %-ый срок сохраняемости в эксплуатации».

Полученные результаты расчета можно считать согласованными, т.к. максимальное собственное значение матриц  $\lambda_{max}$  (параметр, характеризующий транзитивность элементов матрицы) близко к их размерностям, индекс согласован-

ности ИС и отношение согласованности  $OS < 0,1$ .

Перемножив матрицы локальных приоритетов на вектор-столбец приоритетов критерия вышестоящего уровня, получим результаты оценки весов надежности функциональных узлов синхронного генератора и ДВС  $\alpha_i$  (таблицы 4, 5). Чем ниже значение весового коэффициента  $\alpha_i$ , тем выше интегральный показатель надежности  $i$ -го функционального узла.

**Таблица 4.** Результаты оценки весовых коэффициентов функциональных узлов синхронного генератора

**Table 4.** The results of the evaluation of the weighting coefficients of the functional nodes of the synchronous generator

| Элемент | Оценки весов надежности |              |                   |                   |                   | Весовой коэффициент $\alpha_i$ |
|---------|-------------------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
|         | $T_0$ , о.е.            | $T_b$ , о.е. | $K_{т.и.}$ , о.е. | $R_{к.р.}$ , о.е. | $S_{э0,9}$ , о.е. |                                |
| СГ      | <b>0,375</b>            | <b>0,180</b> | <b>0,086</b>      | <b>0,180</b>      | <b>0,180</b>      |                                |
| ПГ      | 0,145                   | 0,040        | 0,2373            | 0,300             | 0,362             | 0,201                          |
| ССГ     | 0,034                   | 0,348        | 0,0329            | 0,070             | 0,067             | 0,103                          |
| ОСГ     | 0,393                   | 0,305        | 0,5716            | 0,300             | 0,290             | 0,358                          |
| РГ      | 0,374                   | 0,119        | 0,0791            | 0,129             | 0,125             | 0,214                          |
| ВГ      | 0,053                   | 0,188        | 0,0791            | 0,201             | 0,156             | 0,124                          |

**Таблица 5.** Результаты оценки весов надежности функциональных узлов двигателя внутреннего сгорания

**Table 5.** The results of the evaluation of the reliability weights of the functional components of the internal combustion engine

| Элемент | Критерий     |              |                   |                   |                   | Весовой коэффициент $\alpha_i$ |
|---------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
|         | $T_0$ , о.е. | $T_b$ , о.е. | $K_{т.и.}$ , о.е. | $R_{к.р.}$ , о.е. | $S_{э0,9}$ , о.е. |                                |
| ДВС     | <b>0,375</b> | <b>0,180</b> | <b>0,086</b>      | <b>0,180</b>      | <b>0,180</b>      |                                |
| КВ      | 0,028        | 0,215        | 0,015             | 0,028             | 0,023             | 0,059                          |
| ТК      | 0,086        | 0,042        | 0,069             | 0,086             | 0,078             | 0,075                          |
| СЗ      | 0,177        | 0,025        | 0,125             | 0,180             | 0,177             | 0,146                          |
| СО      | 0,140        | 0,036        | 0,114             | 0,140             | 0,142             | 0,120                          |
| МГ      | 0,100        | 0,032        | 0,149             | 0,102             | 0,101             | 0,093                          |
| СС      | 0,094        | 0,021        | 0,149             | 0,092             | 0,110             | 0,088                          |
| ТС      | 0,066        | 0,074        | 0,071             | 0,069             | 0,065             | 0,068                          |
| КШМ     | 0,081        | 0,215        | 0,078             | 0,081             | 0,079             | 0,104                          |
| ЦПГ     | 0,081        | 0,215        | 0,078             | 0,081             | 0,079             | 0,104                          |
| РЧВ     | 0,066        | 0,023        | 0,073             | 0,062             | 0,065             | 0,058                          |
| ПС      | 0,081        | 0,102        | 0,081             | 0,081             | 0,079             | 0,084                          |

С точки зрения надежности ГПА после декомпозиции можно рассматривать как систему с последовательным соединением элементов и применить модель «слабейшего звена». Для нормального функционирования такой системы все её элементы должны быть работоспособными. Отказ же хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы [9]. Последовательно соединенными элементами структурных схем надежности являются элементы декомпозиции.

Результирующая вероятность безотказной работы генератора и ДВС  $P$  и их элементов  $P_i$  в период эксплуатации будет определяться формулами:

$$P = e^{-\lambda \sum \alpha_i t}, \quad (3)$$

$$P_i = e^{-\lambda \alpha_i t}, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  — весовой коэффициент  $i$ -го элемента;

$\lambda$  — интенсивность отказов, полученная опытным путем или на основании статистических данных об отказах;

$t$  — рассматриваемый промежуток времени.

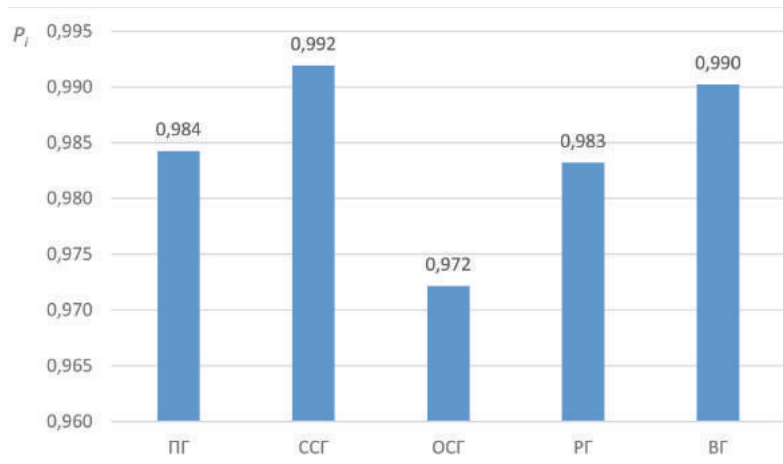
Рассматривается период нормальной эксплуатации, когда  $\lambda = const$ , что соответствует экспоненциальному распределению отказов. Для проведения расчетного исследования приняты среднестатистические данные об отказах рассматриваемых машин [9–16]. Для расчета надежности генератора принята удельная повреждаемость  $\lambda_r = 0,079 \text{ год}^{-1}$ ; для расчета надежности ДВС  $\lambda_{\text{ДВС}} = 1,54 \text{ год}^{-1}$ .

Результаты расчетов вероятности безотказной работы для временного интервала, равному 1 году, приведены в таблице 6 и на рисунках 2, 3.

**Таблица 6.** Результаты расчетов вероятности безотказной работы газопоршневого агрегата

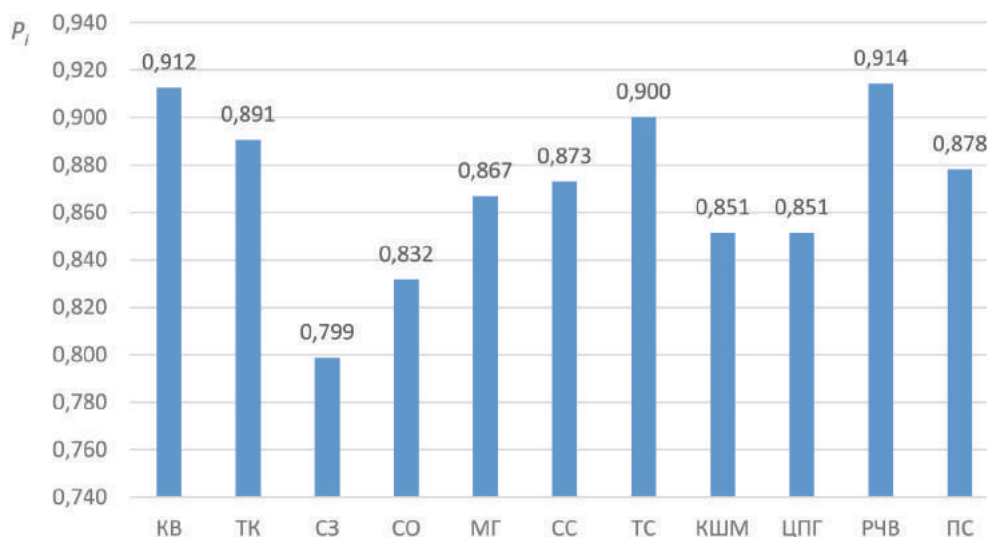
**Table 6.** The results of calculations of the probability of trouble-free operation of the gas piston unit

| Элементы  |       | $\alpha_i$ | $\lambda_i \cdot 10^{-6}, \text{ ч}^{-1}$ | $P_i$ | $P$   |
|-----------|-------|------------|---|-------|-------|
| Генератор | ПГ    | 0,201      | 1,81                                      | 0,984 | 0,924 |
|           | ССГ   | 0,103      | 0,93                                      | 0,992 |       |
|           | ОСГ   | 0,358      | 3,23                                      | 0,972 |       |
|           | РГ    | 0,214      | 1,93                                      | 0,983 |       |
|           | ВГ    | 0,124      | 1,12                                      | 0,990 |       |
| ДВС       | КВ    | 0,059      | 10,45                                     | 0,912 | 0,214 |
|           | ТК    | 0,075      | 13,23                                     | 0,891 |       |
|           | СЗ    | 0,146      | 25,64                                     | 0,799 |       |
|           | СО    | 0,120      | 21,04                                     | 0,832 |       |
|           | МГ    | 0,093      | 16,30                                     | 0,867 |       |
|           | СС    | 0,088      | 15,50                                     | 0,873 |       |
|           | ТС    | 0,068      | 12,00                                     | 0,900 |       |
|           | КШМ   | 0,104      | 18,38                                     | 0,851 |       |
|           | ЦПГ   | 0,104      | 18,38                                     | 0,851 |       |
|           | РЧВ   | 0,058      | 10,22                                     | 0,914 |       |
| ПС        | 0,084 | 14,85      | 0,878                                     |       |       |
| ГПА       |       |            |   |       | 0,198 |



**Рисунок 2.** Вероятность безотказной работы функциональных элементов синхронного генератора

**Figure 2.** The probability of trouble-free operation of the functional elements of the synchronous generator



**Рисунок 3.** Вероятность безотказной работы функциональных элементов двигателя внутреннего сгорания

**Figure 3.** The probability of trouble-free operation of the functional elements of the internal combustion engine

Анализ таблиц 4–6 и диаграмм, представленных на рисунках 2, 3, показывает, что «слабейшим звеном» синхронного генератора, требующим приоритетного технического воздействия, является обмотка статора, «слабейшим звеном» двигателя внутреннего сгорания — система зажигания.

Наиболее надежными элементами, при этом имеющими наибольшее среднее время восстановления работоспособного состояния, являются сердечник

статора генератора и коленчатый вал ДВС.

### Выводы

1. На нефтегазодобывающих предприятиях остро стоит проблема повышения надежности газопоршневых агрегатов, применяемых для утилизации попутного нефтяного газа. Выход из строя ГПА приводит как к экономическим потерям (теряется выработка дополнительной электроэнергии для нужд промыслов),

так и к отрицательному экологическому эффекту («рутинное» сжигание попутного нефтяного газа).

2. Оценка надежности ГПА представляет собой комплексную задачу, так как такие устройства имеют сложную конструкцию, совмещая в себе двигатель внутреннего сгорания и электрическую машину. Помимо этого, они имеют множество вспомогательных систем: системы автоматического управления, противоаварийной автоматики. Для оценки надежности ГПА сейчас применяются такие методы, как системный анализ, статистические методы, метод вложенных цепей Маркова, математическое моделирование.

### Список источников

1. Гусев В.В. Методологические предпосылки к оценке эксплуатационной надежности электрических машин // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 4. С. 110–114. EDN: KHXQAN.
2. Годунов А.И., Баранов В.В., Борщин Ю.Н., Куторов А.А. Статистическое определение основных показателей надежности технической системы и её элементов // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. 2023. № 1. С. 13–18. EDN: FEPLLF.
3. Вишняков Е.П., Швайковский М.А., Ильин А.В., Рыбаков Д.В., Смирнов С.В. Определение показателей надежности диагностируемого электрооборудования // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 256–260. EDN: XIISRP.
4. Галушко В.Н., Алферова Т.В., Алферов А.А. Определение показателей надежности электрических систем с учетом изменяющихся условий эксплуатации // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2013. № 3(54). С. 80–87. EDN: RBZKGF.
5. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making // International Series in Operations Research and Management Science. 2016. Vol. 233. P. 363–419. doi: 10.1007/0-387-23081-5\_9.
6. Saaty T.L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors — The Analytic Hierarchy // RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics). 2008. Vol. 102(2). P. 251–318. doi: 10.1007/bf03191825.
7. Мухаметзянов И.З. Нечеткий логический вывод и нечеткий метод анализа иерархий в системах поддержки принятия решений: приложение к оценке надежности технических систем // Кибернетика и программирование. 2017. № 2. С. 59–77. doi: 10.7256/2306-4196.2017.2.21794. URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=21794](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21794) (дата обращения: 03.10.2023).
8. ГОСТ Р 53176-2008. Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Показатели надежности. Требования и методы испытаний / утв. и введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 18.12.2008 N 624-ст.
9. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. 432 с. ISBN 5-903072-07-0.
10. Полянский М.С. Анализ статистики и поиск причин отказов газопоршневых установок на основе опыта промышленной эксплуатации // Матер. VI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной году М.С. Знаменского в г. Тобольске. 2023. С. 176–181. EDN: JZFTQT.
11. Малофеев В.В., Шаталов А.Н., Гревцов В.М., Сахабутдинов Р.З. Опыт использования электростанций для утилизации попутного нефтяного газа на нефтепромысловых объектах

Татарстана // Нефтепромышленное дело. 2012. № 8. С. 42–47. EDN: PBRKID.

12. Молодков В.В., Илюшин П.В., Исамухамедов Я.Ш., Ивановский Д.А. Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных газотурбинных и газопоршневых установок на объектах распределённой генерации ПАО «ЛУКОЙЛ» // Энергетик. 2021. № 10. С. 46–49. EDN: FJFZMO.

13. Михайлов В.И., Пронин Г.В. Пути повышения эффективности эксплуатации ДЭС и ГПЭС систем электроснабжения автономных объектов с использованием комплексного подхода // Армия–2022: сб. докл. круглого стола в рамках научно-деловой программы Международного военно-технического форума. 2022. С. 213–226. EDN: ПИУТЛ.

14. Щаулов В.Ю. Об опыте внедрения и эксплуатации газопоршневых мини-ТЭЦ // Малые и средние ТЭЦ. Современные решения: матер. конф. 7–9 сентября 2005 г., НП «Российское теплоснабжение». 2005. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/780-Ob-opyte-vnedreniya-i-ekspluatatsii-gazoporshnevyyh-mini-TEC> (дата обращения: 27.09.2023).

15. Салихов А.А., Фаткуллин Р.М., Абдрахманов Р.Р., Щаулов В.Ю. Развитие мини-ТЭЦ с применением газопоршневых двигателей в Республике Башкортостан. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/544-Razvitie-mini-TEC-s-primeneniem-gazoporshnevyyh-dvigatelay> (дата обращения: 27.09.2023).

16. Фаткуллин Р.М. Эксплуатационные показатели газопоршневых ТЭЦ ОАО «Башкирэнерго» // Новости теплоснабжения. 2005. № 11. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/1065-Ekspluatatsionnye-pokazateli-gazoporshnevyyh-TEC-OAO> (дата обращения: 27.09.2023).

## References

1. Gusev V.V. Metodologicheskiye predposylki k otsenke ekspluatatsionnoy nadezhnosti elektricheskikh mashin [Methodological Prerequisites to Estimation of Electric Machine Maintainability]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, Vol. 313, No. 4, pp. 110–114. EDN: KHXQAN. [in Russian].

2. Godunov A.I., Baranov V.V., Borshchin Yu.N., Kutorov A.A. Statisticheskoye opredeleniye osnovnykh pokazateley nadezhnosti tekhnicheskoy sistemy i yeyo elementov elementov [Statistical Determination of the Main Reliability Indicators of the Technical System and Its Elements]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the International

Symposium «Reliability and Quality»]. 2023, No. 1, pp. 13–18. EDN: FEPLLF. [in Russian].

3. Vishnyakov Ye.P., Shvaykovskiy M.A., Pl'in A.V., Rybakov D.V., Smirnov S.V. Opredeleniye pokazateley nadezhnosti diagnostiruyemogo elektrooborudovaniya [Determination of Performance Reliability Diagnosed Electrical Equipment]. *Fundamental'nyye issledovaniya — Basic Research*, 2016, No. 12-2, pp. 256–260. EDN: XIISRP. [in Russian].

4. Galushko V.N., Alferova T.V., Alferov A.A. Opredeleniye pokazateley nadezhnosti elektricheskikh sistem s uchetom izmenyayushchikhsya usloviy ekspluatatsii [Determination of Reliability Indicators of Electrical Systems Taking into Account Changing Operating Conditions]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi]. 2013, No. 3(54), pp. 80–87. EDN: RBZKGF. [in Russian].

5. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making. *International Series in Operations Research and Management Science*, 2016, Vol. 233, pp. 363–419. doi: 10.1007/0-387-23081-5\_9.

6. Saaty T.L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy. *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*, 2008, Vol. 102(2), pp. 251–318. doi: 10.1007/bf03191825.

7. Mukhametzyanov I.Z. Nechetkiy logicheskii vyvod i nechetkiy metod analiza iyerarkhiy v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy: prilozheniye k otsenke nadezhnosti tekhnicheskikh sistem Fuzzy [Logical Inference and Fuzzy Hierarchy Analysis Method in Decision Support Systems: an Application to the Reliability Assessment of Technical Systems]. *Kibernetika i programmirovaniye — Cybernetics and Programming*, 2017, No. 2, pp. 59–77. doi: 10.7256/2306-4196.2017.2.21794. URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=21794](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21794) (accessed 03.10.2023). [in Russian].

8. GOST R 53176-2008. Ustanovki elektrogeneratornyye s benzinovymi, dizel'nymi i gazovymi dvigatelyami vnutrennego sgoraniya. Pokazateli nadezhnosti. Trebovaniya i metody ispytaniy / utv. i vveden v deystviye Prikazom Rostekhnregulirovaniya ot 18.12.2008 N 624-st [State Standard R 53176-2008. Electric Generating Plants with Gasoline, Diesel and Gas Internal Combustion Engines.

Reliability Indexes. Requirements and Test Methods]. Approved and Put into Effect by Order of Rostekhregulirovaniya dated December 18, 2008 N 624-st. [in Russian].

9. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* [Reliability of Electric Machines]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI. 2006. 432 p. ISBN 5-903072-07-0. [in Russian].

10. Polyanskiy M.S. Analiz statistiki i poisk prichin otkazov gazoporshnevykh ustanovok na osnove opyta promyshlennoy ekspluatatsii [Analysis of Statistics and Search for the Causes of Failures of Generator Sets with Gas Engines Based on the Experience of Industrial Operation]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy godu M.S. Znamenskogo v g. Tobol'ske* [Materials of the VI International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Year of M.S. Znamensky in Tobolsk]. 2023. S. 176–181. EDN: JZFTQT. [in Russian].

11. Malofeyev V.V., Shatalov A.N., Grevtsov V.M., Sakhabutdinov R.Z. Opyt ispol'zovaniya elektrostantsiy dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza na neftepromyslovykh ob'yektakh Tatarstana [Some Experience of Electric Power Stations Usage to Utilize Associated Oil Gas in Republic of Tatarstan]. *Neftepromyslovoye delo — Oilfield Engineering*, 2012, No. 8, pp. 42–47. EDN: PBRKID. [in Russian].

12. Molodyuk V.V., Ilyushin P.V., Isamukhamedov YA.SH., Ivanovskiy D.A. Opyt ekspluatatsii otechestvennykh i zarubezhnykh gazoturbinnnykh i gazoporshnevykh ustanovok na ob'yektakh raspredelonnoy generatsii PAO «LUKOYL» [Experience of Operation of Domestic and Foreign Generator Sets with Gas Turbines and Gas Engines at Distributed Generation Facilities of PJSC LUKOIL]. *Energetik — Power Engineer*, 2021, No. 10, pp. 46–49. EDN: FJFZMO. [in Russian].

13. Mikhaylov V.I., Pronin G.V. Puti povysheniya effektivnosti ekspluatatsii DES i GPES sistem elektrosnabzheniya avtonomnykh ob'yektov

s ispol'zovaniyem kompleksnogo podkhoda podkhoda [Ways to Improve the Efficiency of Operation of DES and GSGE Power Supply Systems of Autonomous Facilities Using an Integrated Approach]. *Sbornik dokladov kruglogo stola v ramkakh nauchno-delovoy programmy Mezhdunarodnogo voyenno-tehnicheskogo foruma «Armiya–2022»* [Collection of Round Table Reports within the Framework of the Scientific and Business Program of the International Military-Technical Forum «Army–2022»]. 2022, pp. 213–226. EDN: PIIYTL. [in Russian].

14. Shchaulov V.YU. Ob opyte vnedreniya i ekspluatatsii gazoporshnevykh mini-TETS [About the Experience of the Introduction and Operation of Gas-Piston Mini-CHP]. *Materialy konferentsii «Malye i sredniye TETS. Sovremennyye resheniya», 7–9 sentyabrya 2005 g. NP «Rossiyskoye teplosnabzheniye»* [Materials of the Conference «Small and Medium-Sized Thermal Power Plants. Modern Solutions», September 7-9, 2005 NP «Russian Heat Supply»]. 2005. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/780-Ob-opyte-vnedreniya-i-ekspluatatsii-gazoporshnevykh-mini-TEC> (accessed 27.09.2023). [in Russian].

15. Salikhov A.A., Fatkullin R.M., Abdrakhmanov R.R., Shchaulov V.Yu. *Razvitiye mini-TETS s primeneniym gazoporshnevykh dvigateley v Respublike Bashkortostan* [Development of Mini-CHP Plants Using Gas Engines in the Republic of Bashkortostan]. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/544-Razvitie-mini-TEC-s-primeneniem-gazoporshnevykh-dvigatelay> (accessed 27.09.2023). [in Russian].

16. Fatkullin R.M. Ekspluatatsionnyye pokazateli gazoporshnevykh TETS OAO «Bashkirenergo» [Operational Indicators of Gas-Piston CHP Plants of JSC Bashkirenergo]. *Novosti teplosnabzheniya — Heat Supply News*, 2005, No. 11. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/1065-Ekspluatatsionnyye-pokazateli-gazoporshnevykh-TEC-OAO> (accessed 27.09.2023). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 05.12.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 25.12.2023.

The article was submitted 05.12.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 25.12.2023.

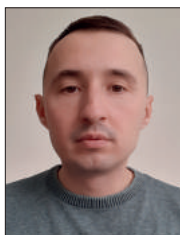


Научная статья

УДК 621.314.212.048.822

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-120-126

## УВЕЛИЧЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ



**Ренат Анверович Юсупов**

**Renat A. Yusupov**

аспирант «Высшей школы передовых производственных технологий»,  
Поволжский государственный университет сервиса,  
Тольятти, Россия



**Борис Михайлович Горшков**

**Boris M. Gorshkov**

доктор технических наук, профессор «Высшей школы передовых  
производственных технологий»,  
Поволжский государственный университет сервиса,  
Тольятти, Россия

### Актуальность

Повышение эффективности высоковольтных подстанций без необходимости замены существующего энергетического оборудования дает большое экономическое преимущество в современной энергетике. Эти исследования открывают новые перспективы для энергетической отрасли и могут принести значительные выгоды как с экономической, так и с экологической точек зрения.

### Цель исследования

Повышение надежности и нагрузочной способности эксплуатируемых силовых трансформаторов путем модернизации системы охлаждения.

### Методы исследования

Для достижения поставленной цели предложено использовать дополнительные устройства по контролю температуры за счет модернизации системы охлаждения и замены активной части трансформаторов с использованием современных изоляционных материалов. Проанализирована возможность увеличения нагрузочной способности трансформаторов за счет внедрения новой системы охлаждения трансформаторного масла, основанной на инновационной конструкции радиаторов охлаждения. Также рассматривается комплекс устройств мониторинга и управления, который считается наиболее экономичным и эффективным с точки зрения производительности.

### Результаты

В результате проведенных исследований было выяснено, что внедрение новой системы охлаждения силовых трансформаторов и принятые меры по замене изоляции активной части позволяют увеличить

### Ключевые слова

силовой трансформатор, система охлаждения, радиатор, вентиляторы, трубки, надежность электроснабжения, мощность, модернизация, мониторинг

нагрузочную способность на 30–40 %. А использование дополнительных устройств для контроля температуры позволяет прогнозировать возможные проблемы и принимать меры по их предотвращению или решению, что значительно повышает надежность электроснабжения.

**Для цитирования:** Юсупов Р. А., Горшков Б. М. Увеличение нагрузочной способности эксплуатируемых силовых трансформаторов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 120-126. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-120-126>.

Original article

## INCREASING THE LOAD CAPACITY OF OPERATED POWER TRANSFORMERS

### Relevance

Increasing the efficiency of high-voltage substations without the need to replace existing power equipment gives a great economic advantage in modern energy. These studies open up new prospects for the energy industry and can bring significant benefits from both economic and environmental points of view.

### Aim of research

Improving the reliability and load capacity of operated power transformers by upgrading the cooling system.

### Research methods

To achieve this aim, it was proposed to use additional temperature control devices by means of upgrading the cooling system and replacing the active part of transformers using modern insulating materials. The possibility of increasing the load capacity of transformers due to the introduction of a new transformer oil cooling system based on an innovative design of cooling radiators is analyzed. A set of monitoring and control devices is also considered, which is considered the most economical and efficient in terms of performance.

### Results

As a result of the conducted research, it was found out that the introduction of a new cooling system for power transformers and the measures taken to replace the insulation of the active part can increase the load capacity by 30–40 %. And the use of additional devices for temperature control allows you to predict possible problems and take measures to prevent or solve them, which significantly increases the reliability of power supply.

### Keywords

power transformer, cooling system, radiator, fans, tubes, power supply reliability, power, modernization, monitoring

**For citation:** Yusupov R. A., Gorshkov B. M. Uvelicheniye nagruzochnoy sposobnosti ekspluatiruyemykh silovykh transformatorov [Increasing the Load Capacity of Operated Power Transformers]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 120-126 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-120-126>.

### Введение

В связи с уходом некоторых иностранных поставщиков с российского рынка в настоящее время наблюдается быстрое расширение производств на действующ-

щих предприятиях и строительство новых заводов и фабрик. С увеличением промышленных площадей часто возникают трудности с подключением нового оборудования и потребителей электроэ-

нергии к существующей электросети из-за ограниченной проектной мощности подстанций, а также достижения предельной нагрузки силовых трансформаторов [1]. Недостаточная мощность трансформаторной подстанций отрицательно влияет на надежность дальнейшего электроснабжения промышленных объектов, городов и сел. Сбой одного из трансформаторов может привести к перебоям в подаче электроэнергии и к огромным денежным потерям из-за нехватки электроэнергии. Традиционно задача увеличения мощности электрической подстанции решается путем строительства новой подстанции с заменой трансформатора на более мощный [1]. Однако в некоторых случаях простая замена не всегда является приемлемым решением. Основными ограничениями являются большие габариты трансформаторов большей мощности, которые не всегда позволяют устанавливать их на существующих подстанциях. В таких ситуациях требуется комплексная реконструкция подстанций, что, в свою очередь, требует значительных инвестиций и времени.

Можно рассмотреть альтернативный вариант — модернизацию существующих трансформаторов с целью увеличения их мощности. Это позволит сэкономить время и ресурсы, так как не будет необходимости выполнять сложные строительные работы.

#### **Возможные способы реализации увеличения мощности силовых трансформаторов без их замены**

Нагрузочная способность трансформаторов может быть увеличена за счет следующих мер:

1) использования изоляционных материалов с высокими свойствами теплоотвода и термостойкости (NOMEX, Von Roll и т.д.). Данные материалы более стойки к увлажнению, а как известно,

это один из главных факторов, ускоряющих процесс старения изоляции. Эти материалы позволяют также более эффективно отводить тепло от обмоток, предотвращая их перегрев [2];

2) использования полимерных материалов с высоким температурным коэффициентом линейного расширения. Это помогает предотвратить возникновение напряжений в обмотках силового трансформатора при высокой температуре;

3) модернизации системы охлаждения силового трансформатора [3];

4) использования передовых методов сборки и материалов, способных обеспечить высокую мощность и надежность трансформатора, а в некоторых случаях при модернизации трансформатора может потребоваться замена активной части на новую, разработанную с новыми техническими характеристиками большей мощности.

Наиболее экономичным способом увеличения нагрузочной способности силовых трансформаторов является реконструкция системы охлаждения путем установки одного или нескольких маслоохладителей. Этот способ увеличения нагрузочной способности не связан с ускоренной тепловой деградацией электрической целлюлозной изоляции трансформатора.

Принцип охлаждения внутренней части трансформатора основан на конвекции, т.е. передаче тепла при движении охлаждающей среды, которая соприкасается с помощью тепловых источников в трансформаторе, тепловая энергия передается и высвобождается через системы охлаждения в окружающую среду.

В настоящее время существуют следующие основные способы охлаждения трансформаторов:

- M (ONAN) — естественное, масляное охлаждение;
- C (AN) — естественное воздушное;

- Д (ONAF) — принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла;
- Ц (OFWF) — принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла;
- ДЦ (OFAF) — принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла [4].

Одним из наиболее эффективных способов модернизации системы охлаждения является установка дополнительного холодильного оборудования на существующие трансформаторы. Например, система охлаждения ONAN (М) может быть преобразована в систему охлаждения ONAF (Д) путем добавления радиаторов, замены радиаторов на более эффективные и оснащения их вентиляторами. А к существующей с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла можно добавить принудительную циркуляцию масла OFAF (ДЦ), установив дополнительные масляные насосы [5]. Эта стратегия уже внедрена на некоторых подстанциях в России и позволила увеличить нагрузочную способность силовых трансформаторов серии 110 кВ в среднем на 25 %.

Не стоит оставлять без внимания различные технические новшества в системе охлаждения трансформатора. Одним из таких нововведений является использование дополнительных жидкостных охладителей, например, азотных или водяных. Вместо традиционного воздушного охлаждения, при котором вентиляторы обдувают поверхность трансформатора, используются жидкостные охладители, улучшающие процесс охлаждения [6]. В этом случае система справляется с высокими нагрузками более эффективно, а тепло равномерно распределяется по всей поверхности трансформатора.

Необходимо учитывать, что при реализации этих решений могут возникнуть

некоторые трудности, связанные с поиском адекватного места на стенках бака трансформатора. Иногда на существующем оборудовании сложно найти свободное место для установки радиаторов или вентиляторов, но с помощью инженерного подхода и творческих решений можно найти компромиссное решение, отвечающее требованиям увеличения мощности модернизированной трансформаторной холодильной системы, не создавая при этом лишних проблем в месте ее установки на резервуар трансформатор.

Во всех случаях перед установкой дополнительного оборудования и систем охлаждения требуются тщательное техническое обследование и расчет [7]. Эта мера предосторожности помогает гарантировать, что дополнительные компоненты совместимы с существующей системой охлаждения и не вызывают дальнейших перегрузок и проблем. Для повышения точности получения требуемых данных расчеты, моделирование, а также симуляцию гидродинамических и тепловых характеристик системы охлаждения необходимо выполнять в специализированных системах автоматизированного проектирования (CAEP TON, SOLIDWORKS Flow Simulation, AmeSim и т.д.).

Для подтверждения возможности увеличения нагрузочной способности необходимо выполнить следующие уточненные расчеты: электромагнитный, электродинамической стойкости обмоток, тепловой, нагрузочной способности, тепловой для отводов и переключающего устройства.

### **Исследования, направленные на определение наиболее производительной конструкции современных радиаторов охлаждения**

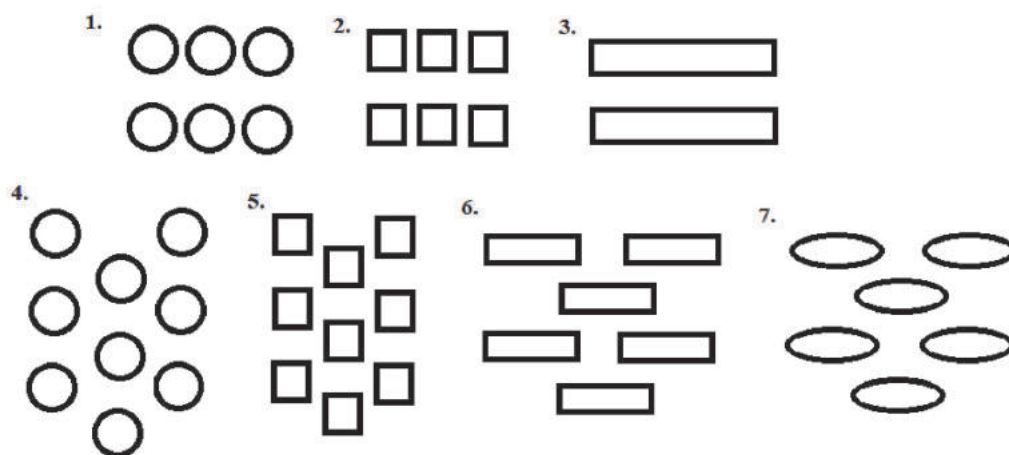
Следует уделить основное внимание конструкции самих радиаторов охлаждения. В настоящее время в современных

трансформаторах широко используются традиционные радиаторы с одним рядом параллельных пластин или круглыми трубками, без применения дополнительных ребер. Инновационная технология размещения трубок с дополнительными ребрами на радиаторе позволяет значительно увеличить количество тепла, отводимого от радиатора.

Исследователи находятся в поиске наиболее эффективной формы ребра и трубки. Различные формы и расположение трубок могут быть эффективны для определенных применений. Ранее уже изучены характеристики теплопередачи различных часто используемых геометрий трубок [8]. На рисунке 1 показана геометрия трубок с круглыми, квадратными и плоскими формами, расположенными в ряд или в шахматном порядке. Было установлено, что шахматное расположение трубок лучше с точки зрения теплопередачи, чем рядное. Расположенные таким образом эллиптические трубки оказались наиболее эффективной

конструкцией с низким перепадом давления и мощностью накачки [9]. При более высоких значениях давления круглые трубки обеспечивают высочайшую производительность. На рисунке 2 показан график зависимости коэффициента теплопередачи от перепада давления, на котором хорошо видно, что круглые, квадратные и эллипсоидные трубки, расположенные в шахматном порядке, обеспечивают лучший коэффициент теплопередачи и большие перепады давления.

Ранее был проведен экспериментальный анализ для определения коэффициента конвективной теплоотдачи и тепловых характеристик радиаторов с дополнительными ребрами. Было замечено, что радиатор с дополнительными ребрами обеспечивает более высокую теплопередачу примерно на 30–40 %, при этом тепловое сопротивление обратно пропорционально расстоянию между ребрами, а количество ребер не имеет отношения к улучшению теплопередачи.



1 — линейная круглая форма; 2 — линейная квадратная геометрия; 3 — параллельные пластины; 4 — круглые в шахматном порядке; 5 — квадратные в шахматном порядке; 6 — пластины в шахматном порядке; 7 — эллиптическая форма в шахматном порядке

1 — linear round shape; 2 — linear square geometry; 3 — parallel plates; 4 — round in staggered order; 5 — square in staggered order; 6 — plates in staggered order; 7 — elliptical shape in staggered order

**Рисунок 1.** Геометрия трубок исследуемых радиаторов

**Figure 1.** Geometry of the tubes of the radiators under study

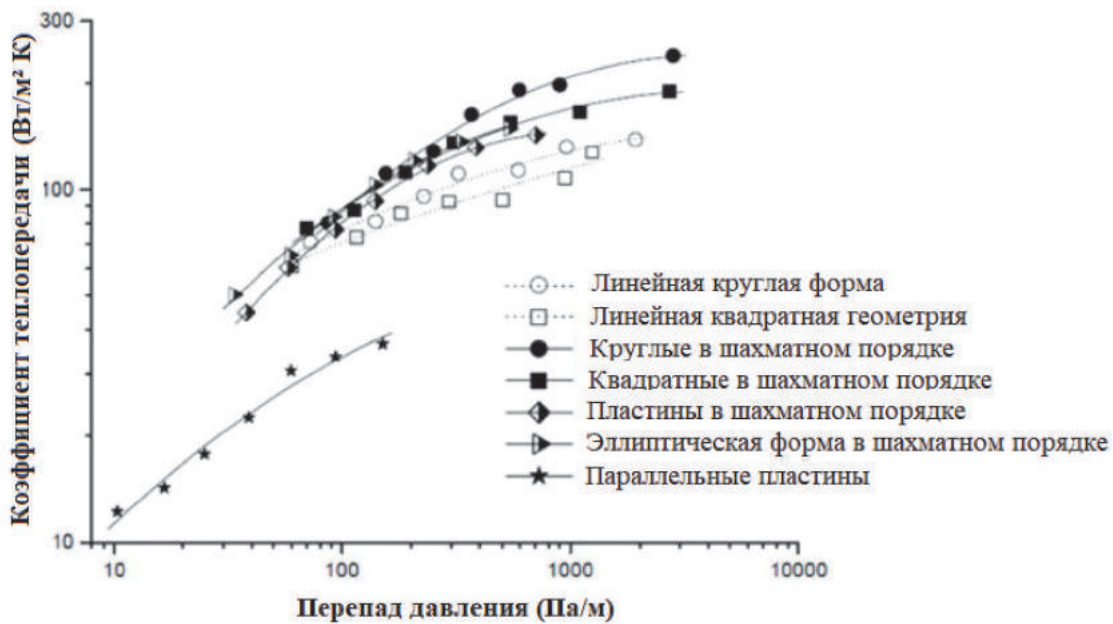


Рисунок 2. График зависимости коэффициента теплопередачи от перепада давления

Figure 2. Graph of the dependence of the heat transfer coefficient on the pressure drop

### Основные виды систем оперативной диагностики силовых трансформаторов

При модернизации системы охлаждения для обеспечения корректной работы оборудования необходимо использовать интеллектуальную систему управления охлаждением. Такая система должна уметь индивидуально настраивать режим охлаждения в зависимости от нагрузки и температуры [10]. Более того, она должна уметь управлять скоростью вращения вентиляторов, автоматически включать и выключать их, адаптироваться к изменяющимся условиям работы и передавать обслуживающему персоналу всю необходимую информацию о текущих и прогнозируемых условиях работы. Для этого используются современные системы оперативной диагностики силовых трансформаторов типа НЕВА-АСКДТ, TDM-TS и TDM-10. Установка систем непрерывного мониторинга работы, подобных описанным выше, позволяет снизить количество аварий и повреждений, а также оптимизировать эксплуатационные расходы. Такие интеллектуальные системы кон-

троля охлаждения являются важным элементом современного развития энергетики и обеспечивают эффективную и безопасную эксплуатацию электроустановок электростанций и подстанций.

### Выводы

Модернизация трансформаторов предполагает замену устаревших компонентов на более эффективные, оптимизацию рабочих процессов и установку новых систем охлаждения. Указанные технические усовершенствования позволяют подстанциям справляться с возросшими нагрузками и эффективно передавать электроэнергию без дорогостоящего переоснащения. Такая модернизация повышает производительность и надежность системы электроснабжения, особенно в условиях быстрого роста потребления электроэнергии. В результате модернизированные трансформаторы способны регулировать и поддерживать стабильное электроснабжение, что является важнейшим фактором развития и безопасности современного общества.

### Список источников

1. Передельский В.А., Колбасов В.Ф., Садовников В.А. Модернизация силовых трансформаторов с увеличением их нагрузочной способности // Электро: электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. С. 33–37. EDN: КХМАКJ.

2. Practical Considerations of Transformer Heat and Noise: Transformers. 2015. URL: <https://www.electricalclassroom.com/transformer-cooling-methods/> (дата обращения: 11.10.2023).

3. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы: справочная книга. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с. ISBN: 5-98073-004-4.

4. Правила устройства электроустановок (ПУЭ): от 08.07.2002 № 204 (ред. от 16.09.2022): утверждены Приказом Минэнерго России 08 июля 2002 г. // Электротехпром. 2022. URL: <https://etp-perm.ru/> (дата обращения: 01.10.2023).

5. Тарле Г.Е. Ремонт и модернизация систем охлаждения силовых масляных трансформаторов: науч. изд. М.: Энергия, 1975. 192 с.

6. Transformer Cooling Methods // Electrical Classroom. 2023. URL: <https://www.electricalclassroom.com/transformer-cooling-methods/> (дата обращения: 13.10.2023).

7. Аншин В.Ш., Худяков З.И. Сборка трансформаторов: пособие. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1991. 288 с.

8. Ahmed H.E., Salman B.H., Kherbeet A.S., Ahmed M.I. Optimization of Thermal Design of Heat Sinks // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. No. 118. P. 129–153. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.

9. Alam T., Kim M.H. A Comprehensive Review on Single Phase Heat Transfer Enhancement Techniques in Heat Exchanger Applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. No. 81. P. 813–839. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.060.

10. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов: науч. изд. М.: НИЦ ЭНАС, 2002. 214 с. ISBN 5-93196-165-8.

### References

1. Peredel'skiy V.A., Kolbasov V.F., Sadovnikov V.A. Modernizatsiya silovykh transformatorov s uvelicheniyem ikh nagruzochnoy sposobnosti [Modernization of Power Transformers with an Increase in Their Load Capacity]. *Elektro: elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekh-*

*nicheskaya promyshlennost'* — *Electro: Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electrical Industry*, 2009, pp. 33–37. EDN: КХМАКJ.

2. *Practical Considerations of Transformer Heat and Noise: Transformers*. 2015. URL: <https://www.electricalclassroom.com/transformer-cooling-methods/> (accessed 11.10.2023).

3. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. *Silovyye transformatory: spravochnaya kniga* [Power Transformers: Reference Book]. Moscow, Energoizdat Publ., 2004. 616 p. ISBN: 5-98073-004-4.

4. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE): ot 08.07.2002 № 204 (red. ot 16.09.2022): utverzhdeny Priказом Minenergo Rossii 08 iyulya 2002 g.* [Rules for the Installation of electrical Installations: dd. 08.07.2002 No. 204 (ed. dd. 16.09.2022): Approved by Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation on July 08, 2002]. *Elektrotekhprom*. 2022. URL: <https://etp-perm.ru/> (accessed 01.10.2023).

5. Tarle G.Ye. *Remont i modernizatsiya sistem okhlazhdeniya silovykh maslyanykh transformatorov: nauchnoe izdanie* [Repair and Modernization of Cooling Systems of Power Oil Transformers: Scientific Edition]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 192 p.

6. Transformer Cooling Methods. *Electrical Classroom*. 2023. URL: <https://www.electricalclassroom.com/transformer-cooling-methods/> (accessed 13.10.2023).

7. Anshin V.Sh., Khudyakov Z.I. *Sborka transformatorov: posobiye* [Assembling Transformers: Manual]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 288 p.

8. Ahmed H.E., Salman B.H., Kherbeet A.S., Ahmed M.I. Optimization of Thermal Design of Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, No. 118, pp. 129–153. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.

9. Alam T., Kim M.H. A Comprehensive Review on Single Phase Heat Transfer Enhancement Techniques in Heat Exchanger Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, No. 81, pp. 813–839. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.060.

10. Alekseyev B.A. *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov: nauchnoe izdanie* [Condition Monitoring (Diagnostics) of Large Power Transformers: Scientific Edition]. Moscow, NTS ENAS, 2002. 214 p. ISBN 5-93196-165-8.

Статья поступила в редакцию 24.11.2023; одобрена после рецензирования 07.12.2023; принята к публикации 20.12.2023.

The article was submitted 24.11.2023; approved after reviewing 07.12.2023; accepted for publication 20.12.2023.

Научная статья

УДК 620.92

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-127-136

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПЕЛЬТЬЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ



**Богдан Алексеевич Соловьев**

**Bogdan A. Solov'ev**

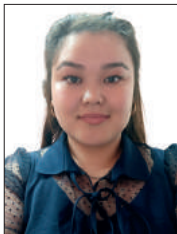
аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Гиорги Кахаберович Гамисония**

**Giorgi K. Gamisonia**

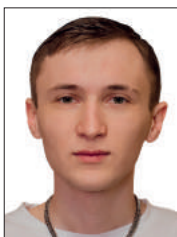
аспирант кафедры «Экономика и стратегическое развитие»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Гульназ Ержановна Димукашева**

**Gulnaz E. 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

В настоящее время явление термоэлектричества используется достаточно широко в различных отраслях промышленности. Это явление заключается в получении разности потенциалов или разницы температур и используется для производства электроэнергии, охлаждения и кондиционирования воздуха, что помогает минимизировать загрязнение окружающей среды, вызываемое обычными системами. Это связано с тем, что происходит прямое преобразование разницы температур в градиент напряжения без использования каких-либо механических систем.

### Ключевые слова

термоэлектричество,  
эффект Пельтье,  
термоэлектрический  
модуль,  
термоэлектрический  
генератор энергии



**Цель исследования**

Целью исследования является анализ различных применений термоэлектрических явлений с использованием технологии модуля Пельтье.

**Методы исследования**

Анализ литературных источников, физические основы термоэлектричества.

**Результаты**

В ходе исследования проанализировано использование термоэлектрической технологии в различных отраслях промышленности, произведен расчет параметров устройства на основе термоэлектрических модулей.

**Для цитирования:** 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. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-127-136>.

Original article

## APPLICATION OF PELTIER THERMOELECTRIC MODULE IN COOLING AND ELECTRIC POWER GENERATION TECHNOLOGIES

**Relevance**

Currently, the phenomenon of thermoelectricity is used quite widely in various industries. This phenomenon involves producing a potential difference or temperature difference, and is used for power generation, refrigeration and air conditioning, which helps minimize environmental pollution caused by conventional systems. This is due to the fact that the temperature difference is directly converted into a voltage gradient without the use of any mechanical systems.

**Aim of research**

The purpose of the study is to analyze various applications of thermoelectric phenomena using Peltier module technology.

**Research methods**

Analysis of literary sources, physical foundations of thermoelectricity.

**Results**

The study analyzed the use of thermoelectric technology in various industries, and calculated the parameters of the device based on thermoelectric modules.

**Keywords**

thermoelectricity, Peltier effect, thermoelectric module, thermoelectric energy generator

**For citation:** Solovev B. A., Gamisonia G. K., Dimukasheva G. Ye., Kolomeets D. A. Primeneniye termoelektricheskogo modulya Pel't'ye v tekhnologiyakh okhlazhdeniya i generatsii elektroenergii [Application of Peltier Thermoelectric Module in Cooling and Electric Power Generation Technologies]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp.127-136 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-127-136>.

**Введение**

Термоэлектрические явления связаны с преобразованием тепловой энергии в электрическую, и наоборот. При работе в качестве энергогенерирующего устройства термоэлектрическое устройство

называется термоэлектрическим генератором (ТЭГ). Источником тепловой энергии является разница температур, приложенная к ТЭГ. При работе в режиме охлаждения или нагрева термоэлектрическое устройство называется термо-

электрическим охладителем (ТЭО). Термоэлектрические устройства представляют собой твердотельные элементы, которые способны производить эти эффекты без использования каких-либо промежуточных жидкостей или процессов. Они не имеют движущихся частей, что снижает их восприимчивость к механическим воздействиям и позволяет продлить срок эксплуатации с минимальным обслуживанием. Кроме того, это обеспечивает более тихую работу по сравнению с обычными компрессорными холодильными системами и не выделяет загрязняющих веществ или вредных для окружающей среды побочных продуктов. Эти преимущества делают термоэлектрические устройства весьма привлекательными для использования в самых различных областях. Так, термоэлектрические устройства уже используются в автомобилях в качестве устройств рекуперации тепла отходящих газов, в которых тепловая энергия от выхлопной трубы транспортного средства улавливается и преобразуется в полезную электроэнергию [1]. Космические аппараты используют ТЭГ для преобразования тепловой энергии, выделяющейся при распаде радиоизотопов, в электричество. Солнечные термоэлектрические генераторы улавливают поступающий солнечный свет и преобразуют солнечную тепловую энергию в электричество, используя термоэлектри-

ческие принципы [2]. С другой стороны, термоэлектрические устройства широко применяются для отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в транспортных средствах. Они представляют собой термоэлектрические кондиционеры и сиденья с климат-контролем, которые потенциально могут заменить традиционные компрессорные системы кондиционирования воздуха в автомобилях [3]. Термоэлектрические устройства используются в хирургических инструментах и волоконно-оптических лазерах, в телекоммуникационном оборудовании [4]. Эти ТЭО также могут быть встроены в микропроцессоры для точного контроля температуры, а также уменьшения выделяющегося тепла, когда физическое пространство вокруг микропроцессора ограничено.

### Термоэлектрический феномен

Открытие термоэлектричества началось в 1821 г., когда немецкий физик по имени Томас Иоганн Зеебек обнаружил, что электродвижущий потенциал (или электрическое напряжение) возникает в цепи из двух разнородных металлов, когда один из спаев цепи нагревается или находится при более высокой температуре, чем другой (рисунок 1) [5]. Пропорциональность электрического потенциала разности температур определяется коэффициентом Зеебека.

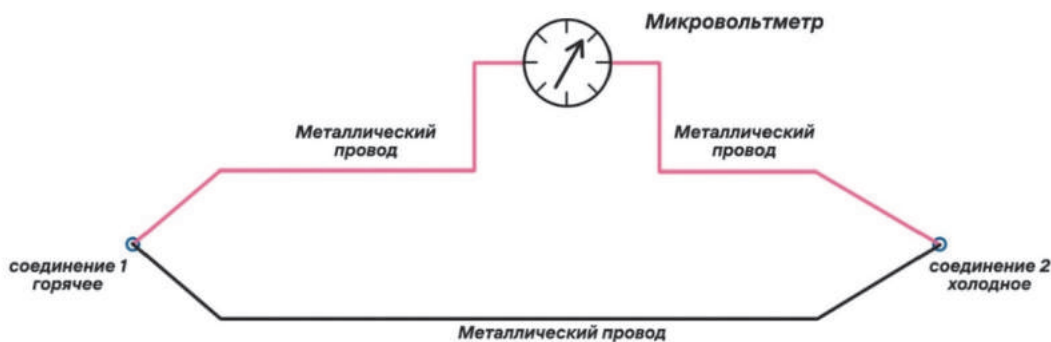


Рисунок 1. Схема, иллюстрирующая возникновение эффекта Зеебека

Figure 1. Diagram illustrating the occurrence of the Seebeck effect

### Термоэлектрические модули

Принцип действия термоэлектрического модуля проиллюстрирован на рисунке 2.

Термоэлектрические модули обладают рядом важных особенностей [6]:

1. отсутствие движущихся частей;
2. маленький размер и вес;
3. способность охлаждать ниже температуры окружающей среды;
4. точный контроль температуры;
5. высокая надежность, срок службы типичной термоэлектрической системы превышает 200 тыс. ч;
6. бесшумность работы;
7. работа при любой ориентации;
8. термоэлектрические модули работают от источника постоянного тока;
9. с помощью термоэлектрического модуля можно охладить только один конкретный компонент или область;
10. термоэлектрические модули способны генерировать небольшое количество электроэнергии постоянного тока;
11. термоэлектрические устройства не используют и не выделяют вредные газы.

Еще одним преимуществом термоэлектрических устройств (рисунок 3) является их способность преобразовывать

тепловую энергию непосредственно в электрическую и наоборот. Прямое преобразование исключает потери, связанные с промежуточными процессами преобразования энергии. Прямое преобразование также упрощает устройство. Термоэлектрическое преобразование энергии осуществляется в твердом состоянии, поэтому в устройствах отсутствуют движущиеся части [7].

### Применение термоэлектрических устройств в качестве источников энергии

Термоэлектрический генератор энергии (рисунок 4) представляет собой твердотельное устройство, которое обеспечивает прямое преобразование тепловой энергии (тепла) в электрическую энергию на основе «эффекта Зеебека». Термоэлектрический энергетический цикл использует рабочее тело в качестве носителей заряда (электронов). Основным недостатком термоэлектрических генераторов является их относительно низкий КПД преобразования (обычно около 5 %). Это ограничивает их использование в областях, где надежность играет важную роль, а стоимость не так критична [8]. За последнее десяти-

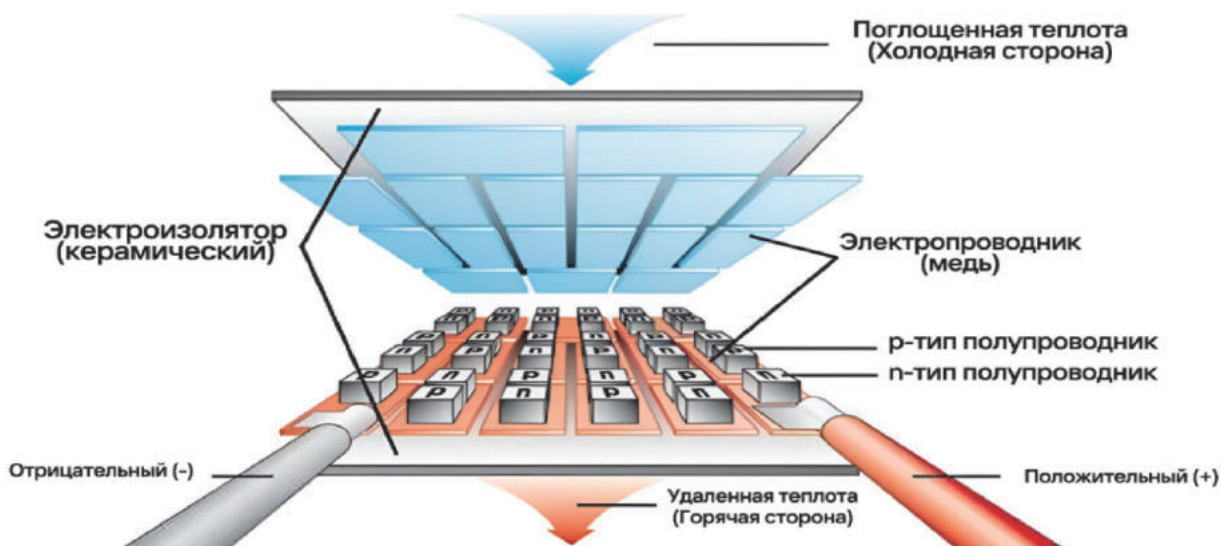


Рисунок 2. Конструкция термоэлектрического модуля

Figure 2. Thermoelectric module design

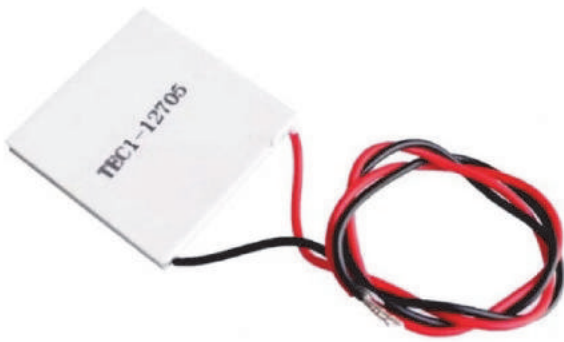


Рисунок 3. Модуль Пельтье

Figure 3. The Peltier module

тилетие термоэлектрические генераторы нашли применение в промышленных инструментах, военной, медицинской и аэрокосмической промышленности, а также в приложениях для портативной или удаленной генерации электроэнергии [9].

### Солнечная термоэлектрическая генерация

Растущий спрос на энергию во всем мире привел к увеличенной значимости исследований новых источников энергии. Среди нетрадиционных источников

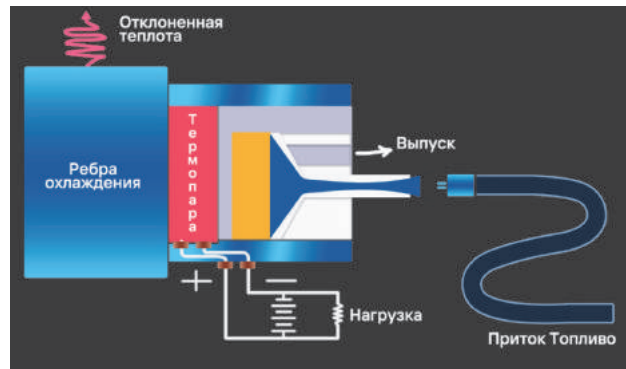


Рисунок 4. Термоэлектрический генератор

Figure 4. Thermoelectric generator

солнечная энергия считается одним из наиболее перспективных источников энергии на Земле и в космосе, так как она чиста и неисчерпаема. Применение солнечных термоэлектрических генераторов представляет собой привлекательную альтернативу [10]. Система солнечного термоэлектрического генератора обычно объединяет солнечный тепловой коллектор с термоэлектрическим генератором, который обеспечивает производство электроэнергии (рисунок 5).

Тепло передается с высокотемпературного источника тепла к горячему

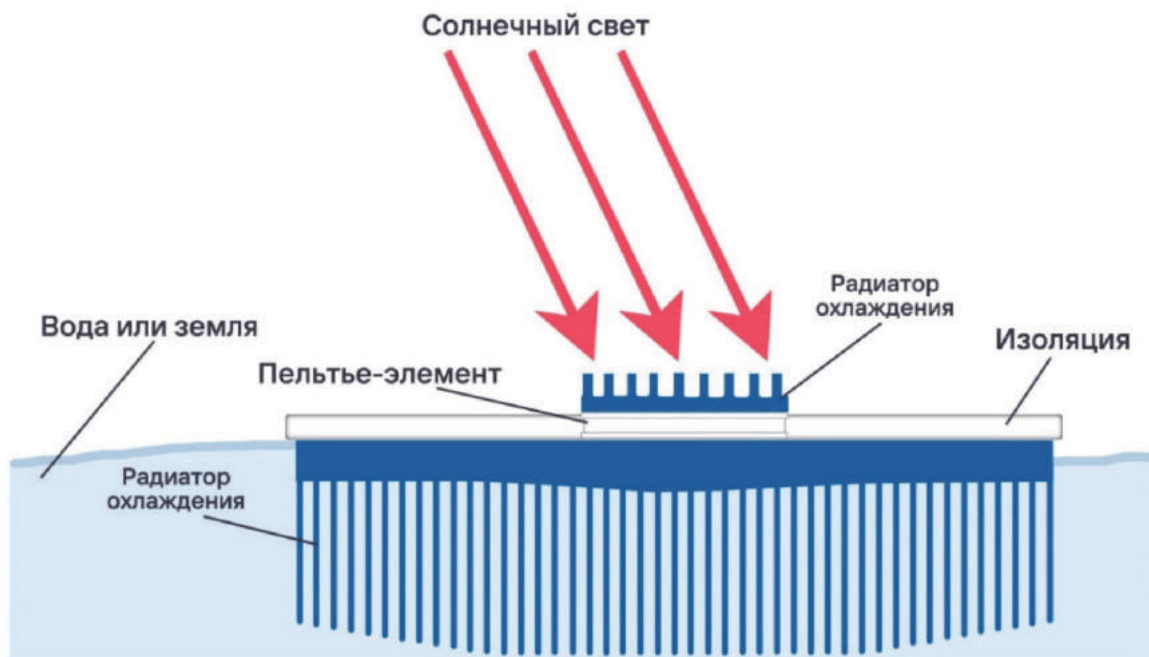


Рисунок 5. Основные принципы работы солнечной термоэлектрической системы

Figure 5. Basic principles of solar thermoelectric system operation

спаю и выбрасывается с низкотемпературного стока от холодного спаю. В соответствии с эффектом Зеебека тепло, подаваемое к горячему спаю, вызывает протекание электрического тока в цепи и производство электроэнергии. Следует отметить, что этот энергетический цикл очень схож с энергетическим циклом теплового двигателя (двигателя Карно), и поэтому термоэлектрический генератор энергии можно рассматривать как уникальную тепловую машину [11].

### **Применение термоэлектрических устройств в качестве охладителей**

Термоэлектрическое охлаждение представляет собой форму твердотельного охлаждения, преимуществом которой является компактность и долговечность. В термоэлектрическом охладителе нет движущихся частей и жидкостей, что устраняет необходимость в громоздких трубах и механических компрессорах, используемых в системах охлаждения с паровым циклом. Это позволяет использовать термоэлектрическое охлаждение там, где обычные системы охлаждения не работают. Преимущество термоэлектрических устройств также заключается в их способности поддерживать более узкий диапазон температур, чем обычные системы охлаждения. Они могут поддерживать заданную температуру с точностью до  $\pm 1^\circ \text{C}$  или выше, в то время как обычное охлаждение может варьироваться в пределах нескольких градусов [12].

Высокая стоимость термоэлектрических модулей ограничивает их использование в системах, требующих обильной охлаждающей мощности. Из-за небольших размеров термоэлектрических модулей существуют ограничения на максимальную разницу в температуре, которая может быть достигнута между сторонами термоэлектрического модуля. Однако в приложениях, требующих

более высокой разности температур, модули можно объединять в каскады. Когда холодная сторона одного модуля является горячей стороной другого, можно достичь достаточно низких температур [1].

### **Конденсация солнечной воды с использованием термоэлектрических охладителей**

Солнечная система конденсации воды строится с использованием охладителя, солнечных батарей, теплообменника и электронного блока управления (рисунок 6). Система имеет автономный источник питания и может использоваться в изолированных и пустынных районах для конденсации воды из окружающего влажного воздуха. При использовании системы в условиях высокой влажности на участке производится вода, которая может использоваться для орошения [13]. Экономическая целесообразность такой системы до сих пор остается неясной из-за относительно высокой стоимости установки. Такая система может стать инструментом долгосрочной экономии средств, поскольку источник энергии бесплатен, а солнечная подсистема обычно не требует технического обслуживания [14].

### **Медицинские применения**

Термоэлектрическое охлаждение широко используется в медицине. В медицинской практике хорошо известно, что температурное воздействие является важным фактором в лечении многих заболеваний организма человека. Для достижения низких температур используются системы с жидким азотом, что существенно ограничивает их применение в больницах. В большинстве случаев такие устройства громоздки, не имеют должного регулирования температуры и воспроизведения тепловых режимов. Поэтому применение теплового воздей-

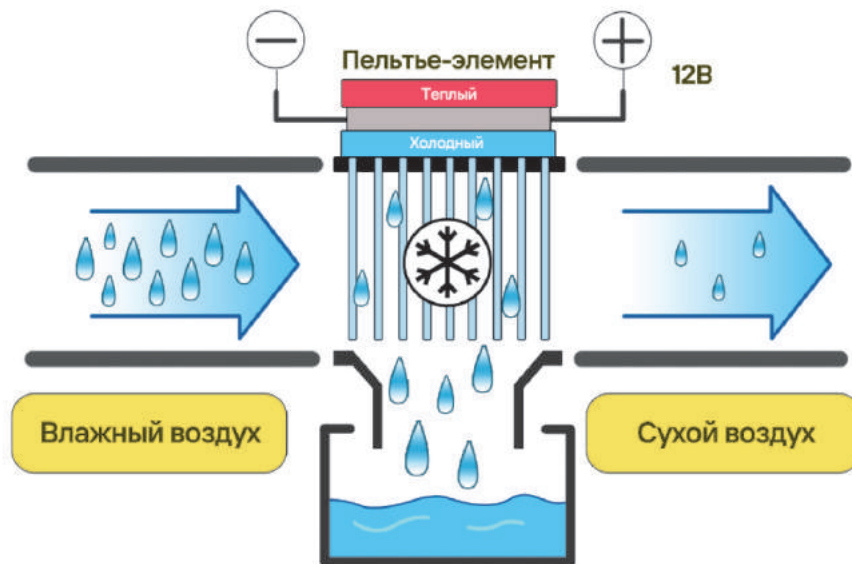


Рисунок 6. Принципиальная схема построенной системы конденсации воды

Figure 6. Principle diagram of the constructed water condensation system

ствия на больного сталкивается с некоторыми трудностями и сводится главным образом к применению льда или горячей воды [15]. Использование термоэлектрического охлаждения может решить эту проблему, поскольку оно имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами теплового воздействия. Фундаментальные исследования по применению термоэлектрического охлаждения в медицине подтверждают возможность его практического применения в таких областях медицины, как криотерапия, криохирургия, офтальмология, травматология, нейрохирургия, пластическая хирургия, гинекология, урология, онкология, дерматология [4]. В дерматологии термоэлектрические аппараты используются для процедур криомассажа (стимуляция обмена веществ, разглаживание морщин), лечения гнойно-воспалительных процессов, вымораживания бородавок, закаливания отдельных участков тела человека и других медицинских процедур. Поэтому разработка и совершенствование термоэлектрических медицинских устройств для лечения заболеваний кожи является актуальной задачей [16].

### Расчет термоэлектрического генератора

Требуется рассчитать термоэлектрический генератор на модулях Пельтье.

Произведем расчет основных характеристик модуля Пельтье, таких как: термоэлектрическая эффективность, перепад температур, КПД, выходная электрическая мощность и количество термоэлементов.

В качестве исходных данных выберем следующие параметры.

Материалы полупроводников:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sb}_{1,5}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}_{0,3}$ .

Температуры спая:  $T_1=310$  К;  $T_0=294$  К.

Номинальное напряжение:  $U=3,6$  В.

Номинальный ток:  $I=0,1$  А.

Среднеинтегральные коэффициенты термоЭДС:  $\alpha_n=175 \cdot 10^{-6}$  В/К,  $\alpha_p=163 \cdot 10^{-6}$  В/К.

Среднеинтегральные коэффициенты теплопроводности:  $\chi_n=11,3 \cdot 10^{-3}$  Вт/(см·К),  $\chi_p=14,3 \cdot 10^{-3}$  Вт/(см·К).

Среднеинтегральные коэффициенты электропроводности:  $\sigma_n=855$  (Ом·см) $^{-1}$ ,  $\sigma_p=1200$  (Ом·см) $^{-1}$ .

Определим термоэлектрическую эффективность:

$$z = \left[ \left[ \frac{\alpha_n + \alpha_p}{\left(\frac{x_n}{\sigma_n}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{x_p}{\sigma_p}\right)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 \cdot 300 \right] =$$

$$= \left[ \left[ \frac{175 \cdot 10^{-6} + 163 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{11,3 \cdot 10^{-3}}{855}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{14,3 \cdot 10^{-3}}{1200}\right)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 \cdot 300 \right] = 0,682. \quad (1)$$

Средняя температура:

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_0}{2} = \frac{310 + 294}{2} = 302 \text{ K}. \quad (2)$$

Перепад температуры:

$$\Delta T = T_1 - T_0 = 310 - 294 = 16 \text{ K}. \quad (3)$$

КПД:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_1} \cdot \frac{\sqrt{1+zT_{cp}} - 1}{\sqrt{1+zT_{cp}} - \frac{T_0}{T_1}} =$$

$$= \frac{16}{310} \cdot \frac{\sqrt{1+0,682 \cdot 302} - 1}{\sqrt{1+0,682 \cdot 302} - \frac{294}{310}} = 0,051. \quad (4)$$

Выходная электрическая мощность:

$$W = U \cdot I = 3,6 \cdot 0,1 = 0,36 \text{ Вт}. \quad (5)$$

Исходя из формул (1)–(5), количество термоэлементов будет найдено по формуле:

$$N = \frac{U}{2\alpha\Delta T} \cdot \frac{\sqrt{1+zT_{cp}} + 1}{\sqrt{1+zT_{cp}}} =$$

$$= \frac{3,6}{2 \cdot 163 \cdot 10^{-6} \cdot 16} \cdot \frac{\sqrt{1+0,682 \cdot 302} + 1}{\sqrt{1+0,682 \cdot 302}} = 711,943. \quad (6)$$

На основании проведенного расчета установлено, что для генерации напряжения 3,6 В с мощностью 0,36 Вт при перепаде температур 16 К необходимо 712 термопар. В одном тонкопленочном термоэлементе содержится 19 термопар, следовательно, термоэлектрическая батарея должна состоять из 38 тонкопленочных термоэлементов при заданных показателях.

Таким образом производится предварительный расчет по количеству термоэлементов, на основании чего делается вывод о целесообразности и возможности применения термоэлектрических модулей Пельтье для создания генератора с заданными параметрами.

Таим образом производится предварительный расчет по количеству термоэлементов, на основании чего делается вывод о целесообразности и возможности применения термоэлектрических модулей Пельтье для создания генератора с заданными параметрами.

## Выводы

На основании приведенных материалов могут быть сделаны следующие выводы.

1. В последнее время термоэлектрическая технология получает широкое распространение. Термоэлектрические устройства работают как охладители, генераторы энергии или датчики тепловой энергии и используются практически во всех областях промышленности, таких как военная, аэрокосмическая, приборостроительная, биологическая, медицинская.

2. Широкому применению термоэлектричества препятствует достаточно низкая эффективность преобразования энергии (КПД преобразователей не превышает 5 %). Ситуация может измениться благодаря открытию новых полупроводников.

3. Приведен расчет термоэлектрического генератора, который показал, что для обеспечения мощности 0,36 Вт при напряжении 3,6 В при разности температур 16 К требуется 712 термопар или 38 тонкопленочных термоэлементов.

## Список источников

1. Шелехов И.Ю., Смирнов Е.И., Рупсов В.Л., Шишелова Т.И. Опыт использования термоэлектрических генераторов // Фундаментальные исследования — Basic Research. 2013. № 11. С. 919–923. EDN: RTPEIL.
2. Анатычук Л.И. О солнечных термоэлектрических преобразователях энергии // Термоэлектричество. 2013. № 4. С. 75–82.
3. Шелехов И.Ю., Смирнов Е.И., Иноземцев В.П. Анализ возможности использования

термоэлектрических генераторов в системах вентиляции // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 67–74. EDN: UCQROP.

4. Иванов М.Ф. Моделирование параметров термоэлектрических охлаждающих устройств // Инженерный вестник. 2014. № 11. С. 8.

5. Кропотова Н.А. Устройство для автономного электроснабжения на основе элементов Пельтье при реализации эффекта Зеебека // NovaInfo.Ru. 2017. Т. 2. № 60. С. 150–155. EDN: XYCAQJ.

6. Лопатин А.А. Анализ возможности применения термоэлектрических генераторов в авиационных двигателях // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 2. С. 42–48. EDN: ZHUXKT.

7. Чесноков Б.П. Анализ получения низких температур на основе термоэлектрического эффекта Пельтье // Научная мысль. 2016. № 5. С. 187–190. EDN: wyiekv.

8. Сандалов В.М. Устройство автономного энергообеспечения // Пром-Инжиниринг: тр. IV Междунар. науч.-техн. конф., Москва-Челябинск-Новочеркасск, 15–18 мая 2018 года. Москва-Челябинск-Новочеркасск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2018. С. 325–330.

9. Оксенгойт Е.А., Борисов Б.Н., Фролов В.Ф. Применение термоэлектрических модулей Пельтье в газоаналитической аппаратуре // Экологические системы и приборы. 2010. № 6. С. 60–64. EDN: MLZYEX.

10. Васильев Е.Н. Применение термоэлектрических модулей Пельтье для охлаждения электронных устройств // Современные проблемы радиоэлектроники: матер. XXIII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 127-й годовщине Дня радио, Красноярск, 11–14 мая 2022 года. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. С. 555–559. EDN: DOJKRU.

11. Афашиков Ю.М., Ширин А.С., Занкишиев К.А. Изучение элемента Пельтье: принцип работы и области применения // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика: сб. науч. ст. по материалам XII Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 21 апреля 2023 года. Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. Ч. 1. С. 60–62. EDN: DSPHVP.

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. С. 337–341. EDN: BCVQFL.

13. Larsson A., Tollefsen T.A., Løvvik O.M., Aasmundtveit K.E., Thermoelectric Module for High Temperature Application // 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm).

Orlando, FL, USA, 2017. P. 719–725. doi: 10.1109/ITHERM.2017.7992557.

14. Maruyama S., Komiya A., Takeda H., Aiba S. Development of Precise-Temperature-Controlled Cooling Apparatus for Medical Application by Using Peltier Effect // 2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics. Sanya, China, 2008. P. 610–614, doi: 10.1109/BMEI.2008.239.

15. Shah A., Bhatnagar T. Methods of Repurposing Heat // IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC). Princeton, NJ, USA, 2016. P. 86–90. doi: 10.1109/ISECon.2016.7457561.

16. Naigert K.V., Tselischev V.A. Modeling of Thermoelectric Elements in Cooling Circuits of Drive Systems // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Chelyabinsk, 2019. P. 467–471. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877671.

## References

1. Shelekhov I.Yu., Smirnov Ye.I., Ruposov V.L., Shishelova T.I. Opyt ispol'zovaniya termoelektricheskikh generatorov [Experience of Thermoelectric Generators]. *Fundamental'nyye issledovaniya — Basic Research*, 2013, No. 11, pp. 919–923. EDN: RTPEIL. [in Russian].

2. Anatyshuk L.I. O solnechnykh termoelektricheskikh preobrazovatelyakh energii [About Solar Thermoelectric Energy Converters]. *Termoelektrichestvo — Thermoelectricity*, 2013, No. 4, pp. 75–82. [in Russian].

3. Shelekhov I.Yu., Smirnov Ye.I., Inozemtsev V.P. Analiz vozmozhnosti ispol'zovaniya termoelektricheskikh generatorov v sistemakh ventilyatsii [Analysis of the Possibility of Using Thermal-Electric Generators in Ventilation Systems]. *Nauchnoye obozreniye — Scientific Review*, 2015, No. 8, pp. 67–74. EDN: UCQROP. [in Russian].

4. Ivanov M.F. Modelirovaniye parametrov termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv [Modeling of the Thermoelectric Cooling Devices Parameters]. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, No. 11, pp. 8. [in Russian].

5. Kropotova N.A. Ustroystvo dlya avtonomnogo elektrosnabzheniya na osnove elementov Pel't'ye pri realizatsii effekta Zeyebeka [Device for the Autonomous Power Supply Based on the Peltier Elements at the Realization of the Seebeck Effect]. *NovaInfo.Ru — NovaInfo.Ru*, 2017, Vol. 2, No. 60, pp. 150–155. EDN: XYCAQJ. [in Russian].

6. Lopatin A.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya termoelektricheskikh generatorov v aviatsionnykh dvigatelyakh [Analysis of the



Possibility of Using Thermoelectric Generators in Aircraft Engines]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva — Bulletin of A.N. Tupolev Kazan State Technical University*, 2017, Vol. 73, No. 2, pp. 42–48. EDN: ZHUXKT. [in Russian].

7. Chesnokov B.P. Analiz polucheniya nizkikh temperatur na osnove termoelektricheskogo effekta Pel't'ye [Analysis of Low Temperature Generation Based on the Thermoelectric Peltier Effect]. *Nauchnaya mysl' — Scientific Thought*, 2016, No. 5, pp. 187–190. EDN: wyeikv. [in Russian].

8. Sandalov V.M. Ustroystvo avtonomnogo energoobespecheniya [Device of Autonomous Power Supply]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Prom-Inzhiniring», Moskva-Chelyabinsk-Novocherkassk, 15–18 maya 2018 goda* [Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference «Prom-Engineering», Moscow-Chelyabinsk-Novocherkassk, May 15-18, 2018]. Moscow-Chelyabinsk-Novocherkassk, Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet (natsional'nyy issledovatel'skiy universitet), 2018, pp. 325–330. [in Russian].

9. Oksengoyt Ye.A., Borisov B.N., Frolov V.F. Primeneniye termoelektricheskikh moduley Pel't'ye v gazoanaliticheskoy apparature [Application of Thermoelectric Peltier Modules in Gas Analytical Equipment]. *Ekologicheskiye sistemy i pribory — Ecological Systems and Devices*, 2010, No. 6, pp. 60–64. EDN: MLZYEX. [in Russian].

10. Vasil'yev Ye.N. Primeneniye termoelektricheskikh moduley Pel't'ye dlya okhlazhdeniya elektronnykh ustroystv [Application of Thermoelectric Peltier Modules for Cooling Electronic Devices]. *Materialy XXIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Sovremennyye problemy radioelektroniki», posvyashchennoy 127-y godovshchine Dnya radio, Krasnoyarsk, 11–14 maya 2022 goda* [Proceedings of the XXIII All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Modern Problems of Radio Electronics» dedicated to the 127th anniversary of Radio Day, Krasnoyarsk, May 11–14, 2022]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyy universitet, 2022, pp. 555–559. EDN: DOJKRU. [in Russian].

11. Afashokov Yu.M., Shirin A.S., Zankishiyev K.A. Izucheniye elementa Pel't'ye: printsip raboty i oblasti primeneniya [Study of Peltier Element: Principle of Operation and Application].

*Sbornik nauchnykh statey po materialam XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye voprosy sovremennoy nauki: teoriya, tekhnologiya, metodologiya i praktika», Ufa, 21 aprelya 2023 goda.* [Collection of Scientific Articles on the Materials of the XII International Scientific and Practical Conference «Actual Issues of Modern Science: Theory, Technology, Methodology and Practice», Ufa, April 21, 2023]. Ufa, Nauchno-izdatel'skiy tsentr «Vestnik nauki», 2023, Ch. 1, pp. 60–62. EDN: DSPHVP. [in Russian].

12. Burtsev A.P. Ispol'zovaniye termoelektricheskogo istochnika elektrosnabzheniya dlya obespecheniya avtonomnoy raboty teplogeneratorov [The 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: Molodezhnyy vzglyad v budushcheyu»: V 4 t.* [Collection of Scientific Articles of the 5th All-Russian Scientific Conference «Problems and Prospects of Russia's Development: Youth View into the Future»: in 4 Vol.]. Kursk, 20–21 oktyabrya 2022 goda. Kursk, Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2022, pp. 337–341. EDN: BCVQFL. [in Russian].

13. Larsson A., Tollefsen T.A., Løvvik O.M., Aasmundtveit K.E., Thermoelectric Module for High Temperature Application. *16th IEEE Inter-society Conference on Thermal and Thermo-mechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, Orlando, FL, USA, 2017, pp. 719–725. doi: 10.1109/ITHERM.2017.7992557.

14. Maruyama S., Komiya A., Takeda H., Aiba S. Development of Precise-Temperature-Controlled Cooling Apparatus for Medical Application by Using Peltier Effect. *2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics, Sanya, China*, 2008, pp. 610–614. doi: 10.1109/BMEI.2008.239.

15. Shah A., Bhatnagar T. Methods of Repurposing Heat. *IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)*, Princeton, NJ, USA, 2016, pp. 86–90. doi: 10.1109/ISECon.2016.7457561.

16. Naigert K.V., Tselishev V.A. Modeling of Thermoelectric Elements in Cooling Circuits of Drive Systems. *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 467–471. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877671.

*Статья поступила в редакцию 25.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.*

*The article was submitted 25.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 05.12.2023.*

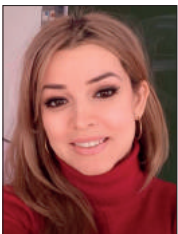
Научная статья

УДК 621.311

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-137-149

**РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА  
«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЙ И ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ»****Мусса Гумерович Баширов****Mussa G. Bashirov**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»  
Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный  
нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Эльмира Муссаевна Баширова****Elmira M. Bashirova**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование  
и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки  
и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет  
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Марсель Фаргатович Усманов****Marcel F. Usmanov**

магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных  
предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Ильнур Фазылитдинович Вагапов****Il'nur F. Vagarov**

магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных  
предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Александра Федоровна Кузьмина****Alexandra F. Kuzmina**

магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных  
предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Актуальность**

Современное состояние электроэнергетической отрасли характеризуется применением информационных технологий на базе искусственного интеллекта, что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к уровню подготовки и квалификации обслуживающего инженерно-технического персонала. Данные требования определяют необходимость совершенствования образовательной программы по подготовке инженерно-технических специальностей с внедрением в учебный процесс современных информационных технологий. Одним из перспективных направлений контроля и управления энергетическими комплексами являются система поддержки принятия решений и экспертные системы с использованием искусственного интеллекта.

**Цель исследования**

Разработка учебно-исследовательского комплекса с элементами искусственного интеллекта для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и экспертные системы».

**Методы исследования**

Исследование проводится при помощи языка программирования Python, среды разработки PyCharm с набором расширений графического фреймворка Qt и приложением QtDesigner, а также проектировании нейронного сетевого алгоритма с использованием библиотеки TensorFlow.

**Результаты**

Разработано программное обеспечение комплекса, включающее цифровой двойник стенда, исполнительную часть и модель нейронной сети, которая на уровне реализации базовых функций интегрированной экспертной системы выдает рекомендации по оптимизации энергосистемы с текущими параметрами нагрузки для конечного пользователя в виде возможных вариантов переключения вида нагрузки.

**Ключевые слова**

искусственный интеллект, электроэнергетика, система поддержки принятия решений, экспертные системы, лабораторный стенд, цифровой двойник, учебно-исследовательский комплекс

**Благодарности:** Работы по созданию учебно-исследовательского комплекса выполнены в соответствии с Программой развития Уфимского государственного нефтяного университета на 2021–2030 годы в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

**Для цитирования:** Баширов М. Г., Баширова Э. М., Усманов М. Ф., Вагапов И. Ф., Кузьмина А. Ф. Разработка учебно-исследовательского комплекса «Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и экспертные системы» // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 137–149. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-137-149>.

Original article

## EDUCATIONAL AND RESEARCH COMPLEX ON THE DISCIPLINE «INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS AND EXPERT SYSTEMS»

**Relevance**

The current state of the electric power industry is characterized by the use of information technologies based on artificial intelligence, which in turn imposes increased requirements on the level of training and qualification of maintenance engineering and technical personnel. These requirements determine the need to improve the educational program for the training of engineering and technical specialties with the introduction of modern information technologies into the educational process. One of the promising

**Keywords**

artificial intelligence, electric power industry, decision support system, expert systems, laboratory stand, digital twin, educational and research complex

areas of control and management of energy complexes are a decision support system and expert systems using artificial intelligence.

#### **Aim of research**

The development of an educational and research complex with elements of artificial intelligence for performing laboratory work on the discipline «Intelligent decision support systems and expert systems».

#### **Research methods**

The research is carried out using the Python programming language, the PyCharm development environment with a set of extensions of the Qt graphics framework and the QtDesigner application, as well as designing a neural network algorithm using the TensorFlow library.

#### **Results**

The software of the complex has been developed, including a digital double of the stand, an executive part and a neural network model, which, at the level of implementing the basic functions of the integrated expert system, provides recommendations on optimizing the power system with current load parameters for the end user in the form of possible options for switching the type of load.

**Acknowledgments:** The work on the creation of the educational and research complex was carried out in accordance with the Development Program of Ufa State Petroleum University for 2021–2030 as part of the implementation of the strategic academic leadership program «Priority 2030».

**For citation:** Bashirov M. G., Bashirova E. M., Usmanov M. F., Vagapov I. F., Kuz'mina A. F. Razrabotka uchebno-issledovatel'skogo kompleksa «Intellektual'nyye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy i ekspertnyye sistemy» [Educational and Research Complex on the Discipline «Intelligent Decision Support Systems and Expert Systems»]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 137-149 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-137-149>.

## **Введение**

Электроэнергетика играет существенную роль в повседневной жизни человека. Степень развития этой сферы отражает не только уровень развития производственных мощностей общества, но также зависит от научно-технического прогресса. Постоянные исследования приводят к появлению наиболее перспективных направлений развития. Таким направлением в настоящее время является искусственный интеллект. Интенсивное развитие данного направления позволит решить многие проблемы в электроэнергетике [1].

Поэтому важным вопросом является подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих знаниями, навыками и компетенциями в области цифровизации. Использование технологий искусственного интеллекта в обучающем процессе позволяет расширить

возможности образования, например, такие как настраиваемые учебные материалы, система консультаций, автоматическое оценивание [2]. С 2022 года в Институте нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета начата подготовка магистров по программе «Интеллектуальные средства и системы управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов» направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Целью данного проекта является создание учебно-исследовательского комплекса с элементами искусственного интеллекта для выполнения работ в области интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР) и экспертных систем. Реализация проекта позволяет проводить обучение студентов работе с перспективными технологиями

искусственного интеллекта в приложениях к электроэнергетической отрасли.

### **Литературный обзор**

Обзор отечественных и зарубежных публикаций проводился по исследованиям и разработкам в области интеллектуальных электроэнергетических комплексов, а также по существующим разработкам цифровых учебных стендов в области интеллектуальных систем поддержки принятия решений и экспертных систем электроснабжения с применением нейронных сетей или генетических алгоритмов.

И.В. Салов, И.А. Щербатов, Ю.А. Салова, А.Ю. Косов и Д.А. Чечеткин в своей работе [3] разработали цифровой двойник для лабораторного стенда, предназначенного для изучения диффузионного и кинетического режимов сжигания природного газа, а также влияния режима горения на состав уходящих газов. А.С. Ишков в своей работе [4] предложил систему поддержки принятия решений, позволяющую оценивать показатели надежности с использованием элементов искусственного интеллекта и уникальных знаний эксперта. Использование экспертных систем для повышения надежности систем радиосвязи, а также для прогнозирования технического состояния систем связи рассматривается в работе Ю.И. Найденовой, О.А. Сафарьян, И.А. Алферовой и И.В. Решетниковой [5]. В исследованиях [6, 7] продемонстрировано использование цифровых двойников в энергетической системе. Созданные и интегрированные в обучающий процесс цифровые двойники лабораторных стендов описаны в работах [8–11]. С использованием методов искусственного интеллекта в Национальном исследовательском университете (НИУ) МЭИ был создан виртуальный инженер для автоматизированного проектирования цифровых под-

станций [12]. Исследование теоретических основ внедрения искусственного интеллекта в средства автоматизации рассматривают в своей работе А.В. Соломинский, В.А. Железин, А.Д. Миргородский, С.В. Краснобаев и Н.М. Колотилина [13]. Применение технологий активно-адаптивных сетей для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой рассматривают в своей работе Н.В. Савина, И.А. Лисогурский и Л.Н. Лисогурская [14].

По результатам проведенного литературного обзора можно сделать выводы о том, что в настоящее время отсутствуют учебно-исследовательские комплексы, содержащие цифровые двойники с элементами интеллектуальных систем принятия решений и экспертных систем. Такие разработки востребованы при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

### **Материалы и методы**

Представленный проект был реализован с использованием лабораторного стенда «Модель электрической системы с узлом комплексной нагрузки» (МЭС-КН-СК) ООО «ЛабСис» учебной лаборатории Института нефтехимии и нефтепереработки в г. Салавате. Из модулей лабораторного стенда был смоделирован участок энергосистемы, электроэнергия в котором проходит путь от источника к потребителю с активно-индуктивными приемниками с однократным преобразованием уровня напряжения.

В качестве источника переменного напряжения в стенде использован модуль питания, соединенный с модулем трехфазной сети. Сам модуль питания стенда запитан от лабораторной сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц. Модуль трехфазной сети последовательно соединен с модулем однофазных трансформа-

торов и модулем выключателей. Модуль линии электропередачи в совокупности с модулями активной и индуктивной нагрузки составляют основную часть стенда, изменение параметров которой и обеспечивают имитацию изменения нагрузки и потерь в линии электропередачи. Структурная схема для проведения исследований с выбранными модулями лабораторного стенда представлена на рисунке 1.

Модуль однофазных трансформаторов, состоящий из трех однофазных трансформаторов, обеспечивает понижение напряжения с 380 до 220 В, также позволяет получить напряжение 127 В при подключении ко вторым выводам вторичной обмотки.

Из модуля однофазных трансформаторов электроэнергия передается в модуль линии электропередачи, который содержит три переключателя с тремя положениями. Первый переключатель позволяет изменять индуктивное и активное сопротивление линии изменением количества последовательно подключенных дросселей от одного до трех. Второй и третий переключатель позволяют изменять емкостное сопротивление фазы относительно земли в начале и конце линии. Выбор положения переключателей позволяет менять количество парал-

лельно включенных конденсаторов от нуля до двух.

Нагрузка представляет собой последовательное соединение двух модулей — модуля активной нагрузки и модуля индуктивной нагрузки, которые имеют одиннадцать и пять положений переключателя соответственно. Активная нагрузка представляет собой каскад резисторов, суммарный номинал которых изменяется переключением галетного переключателя. Аналогично модуль индуктивной нагрузки содержит набор катушек индуктивных с номиналом по 0,16 Гн каждая, которые можно включать последовательно с помощью переключателя. Модуль измерения мощности позволяет производить измерение активной, реактивной и полной мощности, линейных и фазных напряжений и токов.

Изменение параметров нагрузки позволяет моделировать разные режимы работы сети. При выполнении лабораторной работы обучающийся должен выбрать значения активного и реактивного сопротивлений линии для обеспечения минимальных потерь согласно ГОСТ Р 50571.5.52-2011 [15].

При измерении параметров элементов модулей были получены значения их параметров, которые были использованы при разработке цифрового двойника

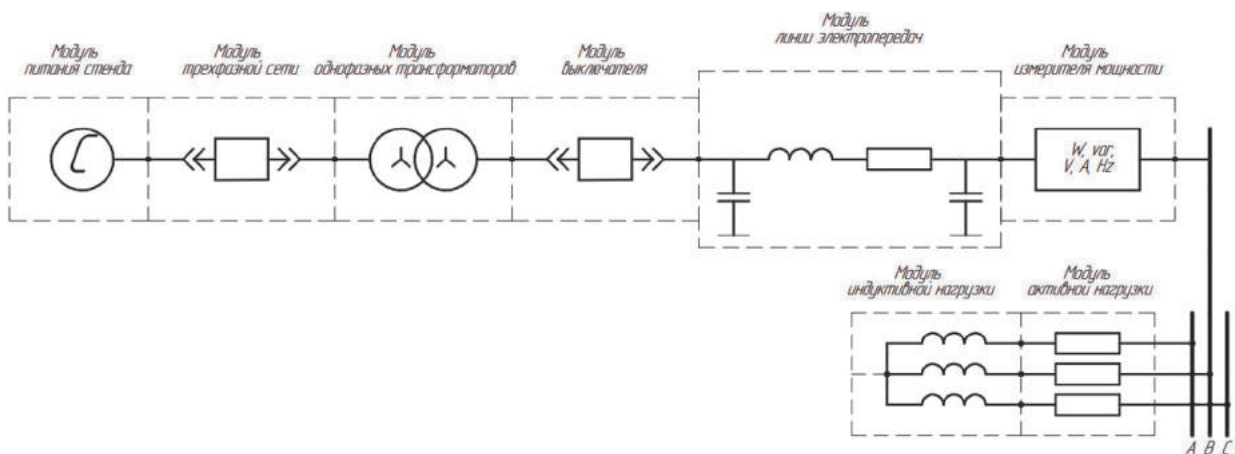


Рисунок 1. Структурная схема с выбранными модулями лабораторного стенда

Figure 1. Block diagram with selected modules of the laboratory bench

лабораторного стенда. Номинальные значения параметров элементов модулей, полученные путем измерений, представлены в таблицах 1–3.

Первый этап лабораторной работы выполняется с использованием физического стенда. Обучающиеся должны собрать схему в соответствии с методическими указаниями к выполнению лабораторной работы, провести измере-

ния посредством встроенных приборов, выполнить необходимые расчеты и на основании результатов расчетов выбрать положения переключателей для обеспечения минимизации потерь в линии электропередачи.

Второй этап выполняется с использованием цифрового двойника физического лабораторного стенда. После запуска программы обучающиеся должны

**Таблица 1.** Положения переключателя и соответствующие значения параметров модуля линии электропередачи

**Table 1.** Switch positions and corresponding power line module parameter values

| Положение переключателя | Значение параметров линии |
|-------------------------|---------------------------|
| № 1                     | 6 Ом; 0,16 Гн             |
| № 2                     | 11 Ом; 0,32 Гн            |
| № 3                     | 15,6 Ом; 0,48 Гн          |

**Таблица 2.** Положения переключателя и соответствующие значения активной нагрузки

**Table 2.** Switch positions and corresponding active load values

| Положение переключателя | Значение |
|-------------------------|----------|
| № 1                     | 2400 Ом  |
| № 2                     | 2600 Ом  |
| № 3                     | 2800 Ом  |
| № 4                     | 3000 Ом  |
| № 5                     | 3200 Ом  |
| № 6                     | 3400 Ом  |
| № 7                     | 3600 Ом  |
| № 8                     | 3800 Ом  |
| № 9                     | 4000 Ом  |
| № 10                    | 4200 Ом  |
| № 11                    | 4400 Ом  |

**Таблица 3.** Положения переключателя и соответствующие значения индуктивной нагрузки

**Table 3.** Switch positions and corresponding inductive load values

| Положение переключателя | Значение |
|-------------------------|----------|
| № 1                     | 0,16 Гн  |
| № 2                     | 0,32 Гн  |
| № 3                     | 0,48 Гн  |
| № 4                     | 0,64 Гн  |
| № 5                     | 0,80 Гн  |

выбрать тип лабораторной работы, установить начальные значения параметров линии электропередачи и нагрузки. Программа выполняет расчеты, идентифицирует режим работы линии электропередачи и рекомендует действия с переключателями для минимизации потерь. Обучающиеся проводят подобные манипуляции при нескольких вариациях параметров нагрузки и сопоставляют полученные результаты с результатами выполнения лабораторной работы с использованием физического стенда.

На рисунке 2 представлена структура программной части комплекса.

Для реализации лабораторной работы по дисциплине «Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и экспертные системы» был выбран язык программирования Python версии 3.9 исходя из требований к скорости и гибкости процесса разработки, наличия необходимых инструментов в базовой библиотеке. Наиболее приемлемой интегрированной средой разработки для выбранного языка является продукт PyCharm от компании JetBrains. Выбор обусловлен поддержкой PyCharm автодополнения кодов и наличием подсказок в соответствии с принятым для языка стандартом, удобством интеграции с Git — распределенной системой управления версиями, благодаря которой над проектом могли одновременно работать сразу несколько разработчиков.

Исходной задачей при разработке цифрового двойника лабораторного стенда стало оптимальное размещение

модулей в оконном интерфейсе программы, установление последовательности их работы и связи между ними. Далее были прописаны внутренняя логика модулей, основные операции и расчеты, положения переключателей, визуализация изменения состояния модулей. На завершающем этапе были выполнены отладка программы и ее интеграция с нейросетевым алгоритмом выдачи рекомендаций. На рисунке 3 представлено интерфейсное окно цифрового двойника лабораторного стенда.

Для машинного обучения нейронной сети использовали открытую программную библиотеку TensorFlow [16], содержащую обширную документацию и готовые руководства, а также встроенные средства, позволяющие упростить процесс обучения. К достоинствам этой библиотеки также можно отнести хорошую визуализацию и возможность мониторинга процесса обучения, активную поддержку её сообществом пользователей, и, соответственно, большое количество учебно-методических и научных материалов, которые можно адаптировать под требования текущей задачи.

### Результаты

В процессе разработки цифрового двойника были импортированы данные в среду разработки, прописаны все переменные и константы, полученные в ходе экспериментальных исследований с использованием физического лабораторного стенда. Далее были установлены связи между положениями переключате-

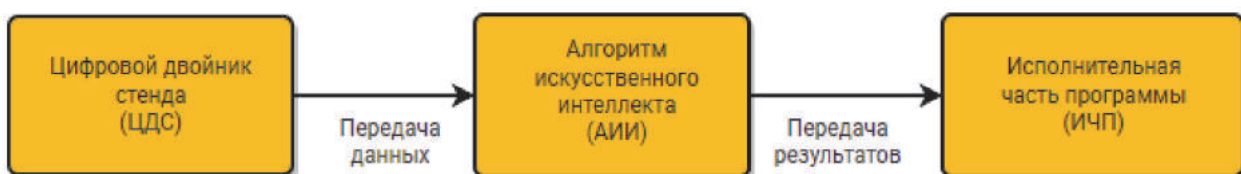


Рисунок 2. Структура программной части комплекса

Figure 2. Structure of the software part of the complex



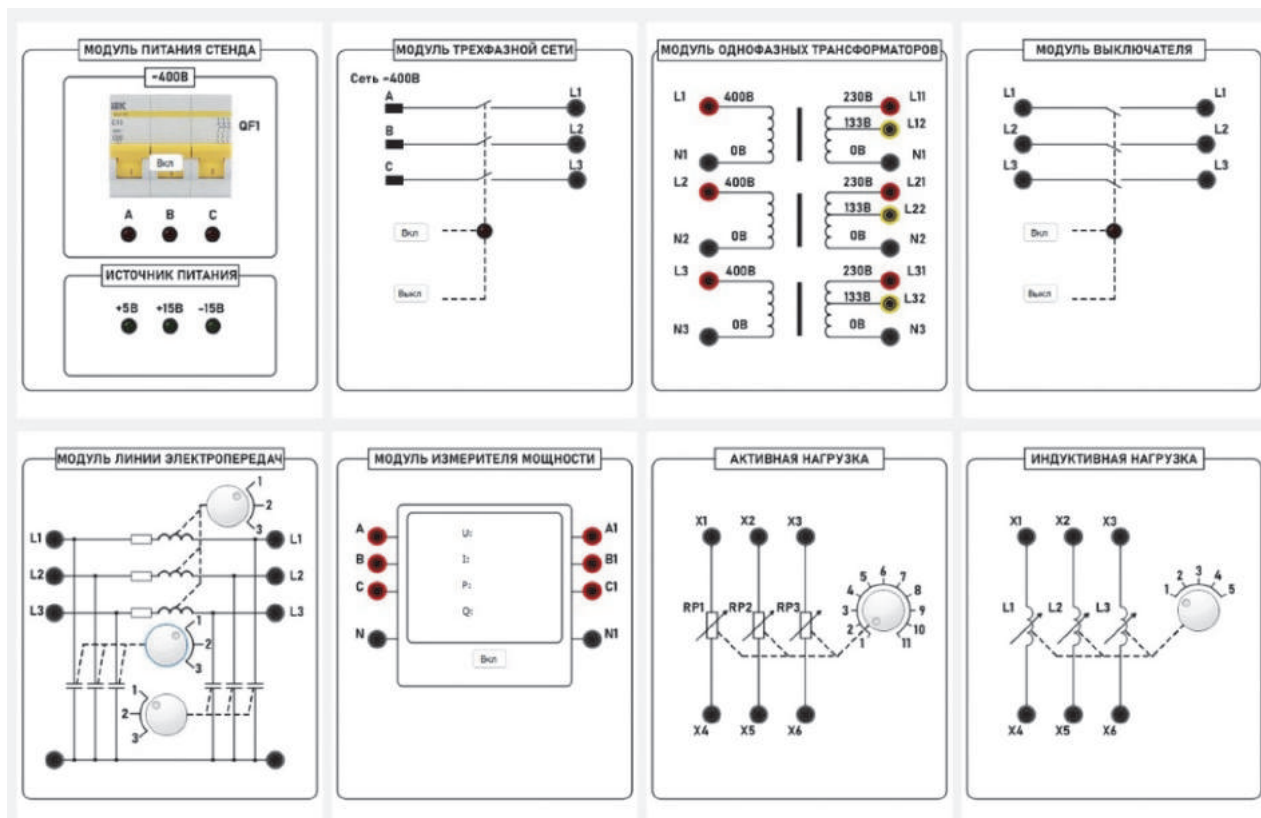


Рисунок 3. Интерфейсное окно цифрового двойника лабораторного стенда

Figure 3. Interface window of the digital twin of the laboratory bench

лей и соответствующими значениями параметров активных и реактивных элементов модели, прописаны расчеты, предусмотренные методическими указаниями к выполнению лабораторной работы. Результаты расчетов преобразуются в матричный вид и передаются в нейронную сеть для формирования базы данных для его обучения.

Для обучения нейронной сети выбран метод «обучение с учителем», использована логистическая регрессия, позволяющая определять взаимосвязь между несколькими независимыми переменными и одной зависимой переменной. В нашем случае происходит определение вероятности того, что при установленных значениях параметров электрической нагрузки для минимизации потерь в линии электропередачи будет выбрано одно из трех положений переключателя индуктивной составляющей линии электропередачи. На основе расчетных дан-

ных нейронная сеть формирует список рекомендаций для конечного пользователя — обучающегося, выполняющего лабораторную работу.

Задачами системы поддержки принятия решений являются анализ и оценка текущего положения энергосистемы, анализ взаимосвязанных событий и процессов, а также информационная поддержка в виде рекомендаций для оператора на основе полученной информации. В нашем случае было принято решение использовать активную СППР, в ходе выполнения лабораторной работы обучающемуся предоставляется возможность сопоставить свои решения по минимизации потерь в линии электропередачи, обоснованные результатами экспериментальных исследований и расчетов, с рекомендациями, сформированными нейронной сетью. На рисунке 4 представлена структурная схема СППР.

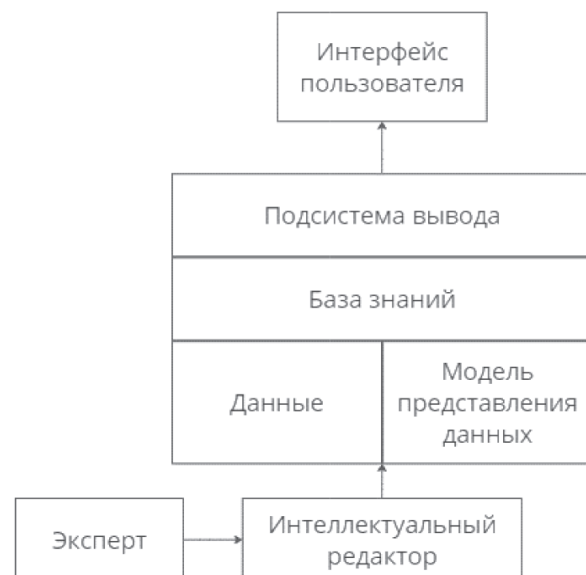


**Рисунок 4.** Структурная схема СППР

**Figure 4.** DSS block diagram

В отличие от системы поддержки принятия решений, экспертная система будет опираться на базу знаний, составленную и загруженную в нее экспертом. Внутреннее устройство экспертной системы представляет собой совокупность таких модулей, как база знаний, данные, модель представления данных, механизм логического вывода данных. База знаний является базой данных, которая содержит правила вывода и имеет информацию об опыте человека и его знаниях. Данные являются основой построения закономерности для предсказания или прогнозирования. В модели представления данных задаются способы хранения, доступа и взаимодействия со знаниями. В проекте была использована формально логическая модель представления знаний. Её главное отличие от остальных моделей заключается в том, что все имеющиеся данные имеют определенные связи между собой. Структурная схема экспертной системы представлена на рисунке 5.

На рисунке 6 представлено интерфейсное окно программы, представляющее собой основную рабочую область, содержащую схему лабораторной установки и поле для управления процессом



**Рисунок 5.** Структура экспертной системы

**Figure 5.** Expert system structure

расчета и получения результатов. Выделена область для отображения векторной диаграммы, позволяющей визуализировать режим работы системы при изменении параметров.

На рисунке 7 представлен листинг части программы, отвечающей за расчет напряжений, токов и мощности, а также потерь напряжения в линии электропередачи.

При выполнении лабораторной работы с использованием цифрового двойника и экспертной системы в функ-

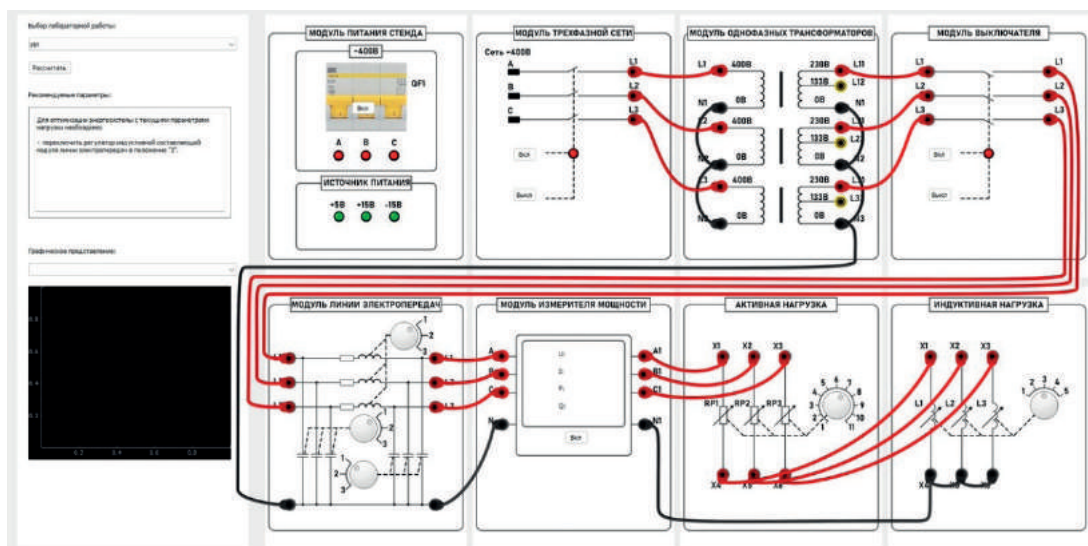


Рисунок 6. Интерфейсное окно цифрового двойника с собранной исследуемой схемой

Figure 6. Interface window of the digital twin with the assembled circuit under study

циональном окне системы появляются рекомендации по оптимизации режима работы энергосистемы. На рисунке 8 представлено функциональное окно с рекомендациями обучающемуся по минимизации потерь в линии электропередачи.

### Обсуждение

Для минимизации потерь в линии электропередачи при изменении режимов работы потребителей электроэнер-

гии предлагается применить нейронную сеть, которая на уровне реализации базовых функций интегрированной экспертной системы выдает рекомендации по изменению параметров линии электропередачи изменением положения переключателей. По мере увеличения обучающей базы оценочные значения параметров линии электропередачи максимально приближаются к их истинным значениям.

```
def current_calculation(voltage, resistance):
    """
    Функция расчета величины силы тока
    voltage: задаем величину напряжения
    resistance: задаем величину сопротивления
    return: возвращаем величину тока
    """
    global current
    current = voltage / resistance
    return current

def voltage_calculation(current, resistance):
    """
    current: задаем величину тока
    resistance: задаем величину сопротивления
    :return: возвращаем величину напряжения
    """
    global voltage
    voltage = current * resistance
    return voltage

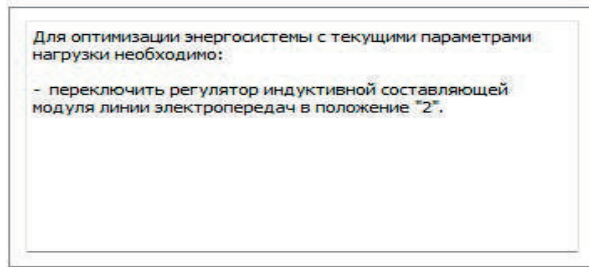
def power_calculation(current, voltage):
    """
    current: задаем величину тока
    voltage: задаем величину напряжения
    return: возвращаем величину мощности
    """
    global power
    power = current * voltage
    return power

complex_circuit_resistance = line_complex_resistance +
load_complex_resistance # полное комплексное сопротивление цепи
common_current = current_calculation(initial_voltage,
complex_circuit_resistance) # общий ток в цепи
line_voltage_drop = voltage_calculation(common_current,
line_complex_resistance) # падение напряжения на линии
```

Рисунок 7. Листинг расчетной части программы

Figure 7. Listing of the calculation part of the program

Рекомендуемые параметры:



**Рисунок 8.** Рекомендации экспертной системы по минимизации потерь в линии электропередачи

**Figure 8.** Expert system recommendations for minimizing losses in power lines

Применение учебно-исследовательского комплекса позволяет проводить лабораторные работы как в очном, так и в дистанционном форматах, что положительно скажется на успеваемости обучающихся, у которых нет возможности посещать высшее учебное заведение по состоянию здоровья, обучающихся заочной формы обучения, а также позволит организовать обучение по сетевой форме по направлению «Электроэнергетика и электротехника» с вузами-партнерами.

### Выводы

Итогом реализации проекта явился учебно-исследовательский лаборатор-

ный комплекс, разработанный на базе физического стенда компании ГК «ГалСен», который позволяет проводить обучение студентов в очном, дистанционном и смешанном форматах по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» при организации учебного процесса с применением информационных технологий на основе искусственного интеллекта в приложении к электроэнергетической отрасли. Разработан алгоритм функционирования учебно-исследовательского комплекса при выполнении лабораторных работ в очном, дистанционном и смешанном форматах. Создан цифровой двойник учебного лабораторного стенда, разработана и обучена нейронная сеть, задачей которой является распознавание одного из режимов работы энергосистемы и выдача рекомендаций пользователю по минимизации потерь в линии электропередачи. Дальнейшее развитие учебно-исследовательского лабораторного комплекса будет направлено на расширение исследуемых режимов работы потребителей и оптимизацию режимов работы линии электропередачи для минимизации электрических потерь.

### Список источников

1. Моршин А.В. Глубинное машинное обучение // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 3. С. 270–273. EDN: ZSNOYH.
2. Видова Т.А., Романова И.Н. Возможности применения технологий искусственного интеллекта в образовательном процессе // Образовательные ресурсы и технологии. 2023. № 1. С. 27–35. EDN: DYOKHP.
3. Салов И.В., Щербатов И. А., Салова Ю.А., Косов А.Ю., Четкин Д.А. Разработка цифрового двойника туннельной печи // International Journal of Open Information Technologies. 2022. С. 102–109. EDN: KGEJQD.
4. Ишков А.С. Система поддержки принятия решения для оценивания показателей надежности изделий электронной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4(42). С. 16–23. EDN: WGPJRW.

5. Найденова Ю.И., Сафарьян О.А., Алферова И.А., Решетникова И.В. Использование экспертных систем для повышения надежности систем радиосвязи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 6. С. 53–57. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-6-53-57. EDN: SHQDMO.
6. Palensky P., Cvetkovic M., Gusain D, Joseph A. Digital Twins and Their Use in Future Power Systems // Digital Twin. 2022. No. 1. P. 4. doi: 10.12688/digitaltwin.17435.2
7. Pileggi P., Verriet J., Broekhuijsen J., Leeuwen C., Wijbrandi W., Konsman M. A Digital Twin for Cyber-Physical Energy Systems // 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Montreal, QC, Canada. 2019. P. 1–6. doi: 10.1109/MSCPES.2019.8738792.
8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023662950. Программное обеспече-

ние виртуального лабораторного комплекса в области автоматизации промышленных процессов и производств / М.Г. Баширов, Д.Ш. Акчурин, К.А. Крышко, А.И. Муртазина. 2023662105, Заявл. 08.06.2023; Оpubл. 16.06.2023.

9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023662951. Программное обеспечение виртуального лабораторного стенда на основе микропроцессорного контроллера овен плк-110-30 для изучения систем управления на базе нечеткой логики / М.Г. Баширов, Р.Р. Адельгужин, А.М. Хафизов, Д.Ш. Акчурин. 2023662104, Заявл. 08.06.2023; Оpubл. 16.06.2023.

10. Баширов М.Г., Прахов И.В., Кислицын Н.А., Акчурин Д.Ш. Учебный имитационно-моделирующий комплекс на основе программных и технических средств отечественной компании овен // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2020: матер. Междунар. науч.-метод. конф., посвященной 75-летию Победы в Великой отечественной войне. 2020. С. 191–194. EDN: HADUMI.

11. Костиков И.И., Николаев К.Г., Баширов М.Г., Прахов И.В. Создание виртуальной модели учебного лабораторного стенда на основе современного отечественного программно-технического комплекса «БАЗИС-100» // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2020: матер. Междунар. науч.-метод. конф., посвященной 75-летию Победы в Великой отечественной войне. 2020. С. 234–236. EDN: FATYSX.

12. Курбатов А. Виртуальный инженер поможет проектировать энергообъекты [Электронный ресурс]. URL: <https://inscience.news/ru/article/nti/9377> (дата обращения: 12.10.2023).

13. Соломинский А.В., Железин В.А., Миргородский А.Д., Краснобаев С.В., Колотилина Н.М. Внедрение искусственного интеллекта в средства автоматизации // Вестник науки и образования. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-iskusstvennogo-intellekta-v-sredstva-avtomatizatsii>.

14. Савина Н. В., Лисогурский И. А., Лисогурская Л. Н. Применение технологий активно-адаптивных сетей для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2021. № 23. С. 56–61. doi: 10.22250/jasu.93.12.

15. ГОСТ Р 50571.5.52-2011. Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки: дата введения 2013-01-01 / Федеральное агент-

ство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2013. 77 с.

16. TensorFlow. <https://www.tensorflow.org/?hl=ru>.

## References

1. Morshin A.V. Glubinnoye mashinnoye obucheniye [Deep Machine Training]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki — News of Tula State University. Technical science*, 2019, No. 3, pp. 270–273. EDN: ZSNOYH. [in Russian].

2. Vidova T.A., Romanova I.N. Vozmozhnosti primeneniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v obrazovatel'nom protsesse [The Opportunities of Using Artificial Intelligence Technologies in the Educational Process]. *Obrazovatel'nyye resursy i tekhnologii — Educational Resources and Technologies*, 2023, No. 1, pp. 27–35. EDN: DYOKHP. [in Russian].

3. Salov I.V., Shcherbatov I.A., Salova Yu.A., Kosov A.Yu., Chechetkin D.A. Razrabotka tsifrovogo dvoynika tunnel'noy pechi [Development of a Tunnel Kiln Digital Twin]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2022, pp. 102–109. EDN: KGEJQD. [in Russian].

4. Ishkov A. S. Sistema podderzhki prinyatiya resheniya dlya otsenivaniya pokazateley nadezhnosti izdeliy elektronnoy tekhniki [Decision Support System for Evaluation Reliability Indicators of Electronic Products]. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol' — Measurement. Monitoring. Management. Control*, 2022, No. 4(42), pp. 16–23. EDN: WGPJRW. [in Russian].

5. Naydenova Yu.I., Safar'yan O.A., Alferova I.A., Reshetnikova I.V. Ispol'zovaniye ekspertnykh sistem dlya povysheniya nadezhnosti sistem radiosvyazi [Using Expert Systems to Improve the Reliability of Radio Communication Systems]. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli — RF Technology and Communication*, 2022, Vol. 14, No. 6, pp. 53–57. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-6-53-57. EDN: SHQDMO. [in Russian].

6. Palensky P., Cvetkovic M., Gusain D, Joseph A. Digital Twins and Their Use in Future Power Systems. *Digital Twin*, 2022, No. 1, P. 4. doi: 10.12688/digitaltwin.17435.2

7. Pileggi P., Verriet J., Broekhuijsen J., Leeuwen S., Wijbrandi W., Konsman M. A Digital Twin for Cyber-Physical Energy Systems. *7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Montreal, QC, Canada*. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/MSCPES.2019.8738792.

8. Bashirov M.G., Akchurin D.Sh., Kryshko K.A., Murtazina A.I. *Programmnoye obespecheniye virtual'nogo laboratornogo kompleksa v oblasti*

*avtomatizatsii promyshlennykh protsessov i proizvodstv* [Software for a Virtual Laboratory Complex in the Field of Automation of Industrial Processes and Production]. Certificate of Registration of a Computer Program No. 2023662950, 2023. [in Russian].

9. Bashirov M.G., Adel'guzhin R.R., Khafizov A.M., Akchurin D.Sh. *Programmnoye obespecheniye virtual'nogo laboratornogo stenda na osnove mikroprotsessornogo kontrollera oven plk-110-30 dlya izucheniya sistem upravleniya na baze nechetkoy logiki* [Software for a Virtual Laboratory Bench Based on the Microprocessor Controller Aries PLC-110-30 for Studying Control Systems Based on Fuzzy Logic]. Certificate of Registration of a Computer Program No. 2023662951, 2023. [in Russian].

10. Bashirov M.G., Prakhov I.V., Kislitsyn N.A., Akchurin D.Sh. *Uchebnyy imitatsionno-modeliruyushchiy kompleks na osnove programmnykh i tekhnicheskikh sredstv otechestvennoy kompanii Oven* [Educational Simulation and Modeling Complex Based on Software and Hardware of the Domestic Company Oven]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya — 2020», posvyashchennoy 75-letiyu Pobedy v Velikoy otechestvennoy voyne* [Materials of the International Scientific and Methodological Conference «Integration of Science and Education in Oil and Gas Universities — 2020». Dedicated to the 75th Anniversary of Victory in the Great Patriotic War]. 2020, pp. 191–194. EDN: HADUMI. [in Russian].

11. Kostikov I.I., Nikolayev K.G., Bashirov M.G., Prakhov I.V. *Sozdaniye virtual'noy modeli uchebnogo laboratornogo stenda na osnove sovremennogo otechestvennogo programmno-tekhnicheskogo kompleksa «BAZIS-100»* [Creation of a Virtual Model of a Training Laboratory Stand Based on the Modern Domestic Software and Hardware Complex «BASIS-100»]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya — 2020», posvyashchennoy 75-letiyu Pobedy v Velikoy*

*otechestvennoy voyne* [Materials of the International Scientific and Methodological Conference «Integration of Science and Education in Oil and Gas Universities — 2020». Dedicated to the 75th Anniversary of Victory in the Great Patriotic War]. 2020, pp. 234–236. EDN: FATYSX. [in Russian].

12. Kurbatov A. *Virtual'nyy inzhener pomozhet proyektirovat' energoob'yekty* [A Virtual Engineer Will Help Design Energy Facilities [Electronic Resource]]. URL: <https://inscience.news/ru/article/nti/9377> (data obrashcheniya: 12.10.2023). [in Russian].

13. Solominskiy A.V., Zhelezin V.A., Mirgorodskiy A.D., Krasnobayev S.V., Kolotilina N.M. *Vnedreniye iskusstvennogo intellekta v sredstva avtomatizatsii* [Implementation of Artificial Intelligence in Automation Tools]. *Vestnik nauki i obrazovaniya — Bulletin of Science and Education* [Electronic Resource], 2023. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-iskusstvennogo-intellekta-v-sredstva-avtomatizatsii>. [in Russian].

14. Savina N. V., Lisogurskiy I. A., Lisogurskaya L. N. *Primeneniye tekhnologiy aktivno-adaptivnykh setey dlya upravleniya kachestvom elektroenergii v elektricheskikh setyakh s tyagovoy nagruzkoj* [Application of Active-Adaptive Network Technologies for Power Quality Management in Electric Networks with Traction Load]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i ekonomicheskiye nauki — Bulletin of Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences*, 2021, No. 23, pp. 56–61. doi: 10.22250/jasu.93.12. [in Russian].

15. *GOST R 50571.5.52-2011. Elektroustanovki nizkovol'tnyye. Chast' 5-52. Vybor i montazh elektrooborudovaniya. Elektroprovodki* [State Standard 50571.5.52-2011. Low-voltage electrical installations. Part 5-52. Selection and Installation of Electrical Equipment — Wiring Systems]. Introduction Date 2013-01-01 / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 77 p. [in Russian].

16. *TensorFlow*. <https://www.tensorflow.org/?hl=ru>.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 28.11.2023.

The article was submitted 13.11.2023; approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 28.11.2023.

Научная статья

УДК 621.311.243

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-150-166.

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В СОСТАВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

*Александр Сергеевич Сорогин***Aleksandr S. Sorogin***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***Lidiya S. Ganicheva***магистрант кафедры «Прикладная информатика»,**Национальный исследовательский университет ИТМО, Москва, Россия*

### Актуальность

При эксплуатации солнечных панелей существуют различные способы заряда и разряда аккумуляторных батарей (АКБ). При использовании контроллеров заряда необходимо учесть дополнительную возможность выдачи электроэнергии от солнечных панелей, либо для использования в нагрузке, либо для передачи в сеть через двунаправленный ключ.

### Цель исследования

Анализ и нахождение наиболее эффективного и надежного способа заряда АКБ исходя из необходимого значения тока заряда и внешних условий, влияющих на выработку электроэнергии от солнечных модулей для изолированных энергосистем.

### Ключевые слова

контроллеры заряда, солнечные панели, солнечные модули, охлаждение солнечных панелей, изолированные потребители, эффективность солнечных панелей, выдача электроэнергии в сеть

**Методы исследования**

Проведение эксперимента по зарядке АКБ от фотоэлектрического модуля с использованием модуля Atmega 8.

**Результаты**

В ходе анализа существующих контроллеров заряда и разряда было выявлено, что контроллер заряда на базе микроконтроллера Atmega 8 является наиболее быстродействующим и энергоэффективным для управления режимом заряда, получаемого от солнечных модулей. Данный микроконтроллер позволил равномерно распределить заряд между АКБ для питания микроконтроллера и АКБ для питания нагрузки с возможностью выдачи в сеть избыточной электроэнергии.

Выполненные исследования в дальнейшем будут актуальны при проектировании и создании автоматизированной системы охлаждения солнечных панелей. Данное исследование является актуальным, поскольку показана эффективность работы данной системы управления в ходе экспериментальных исследований, проведенных на нагретых панелях, расположенных на солнечной электростанции в с. Карьерное (п-в Крым).

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»), код темы: FENG-2023-0001).

**Для цитирования:** Сорогин А. С., Хамитов Р. Н., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С. Система управления режимом заряда и разряда аккумуляторной батареи в составе фотоэлектрической станции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 4. Т. 19. С. 150-166. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-150-166>.

Original article

## BATTERY CHARGE AND DISCHARGE MODE CONTROL SYSTEM AS PART OF A PHOTOVOLTAIC PLANT

**Relevance**

When using solar panels, there are various ways to charge and discharge batteries. When using charge controllers, it is necessary to take into account the additional possibility of issuing electricity from solar panels either for use in the load or for transmission to the network via a 2-directional switch.

**Aim of research**

Analysis and finding the most efficient and reliable way to charge the battery based on the required value of the charge current, and external conditions affecting the generation of electricity from solar modules for isolated power systems.

**Research methods**

Conducting an experiment on charging a battery from a photovoltaic module using the Atmega 8 module.

**Results**

During the analysis of existing charge and discharge controllers, it was revealed that the charge controller based on the Atmega 8 microcontroller is the fastest and most energy efficient for controlling the charge mode received from solar modules. This microcontroller made it possible to evenly distribute the charge between the battery for powering the microcontroller and the battery for powering the load, and the possible output of excess electricity to the network.

**Keywords**

charge controllers, solar panels, solar modules, cooling of solar panels, isolated consumers, efficiency of solar panels, electricity supply to the grid



The research carried out in the future will be relevant in the design and creation of an automated solar panel cooling system. This study is relevant because it shows the effectiveness of this control system in the course of experimental studies conducted on heated panels located at the Solar Power Plant in Kar'yernoje village (Crimea).

**Acknowledgments:** The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic «Predictive Control of Energy Flows of Electricity-Generating Complexes of the Arctic and the Far North, with Stochastic Patterns of Consumption and Generation of Electrical Energy: Theory, Synthesis, Experiment», Topic Code: FENG-2023-0001).

**For citation:** Sorogin A. S., Khamitov R. N., Zherebtsov S. N., Ganicheva L. S. Sistema upravleniya rezhimom zaryada i razryada akkumulyatornoy batarei v sostave fotoelektricheskoy stantsii [Battery Charge and Discharge Mode Control System as Part of a Photovoltaic Plant]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4, Vol. 19, pp. 150-166 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-4-150-166>.

## Введение

На сегодняшний день существует два типа контроллеров заряда: ШИМ и МРРТ.

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) — это метод, используемый для управления выходной мощностью устройства без изменения уровня напряжения. Данный метод управления выходной мощностью предполагает быстрое включение и выключение устройства с фиксированной частотой, при этом длительность периодов включения и выключения регулируется для достижения желаемой выходной мощности [1, 2].

Устройства с ШИМ широко используются в таких устройствах, как управление скоростью вращения двигателя, регулировка яркости светодиодов и преобразователи мощности. Регулируя рабочий цикл ШИМ-сигнала, можно управлять средней мощностью, подаваемой на устройство, что позволяет точно контролировать выходной сигнал.

Устройства ШИМ реализуются с помощью микроконтроллеров цифровых сигнальных процессоров или специальных ШИМ-контроллеров. Эти устройства генерируют сигнал квадратной волны с фиксированной частотой и регулируемым рабочим циклом. Затем сигнал ШИМ используется для управления мощностью, подаваемой на управляемое устройство.

В целом, ШИМ обеспечивает гибкий и эффективный метод управления выходной мощностью устройства без изменения уровня напряжения [3–5]. Он широко используется в различных приложениях, где требуется точное управление выходной мощностью.

### Преимущества ШИМ [6]:

- а) высокая экономичность преобразования за счет снижения тепловых потерь;
- б) повышение надежности устройства и продление сроков его эксплуатации;
- в) работа в автоматическом режиме исключает необходимость в дополнительных настройках в период работы;
- г) наличие систем защиты от перегрева, короткого замыкания, перегрузки, перезаряда и обратного тока.

### Недостатки ШИМ:

- а) ограниченное использование, используются для модулей от 100 Вт до 2,5 кВт;
- б) импульсные помехи и сложные схемные решения, приводящие к затруднениям при ремонте;
- в) устройство не настроено на возможность выдачи электроэнергии в сеть, либо на нагрузку.

МРРТ (сокр. от англ. Maximum Power Point Tracking) — это способ получения максимально возможной мощности устройства на выходе фотоэлектрического модуля с помощью слежения за

точкой максимальной мощности [1]. Контроллер заряда солнечной батареи на основе МРРТ является более сложным устройством по сравнению с ШИМ-контроллером. Он требует большего количества узлов и компонентов из-за необходимости дополнительных ресурсов, для эффективного выполнения его алгоритмов. Основной функцией этого устройства является определение максимальной выходной мощности солнечных панелей в текущих условиях и соответствующая регулировка их работы.

Контроллер определяет точку максимальной мощности, которая указывает напряжение с максимальной выходной мощностью. Обычно используется метод «Perturb and Observe», т.е. проводится периодическое полное сканирование всей вольт-амперной характеристики солнечной батареи (обычно 1 раз в 2 ч), находится точка максимальной мощности, и до следующего полного сканирования контроллер ищет и вычисляет колебания мощности солнечной батареи, и сдвигает рабочую точку на новое напряжение, если при нем мощность больше. Его недостатком считается постоянная необходимость проводить измерения, во время которых генерация энергии от панелей прерывается. Различные производители подбирают параметры поиска: глубину и частоту итераций, периодичность полного сканирования, чтобы наиболее оптимально отслеживать точку максимальной мощности солнечной батареи и получать оптимальное количество энергии от Солнца [7].

Далее процесс зарядки аккумуляторной батареи (АКБ) состоит из четырех этапов:

*Массовая зарядка.* Начальный этап после периода отсутствия солнечного света. Аккумуляторы активно накапливают энергию, используя полную емкость солнечных элементов.

*Абсорбционная зарядка.* При полной зарядке АКБ напряжение заряда снижается, чтобы предотвратить перегрев и газообразование. Обычно этот этап длится от 1 до 3 ч перед переходом к следующему этапу.

*Плавающая зарядка.* Данный этап необходим для поддержки уровня заряда на максимальном уровне с предотвращением перегрева, газообразования и снижения накопления энергии. Если нагрузка требует увеличения выходной мощности, контроллер переключается из плавающего режима в режим усиления. Когда выходная мощность снижается, контроллер снова включает плавающий режим.

*Уравнительная зарядка.* Данный этап выравнивает плотность электролита, восстанавливает электроды и утилизирует сульфат свинца [8].

На работу МРРТ-контроллеров влияет температура окружающей среды. В жаркую погоду свыше нагрева солнечной панели, свыше 25 °С производство энергии снижается. Поскольку основная причина уменьшения выдаваемой мощности при нагреве фотоэлектрического модуля (ФЭМ) заключена в физических основах полупроводника. У полупроводников с повышением температуры происходит усиление колебаний атомов относительно положения равновесия и расширения решетки [3]. Для решения этой проблемы встроенный датчик температуры постоянно отслеживает условия и соответствующим образом регулирует режим работы [8].

*Преимущества МРРТ контроллера* [1, 3–5]:

- а) исключение потерь в процессе заряда АКБ;
- б) повышение эффективности работы солнечных панелей;
- в) эффективное накопление заряда в пасмурную и облачную погоду;
- г) возможность использования высокого входного напряжения;

- д) возможность применения кабелей с меньшим сечением;
- е) возможность расположения на значительном удалении от источника энергии;
- ж) продление срока эксплуатации АКБ.

*Недостатки МРРТ контроллера:*

- а) рассчитаны на меньшую мощность в сравнении с ШИМ;
- б) дороговизна в сравнении с ШИМ (стоимость МРРТ-контроллера для солнечного модуля на 10 А составляет 8514 руб. [9], а стоимость ШИМ инвертора для такого же модуля будет составлять 1592 руб. [10]);
- в) не настроены на возможность выдачи электроэнергии в сеть либо на нагрузку.

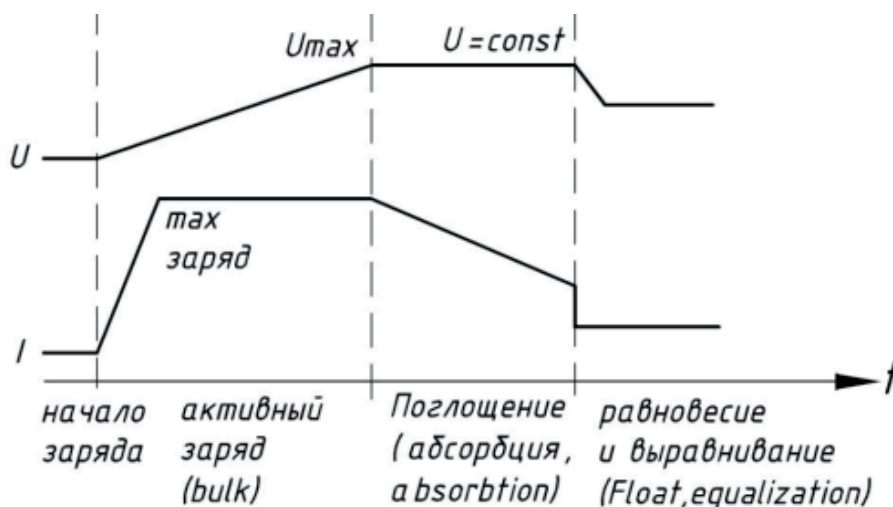
Исходя из оценки способов заряда АКБ [11] можно сделать вывод, что данные устройства имеют ряд преимуществ, и в зависимости от необходимой задачи и внешних условий устанавливаются на ту или иную электростанцию. Последнее время контроллеры заряда устанавливаются в блок с инверторами для параллельной зарядки АКБ и преобразования в переменный ток. В связи с этим предлагается использовать устройство, позволяющее не только заряжать и дозаряжать АКБ, но и выдавать электроэнер-

гию либо на инвертор в нагрузку, либо для выдачи в сеть с учетом всех необходимых параметров.

Современные контроллеры заряда/разряда (КЗР) обеспечивают при работе несколько стадий заряда АКБ (рисунок 1) [11, 12]:

1. Фаза активного заряда (Bulk). Ток от солнечной батареи полностью идет для заряда АКБ;
2. Когда АКБ заряжается до определенного напряжения, наступает стадия поглощения или абсорбции (Absorption): КЗР начинает снижать ток заряда АКБ, чтобы не перегреть и не начать газообразование в АКБ;
3. Затем напряжение выравнивается, и наступает стадия поддержания заряда малым током или равновесие (Float);
4. После стадии равновесия наступает стадия уравнивающего заряда или выравнивание (equalization).

Уравнивающий заряд — заряд АКБ методом контролируемой перезарядки. В данном методе предусмотрено перемешивание электролита и восстановление неиспользуемых зон материала пластин, что полностью способно восстановить емкость АКБ. Данная стадия сопровождается газовыделением водорода и кислорода [13].



**Рисунок 1.** Режимы заряда-разряда АКБ с помощью контроллера [6]

**Figure 1.** Battery charge-discharge modes using the controller [6]

### Контроллер заряда на базе микропроцессора Atmega 8

В качестве способа для зарядки АКБ и выдачи электроэнергии в сеть предлагается использование микропроцессора на базе Atmega 8 [14]. Данный микроконтроллер анализирует множество показателей одновременно, и за счет этого может эффективно управлять процессом зарядки аккумулятора и принимать решение, когда нужно дозарядить аккумулятор, когда его нужно использовать, и когда его использовать как дополнение к энергии, получаемой при помощи солнечной панели. Параметры микроконтроллера отражены в таблице 1 [14].

**Таблица 1.** Параметры микроконтроллера Atmega 8 [14]

**Table 1.** Parameters of the Atmega 8 microcontroller [14]

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| Объем flash-памяти             | 8 Кбайт        |
| Тактовая частота               | 16 МГц         |
| Напряжение питания             | 4,5–5,5 В      |
| Количество портов ввода-вывода | 23             |
| Рабочая температура            | –40 ... +85 °С |
| Встроенные интерфейсы          | i2c, spi, uart |

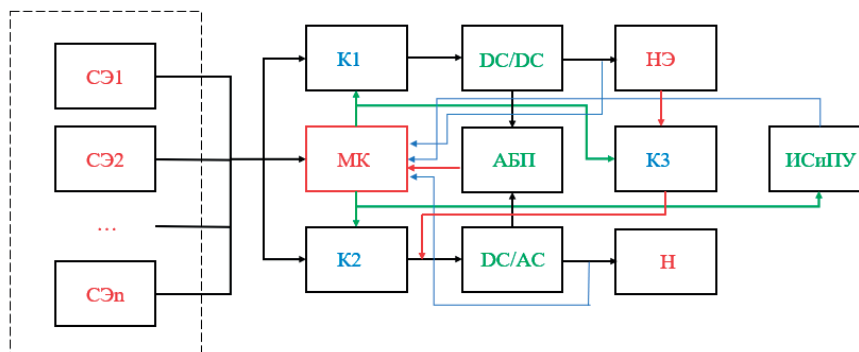
Данный микроконтроллер имеет 3 порта вывода-ввода. Существуют полные и неполные порты. У полного порта 8 бит и такое же количество одноимен-

ных выводов. Неполный порт имеет менее 8 бит, а следовательно, число выводов у него также меньше 8. Пронумерованные выходы дают возможность запрограммировать данный контроллер под наши нужды. С их помощью микроконтроллер связывается с остальными модулями, подавая им нужные сигналы и принимая сигналы от них [14].

Функциональная схема при подключении микроконтроллера в качестве устройства заряда представлена на рисунке 2.

Описание функциональной схемы:

- СЭ(1÷n) — солнечные панели (при последовательном соединении происходит наращивание по напряжению, при параллельном — по току);
- МК — микроконтроллер, управляющий работой СЭ;
- К1 — ключ, коммутирующий цепь «заряд НЭ»;
- К2 — ключ, коммутирующий цепь «СЭ — нагрузка»;
- НЭ — накопитель энергии (АКБ, гравитационный накопитель, тепловой накопитель, сеть централизованного электроснабжения);
- К3 — ключ, коммутирующий цепь «питание Н исключительно от НЭ» (при условии, когда СЭ не в состоянии обеспечить мощность нагрузки);
- DC/DC — преобразователь «напряжение СЭ — напряжение НЭ»;



**Рисунок 2.** Функциональная схема контроллера заряда на базе Atmega 8 [14]

**Figure 2.** Functional diagram of the charge controller based on Atmega 8 [14]

- DC/AC — преобразователь «напряжение СЭ — напряжение Н» (380/220 В, 50 Гц);

- АБП — автономный блок питания для функционирования МК;

- ИПиПУ — индикаторная панель и пульт управления солнечной электростанцией.

DC/DC преобразователь регулирует напряжение и ток, которые подаются от солнечных панелей для зарядки аккумуляторов.

Рассмотрим несколько возможных вариантов того, как контроллер взаимодействует с солнечными панелями и аккумуляторами.

Если на улице недостаточно света для того, чтобы солнечная электростанция смогла выработать столько электроэнергии, сколько требуется, то микроконтроллер замыкает К2 и К3. Таким образом, нехватка энергии, получаемой солнечной панелью, компенсируется аккумулятором.

Если же на улице солнечная погода или нет высокой потребности в электроэнергии, то микроконтроллер использует К1 и К2. В данном режиме часть энергии от солнечных панелей идет на нагрузку, а часть уходит на заряд аккумуляторов.

Когда на улице недостаточно света для выработки электроэнергии, используются только аккумуляторы, но только до тех пор, пока они не разрядятся до допустимых значений, поскольку если до конца разрядить аккумулятор, то снизится срок его эксплуатации.

Если батарея активно используется долгое время и начинает разряжаться, то контроллер не даст полностью разрядить батарею, даже если нет выработки электроэнергии на солнечных панелях. В таком случае будет использоваться общая электросеть.

Микроконтроллер может задействовать на нем режим быстрой зарядки, если это необходимо.

DC/AC преобразователь нужен для того, чтобы преобразовывать постоянный ток от солнечных панелей и аккумуляторов в переменный, который повсеместно используется в домашних электросетях. Он может подстраиваться под потребление электроэнергии и регулировать выдаваемую частоту и напряжение тока. Также инвертор имеет защиту от коротких замыканий и перегрузки, тем самым обеспечивая надежность и безопасность работы солнечной электростанции.

Автономный блок питания обеспечивает постоянное питание микроконтроллера в контроллере заряда. Он будет работать даже при отсутствии питания от солнечных панелей и аккумуляторов. По сути, это просто еще один аккумулятор, который обеспечивает питанием только микроконтроллер и имеет запас емкости, позволяющий работать микроконтроллеру довольно продолжительное время в случае отсутствия питания от солнечных панелей и аккумуляторов [13].

Индикаторная панель — устройство, которое показывает состояние солнечной электростанции в данный момент времени, выводя на экран такие параметры, как заряд аккумуляторов, мощность, выдаваемую солнечными панелями, и т.п. В определенных случаях мы должны иметь возможность управлять солнечной электростанцией вручную, например, принудительно разомкнуть К1 и К3 для того, чтобы обслужить или заменить батарею, индикаторная панель даёт нам такую возможность.

### Описание принципиальной схемы

В ней установлены разъемы Х1–Х5, Х1–Х4 — выводы, куда поступает информация о напряжении (ЭС, АБ, Н) и токе этих же элементов [14].

*Разъём Х1.* К данному разъёму подключена индикаторная панель, через которую информация о состоянии системы выводится на пульт. Контроллер

получает команды, если необходимо вручную управлять электростанцией.

*Разъём X3.* К данному разъёму подключена солнечная батарея. На 5 и 6 контакт подходит напряжение, а на 3 и 4 контакт — ток от фотоэлектрического модуля. Данная информация необходима для нахождения точки максимальной мощности для аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [14].

*Разъём X4.* К данному разъёму подключены аккумуляторные батареи. На 6 и 5 контакты поступает напряжение батарей, а на 4 и 3 — ток. Это нужно для того, чтобы можно было отслеживать состояние батарей (температуру, заряд и т.д.).

*Разъём X5.* На данный разъём приходит напряжение нагрузки. Информация о нём нужна для того, чтобы контроллер считывал необходимую потребность в выработке электроэнергии на данный момент.

Напряжение подается через резистивный делитель исходя из параметров СЭ и АБ. Сигналы напряжения и тока подаются на входы аналоговых коммутаторов (VD1, VD2) [15].

Микроконтроллер Atmega 8 задает коммутацию на каналы шины адреса с выводов (МК 17, 15), выбор напряжения или ток задается установкой 0 на выводах 13, 14 МК. Параметры напряжения и токов измеряются АЦП по очереди коммутацией выводов МК 13 и 14 (напряжение или ток), 15 и 17 (напряжение или ток определенного элемента СЭ). Микроконтроллер осуществляет быстрое переключение между измерениями каждого параметра по отдельности [14].

Обработав всю информацию, микроконтроллер через разъём X5 управляет ключами К1–К3, на схеме, отображенной на рисунке 2, они указаны квадратами (функционально) блоки Н (нагрузка), АБ (аккумуляторная батарея), DC/AC (преобразователь напряже-

ния «постоянное — переменное» и DC/DC — «постоянное — постоянное»). Алгоритм управления ключами и показатели, на которые микроконтроллер обращает внимание при выборе нужных ключей, подробно расписан в описании схемы. Одновременно активированы могут быть несколько ключей, либо если нет потребности, то микроконтроллер не активирует ни одного из ключей (рисунок 3) [14].

Ключ К1 отвечает за передачу энергии сразу на нагрузку, К2 за зарядку аккумуляторов, а К3 за передачу энергии от аккумуляторов на нагрузку.

### **Использование контроллера заряда на базе Atmega 8 в экспериментальной установке по охлаждению солнечных панелей**

Контроллер заряда Atmega 8 был протестирован на базе экспериментальной установки по охлаждению солнечных модулей [17–20]. Установка состояла из фотоэлектрических модулей серии ЖКМ-230 [21, 22], контура охлаждения, АКБ 12 В, насоса Water Pump 12 В, микроконтроллера для управления насосом, микроконтроллера для управления зарядом, устройствами для измерения МРРТ характеристик. На рисунке 4 представлена фотография установки. В таблице 2 приведены паспортные характеристики АКБ [23], в таблице 3 паспортные характеристики насоса [24] и в таблице 4 паспортные характеристики фотоэлектрического модуля [21].

Измерения проводились 26.07.2023, 27.07.2023 и 01.08.2023 на полуострове Крым с. Карьерное (координаты солнечной электростанции 45.288909 с.ш., 33.598224 в.д.) на предприятии ООО «Сигма». Угол расположения солнечных модулей 25°. Нагрузка насоса была постоянной 12 Вт, жидкость для циркуляции не изменялась (в эксперименте использовалась вода). Эксперимент был

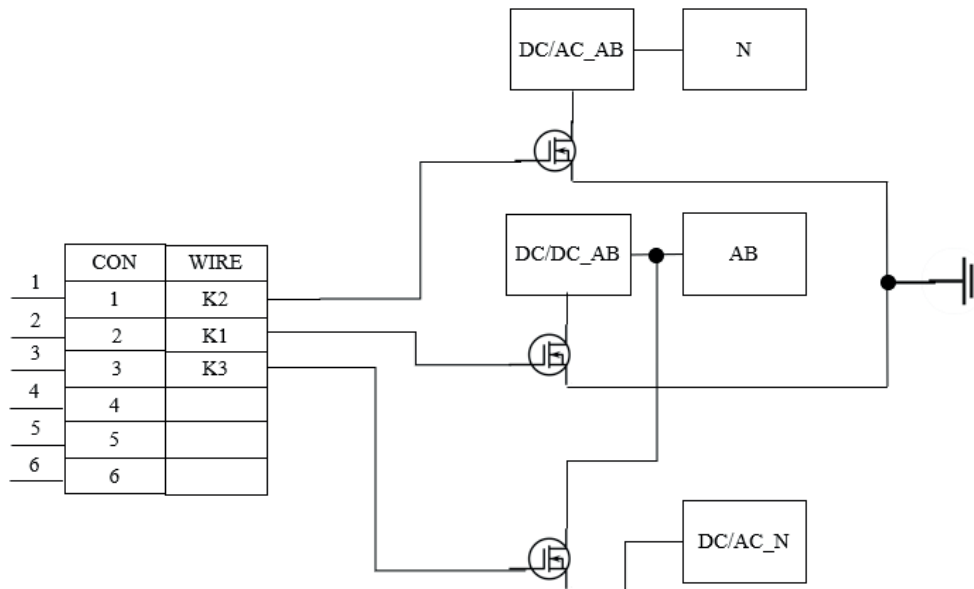


Рисунок 3. Схема подключения ключей [16]

Figure 3. Key connection diagram [16]



Рисунок 4. Лабораторный макет для проведения экспериментов по охлаждению солнечных панелей

Figure 4. Laboratory layout for conducting experiments on cooling solar panels

Таблица 2. Паспортные характеристики АКБ Vatrex 20 HR [23]

Table 2. Passport characteristics of the Vatrex 20 HR battery [23]

| Характеристики | Параметры          |
|----------------|--------------------|
| Модель         | Vatrex 20 HR       |
| Напряжение     | 12 В               |
| Емкость        | 17 Ач              |
| Материал       | свинцово-кислотный |
| Тип АКБ        | стационарный       |
| Вес            | 6 кг               |

проведен с зарядом АКБ для питания микропроцессора и с зарядом АКБ для питания насоса.

Температура окружающей среды на момент измерений колебалась в пределах 29–33 °С. Солнечные панели были установлены перпендикулярно солнцу под углом 25°. Эксперимент проводился с 10:00 до 16:30 каждые 600 с по Московскому времени 26.07.2023 г. сбор данных осуществлялся с 11:45 до 13:50 по Московскому времени. Солнечная радиация изменялась с течением времени в зависимости от интенсивности солнечного излучения и угла падения

солнечных лучей. Прибор для измерения солнечной радиации TES 1333 изображен на рисунке 5 [25], солнечная радиация измерялась в Вт/м<sup>2</sup> на квадратный метр.

Измеренные данные представлены в таблице 5, где  $T$  — время измерений,  $U_M$  — напряжение солнечной панели и  $I_M$  — ток солнечной панели,  $U_C$  — напряжение емкостного накопителя электроэнергии,  $I_z$  — ток заряда,  $P_{нас}$  — потребляемая мощность насоса. В эксперименте сравнивались 5 солнечных панелей серии ЖКМ230Р [21] с различными способами охлаждения [26], для заряда АКБ исполь-

**Таблица 3.** Характеристики насоса Mini water pump DC 12 В [24]

**Table 3.** Characteristics of the Mini water pump DC 12V [24]

| Характеристики            | Параметры         |
|---------------------------|-------------------|
| Модель                    | AW500S            |
| Материал                  | АБС-Пластик       |
| Вход/выход шланга         | 4 мм              |
| Напряжение                | 12 В (постоянное) |
| Мощность                  | 19 Вт             |
| Номинальный ток           | 920 мА            |
| Расход                    | 800 л/ч           |
| Максимальный подъем воды  | 5 м               |
| Температура рабочей среды | 0–60 °С           |
| Шум                       | 35 дБА (вода)     |
| Режим привода             | электромагнитный  |
| Вес                       | 210 г             |

**Таблица 4.** Характеристики фотоэлектрического модуля ЖКМ-230-Р60 [21]

**Table 4.** Characteristics of the ЖКМ-230-Р60 photovoltaic module [21]

| Характеристики   | Параметры          |
|--|--------------------|
| Максимальная мощность при STC, $P_{max}$                                   | 230 Вт             |
| Максимальное напряжение, $V$   | 27,9 В             |
| Максимальный ток, $I$  | 8,23 А             |
| Напряжение холостого хода, $V_{oc}$  | 35 В               |
| Ток короткого замыкания, $I_{sc}$  | 9,01 А             |
| Максимальное напряжение в системе DC, $V$                                  | 1000 В             |
| Габариты   | 1650 × 992 × 40 мм |
| Максимальный ток последовательного устройства защиты от перегрузки по току | 15 А               |





**Рисунок 5.** Прибор TES 1333 для измерения солнечной радиации [25]

**Figure 5.** TES 1333 device for measuring solar radiation [25]

зовалась наиболее эффективная солнечная панель. Перед началом эксперимента основной АКБ был разряжен до 30 %. Ток заряда для АКБ составлял 20 % от емкости АКБ [13]. Напряжение и ток максимальной мощности были получены с помощью устройств для измерения, разработанных Севастопольским государственным университетом, на вольтамперную характеристику (пример которой представлен на рисунке 6).

Номинальный ток заряда  $I_3$  рассчитывался контроллером исходя из емкости АКБ согласно соотношению [13]:

$$I_n = 0,2C_n, \quad (1)$$

где  $I_n$  — номинальный ток заряда, А;  
 $C_n$  — емкость АКБ, А·ч.

Напряжение заряда АКБ определяется по формуле [13]:

$$U_{AKB} = U_{акк} \cdot N, \quad (2)$$

где  $U_{AKB}$  — напряжение заряда батареи;  
 $U_{акк}$  — среднее напряжение заряда отдельного аккумулятора;

$N$  — количество аккумуляторов в батарее.

Микропроцессор Atmega 8 осуществлял зарядку АКБ в течение 2 ч. Затем ключи К1 и К2 после зарядки АКБ с 30 % до 60 % переключились на зарядку АКБ для питания микропроцессора. Параллельно с зарядкой АКБ для измерения характеристик заряда/разряда АКБ был включен режим выдачи энергии на насос для охлаждения [19, 20]. Данные измерений представлены в таблице 6. Потребление насоса в начале эксперимента изменялось в виду «завоздушенности» системы, но затем находилось в постоянном значении [24].

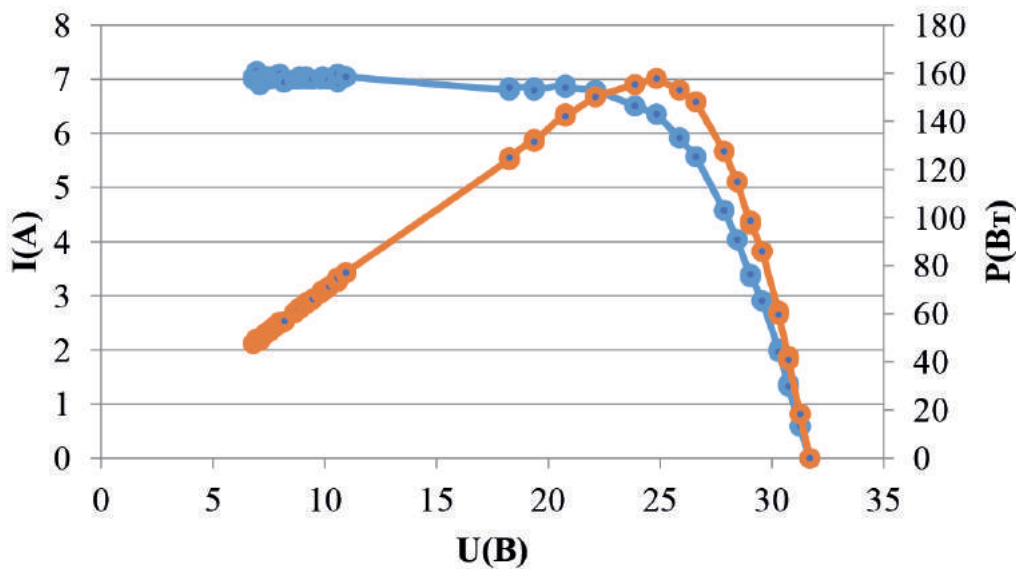
После сбора данных о генерации электроэнергии были получены данные о разряде АКБ. Переключение режима микроконтроллера в режим выдачи электроэнергии с АКБ. Заряд АКБ снизился с 60 % до 50 % значения от емкости АКБ, в качестве нагрузки также использовался насос. В таблице 7 приведена зависимость процента заряда АКБ 12 В от напряжения на его клеммах [13].

По данным тока заряда и разряда и напряжению на АКБ были составлены диаграммы, изображенные на рисунке 7.

**Таблица 5.** Измерение экспериментальных показателей заряда АКБ

**Table 5.** Measurement of experimental battery charge indicators

| T                     | 11:50 | 12:00 | 12:10 | 12:20 | 12:30 | 12:40 | 13:00 | 13:10 | 13:40 | 13:50 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E, \text{ Вт/м}^2$   | 770   | 830   | 850   | 870   | 890   | 890   | 900   | 900   | 900   | 900   |
| $I_m, \text{ А}$      | 6,36  | 6,26  | 6,36  | 6,36  | 5,96  | 5,92  | 6,01  | 6,01  | 5,92  | 6,01  |
| $U_m, \text{ В}$      | 24,8  | 24,76 | 24,9  | 24,9  | 25,8  | 25,8  | 26,1  | 26,2  | 26    | 26,1  |
| $I_3, \text{ А}$      | 1,27  | 1,25  | 1,27  | 1,27  | 1,19  | 1,18  | 1,20  | 1,20  | 1,18  | 1,2   |
| $U_{cl}, \text{ В}$   | 11,7  | 11,7  | 11,8  | 11,9  | 11,9  | 12    | 12,1  | 12,1  | 12,2  | 12,2  |
| $P_{нас}, \text{ Вт}$ | 11,5  | 11,5  | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    |



**Рисунок 6.** Вольт-амперная характеристика, полученная в 11:45 с помощью прибора СевГУ для 4-й солнечной панели с наиболее эффективным охлаждением

**Figure 6.** Volt ampere characteristic obtained at 11:45 using the Segu device for 4th solar panels with the most efficient cooling

**Таблица 6.** Измерение экспериментальных показателей разряда АКБ

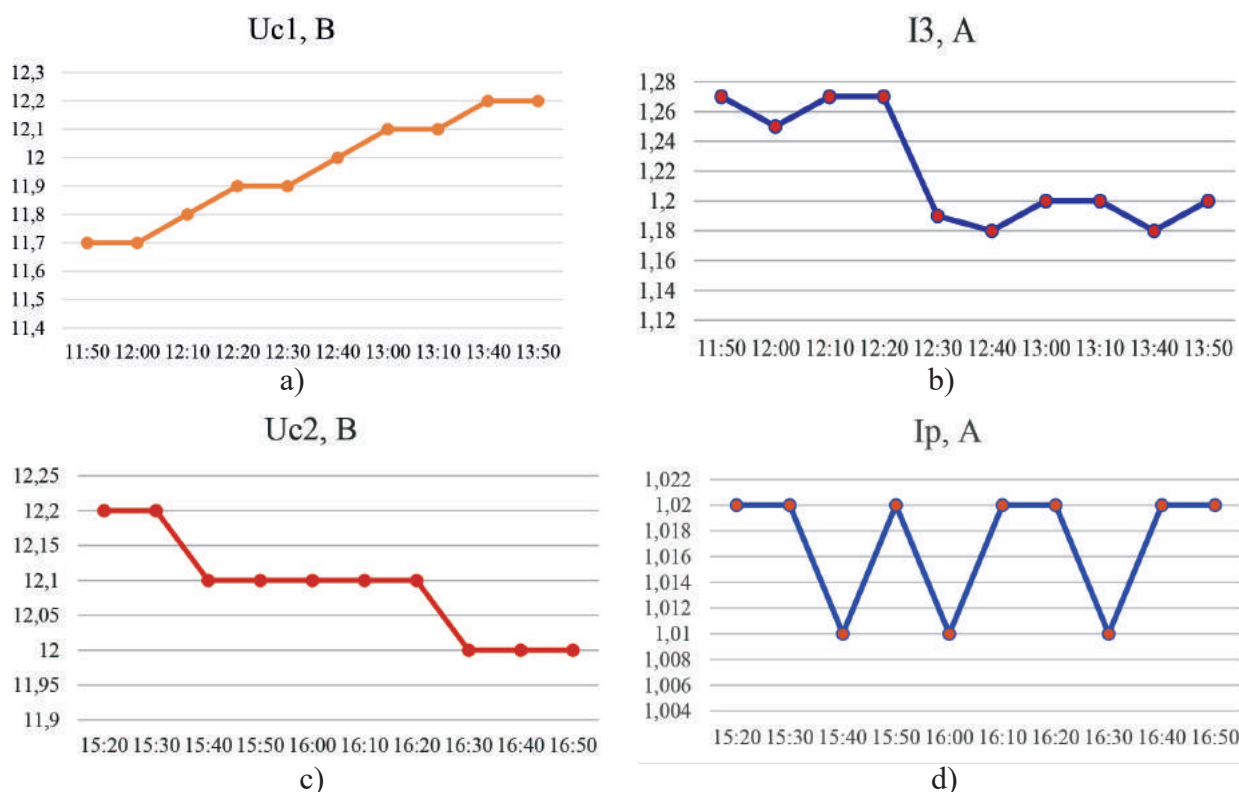
**Table 6.** Measurement of experimental indicators of battery discharge

| Т             | 15:20 | 15:30 | 15:40 | 15:50 | 16:00 | 16:10 | 16:20 | 16:30 | 16:40 | 16:50 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_p, A$      | 1,02  | 1,02  | 1,01  | 1,02  | 1,01  | 1,02  | 1,02  | 1,01  | 1,02  | 1,02  |
| $U_{с2}, B$   | 12,2  | 12,2  | 12,1  | 12,1  | 12,1  | 12,1  | 12,1  | 12    | 12    | 12    |
| $P_{нас}, Вт$ | 11,5  | 11,5  | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    |

**Таблица 7.** Зависимость процента заряда АКБ 12 В от напряжения на его клеммах при температуре 20–25 °С [13, 27]

**Table 7.** Dependence of the percentage of charge of a 12 V battery on the voltage at its terminals at a temperature of 20–25 °С [13, 27]

| Заряд батареи, % | Напряжение без нагрузки, В | Плотность электролита, г/см <sup>3</sup> |
|------------------|----------------------------|--|
| 100              | 12,7                       | 1,27                                     |
| 90               | 12,5                       | 1,26                                     |
| 80               | 12,4                       | 1,24                                     |
| 70               | 12,3                       | 1,22                                     |
| 60               | 12,2                       | 1,20                                     |
| 50               | 12,0                       | 1,17                                     |
| 40               | 11,9                       | 1,15                                     |
| 30               | 11,7                       | 1,12                                     |
| 20               | 11,5                       | 1,10                                     |
| 10               | 11,3                       | 1,07                                     |
| 0                | 10,5                       | 1,06                                     |



**Рисунок 7.** Напряжение и ток заряда и разряда АКБ при зарядке с помощью МК Atmega 8: напряжение на АКБ при заряде (а), ток заряда (б), напряжение АКБ при разряде (с), ток разряда (д)

**Figure 7.** Voltage and current of charge and discharge of the battery when charging with МК Atmega 8: battery voltage at charge (a), charge current (b), battery voltage at discharge (c), discharge current (d)

На контроллере было осуществлено несколько режимов, о которых было сказано выше. В первом случае во время измерений при солнечной радиации до  $800 \text{ Вт/м}^2$  нагрузка в виде насоса [24] для охлаждения солнечной панели получала электроэнергию от АКБ, ключи К2 и К3 были замкнуты. Во втором случае установилась солнечная погода (свыше  $800 \text{ Вт/м}^2$ ), нагрузка у насоса после заполнения системы уменьшилась. Микроконтроллер замкнул ключи К1 и К2 для использования электроэнергии на постоянной нагрузке и части электроэнергии для зарядки АКБ. В случае, когда солнечная радиация снижалась и стала меньше  $800 \text{ Вт/м}^2$ , система под управлением Atmega 8 не позволила разрядить АКБ ниже 30 %, в данном случае при имеющейся общей сети через инвертор

будет подан заряд для дополнительного накопления заряда. Данная процедура будет необходима в случае, когда энергии от солнца было недостаточно для полной зарядки АКБ и обеспечения достаточной мощности для нагрузки, которая будет зависеть от объема необходимой мощности потребителя [13].

Исходя из графика заряда АКБ (рисунок 7) можно сделать вывод, что модуль заряда батареи выполняет свои функции и обеспечивает зарядом не только систему питания для насоса, но и систему микропроцессора для управления сигналами на заряд АКБ и выдачу в сеть избыточной электроэнергии.

## Выводы

1. Предложена надежная и эффективная система для зарядки АКБ на базе

Atmega 8. Данная система позволила не только регулировать ток заряда, исходя из напряжения и тока, выдаваемого солнечной панелью, но и переключать ключи для заряда АКБ микропроцессора и для питания нагрузки от АКБ (насоса) для обеспечения дополнительной надежности.

2. Данная система может найти широкое применение для изолированных

энергосистем [28], которые используют электроэнергию напрямую от АКБ, заряженных от фотоэлектрических модулей. Система управления зарядом на базе Atmega 8 обеспечила в полной мере работу насоса, который использовался в качестве нагрузки и обеспечил дополнительный теплоотвод и охлаждение фотоэлектрического модуля.

### Список источников

1. Дорошин А.Н., Виссарионов В.И., Малинин Н.К. Многофакторный анализ эффективности энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии для энергообеспечения автономного потребителя // Вестник МЭИ. 2011. № 2. С. 45–53. EDN: NTZARP.

2. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технология. М.: ВИЭСХ, 2005. 263 с. ISBN: 5-85941-030-1. EDN: QMIOBD.

3. Nehari T., Benlakam M., Nehari D. Effect of the Fins Length for the Passive Cooling of the Photovoltaic Panels // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2016. No. 60(2). P. 89–95. doi: 10.3311/PPme.8571.

4. Качество солнечных панелей: [сайт]. URL: <https://www.alter7.ru/stat/solar-batareya.html> (дата обращения: 12.05.2023).

5. Тремясов В.А., Кенден К.В. Дизель-солнечные установки для электроснабжения отдаленных районов Республики Тыва // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. Седьмой всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием: тр. Амурского государственного университета. Амур, 2013. С. 282–286. EDN: SAJRZF.

6. Что выбрать PWM (ШИМ) или MPPT контроллер? [Электронный ресурс]. URL: <https://reenergo.ru/blog/chto-vybrat-pwm-shim-ili-mppt-kontroller/> (дата обращения: 22.08.2023).

7. Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций // Вестник Чувашского университета. 2023. № 3. С. 222–230. EDN: RUBSRL.

8. Виссарионов В.И., Кацай В.И., Дорошин А.Н., Дорошина А.В. Методика расчета энергетического комплекса для тепло- и электроснабжения автономного потребителя на базе возобновляемых источников энергии // Эффективное антикризисное управление. 2012. № 2 (71). С. 82–92. EDN: OXDZJZ.

9. Контроллер заряда солнечной панели / батареи Epever Tracer MPPT 1210A: [сайт]. URL: [https://www.ozon.ru/product/kontroller-zaryada-solnechnoy-paneli-batarei-epever-tracer-mppt-1210a-528350988/?advert=Ax038WzItc8RrMWwqy05uWF8A7KJdsST\\_woWUlXU9GhvcCvUyju6klMFZdizGD2yum28jBoOXDVTcmYRLO22FzfHyXyAGyyMn\\_63LF\\_RZPoglw7cK\\_3ctZdl870mNM8MnuYFqwk62vz6p-USbZY-aqySScbEhgX-EvIV49SgvKx3\\_meVW3vtP8g6EelVrrG4GCDKvYGdheCcentR8FW4rQqMQNZdsLIhXv0KtCObtCi7Mwxel0N-a7pHp39QkwuhOI1vW9FaOVIwGQ5eLq4yYqqaOPktSRhjEkt3V5jK1nsLKCNOhI0zmNfzPW3E5los\\_ujPchMxZ\\_SJCC&avtc=1&avte=2&avts=1697621537&keywords=mppt+контроллер+заряда+солнечной+батареи#section-description--offset-140](https://www.ozon.ru/product/kontroller-zaryada-solnechnoy-paneli-batarei-epever-tracer-mppt-1210a-528350988/?advert=Ax038WzItc8RrMWwqy05uWF8A7KJdsST_woWUlXU9GhvcCvUyju6klMFZdizGD2yum28jBoOXDVTcmYRLO22FzfHyXyAGyyMn_63LF_RZPoglw7cK_3ctZdl870mNM8MnuYFqwk62vz6p-USbZY-aqySScbEhgX-EvIV49SgvKx3_meVW3vtP8g6EelVrrG4GCDKvYGdheCcentR8FW4rQqMQNZdsLIhXv0KtCObtCi7Mwxel0N-a7pHp39QkwuhOI1vW9FaOVIwGQ5eLq4yYqqaOPktSRhjEkt3V5jK1nsLKCNOhI0zmNfzPW3E5los_ujPchMxZ_SJCC&avtc=1&avte=2&avts=1697621537&keywords=mppt+контроллер+заряда+солнечной+батареи#section-description--offset-140) (дата обращения: 12.05.2023).

10. PWM контроллер заряда для солнечных панелей Smart Watt Delta PWM 2410 10A 12/24В: [сайт]. URL: [https://www.ozon.ru/product/pwm-kontroller-zaryada-dlya-solnechnyh-paneley-smart-watt-delta-pwm-2410-10a-12-24v276366288/?asb=eaANxpi9n5SMeqJM%252BixAs047%252FQSnv9hW3H8WIXVTPc%253D&asb2=GGtxoMkFmEEExS1gBkvn32hUee7IH2MJw4665Xmh18Rrwa\\_Idkl9dCD3A8Yc4pAqu&avtc=1&avte=4&avts=1697621511&keywords=контроллер+заряда+ШИМ](https://www.ozon.ru/product/pwm-kontroller-zaryada-dlya-solnechnyh-paneley-smart-watt-delta-pwm-2410-10a-12-24v276366288/?asb=eaANxpi9n5SMeqJM%252BixAs047%252FQSnv9hW3H8WIXVTPc%253D&asb2=GGtxoMkFmEEExS1gBkvn32hUee7IH2MJw4665Xmh18Rrwa_Idkl9dCD3A8Yc4pAqu&avtc=1&avte=4&avts=1697621511&keywords=контроллер+заряда+ШИМ) (дата обращения: 12.05.2023).

12. Какой выбрать солнечный контроллер заряда: ШИМ или MPPT? [Электронный ресурс]. URL: <https://tsolar.ru/2019/05/27/какой-выбрать-солнечный-контроллер-з/> (дата обращения: 22.08.2023).

13. Иовлев Ю. Аккумуляторные батареи: учебное пособие. 2014. 60 с. URL: <https://coollib.com/b/299672-yuriy-iovlev-akkumulyatornyie-batarei/read> (дата обращения: 22.08.2023).

14. ATmega8 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.promelec.ru/fs/sources/e4/09/f3/32/e79e1c9c5417d1d11d1a7cc7.pdf> (дата обращения: 22.08.2023).

15. Зиновьев Г.С. Силовая электроника. 5-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2012. 285 с. ISBN 978-5-9916-1972-1.

16. Какой контроллер выбрать - PWM или MPPT? [Электронный ресурс]. — URL: <https://shop.solarhome.ru/mppt-or-pwm.html> (дата обращения: 22.08.2023).

17. Махсумов И.Б. Разработка энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии для электроснабжения труднодоступных районов Республики Таджикистан с использованием термозащиты солнечных модулей: дисс. ... канд. техн. наук; Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, 2020. 209 с.

18. The Effect of Temperature on Solar Panel Performance. URL: <https://solarcalculator.com.au/solar-panel-temperature/> (accessed: 12.05.2023).

19. Калашник В.И., Казаров К.Р., Черников В.А. Регулятор заряда аккумуляторных батарей от солнечных панелей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. № 1. С. 20–22. EDN: VNZQSL.

20. Swar A. Zubeer, Mohammed H.A., Ilkan M. A Review of Photovoltaic Cells Cooling Techniques // E3S Web of Conferences. 2017. No. 22. P. 2–11. doi: 10.1051/e3sconf/20172200205.

21. JinkoSolar JKM230P-60 Manuals [Электронный ресурс]. URL: <https://www.manualslib.com/products/Jinkosolar-Jkm230p-60-4186139.html> Паспорт jkm230 (дата обращения: 22.08.2023).

22. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Солнечные электростанции: концентраторы солнечного излучения: учебное пособие для вузов / Под ред. Д.С. Стребкова. 2-е изд., испр. М.: Юрайт, 2019. 265 с. ISBN 978-5-534-08777-2.

23. Batrex [Электронный ресурс]. URL: <https://avsila.ru/brands/batrex/> (дата обращения: 22.08.2023).

24. Mini water pump [Электронный ресурс]. URL: <https://sl.aliexpress.ru/p?key=nMwQZ4j> (дата обращения: 22.08.2023).

25. Solar Power Meter TES-1333 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.tes.com.tw/en/product\\_detail.asp?seq=285](https://www.tes.com.tw/en/product_detail.asp?seq=285) (дата обращения: 22.08.2023).

26. Zanlorenzi G., Szejka A.L., Junior O.C. Hybrid Photovoltaic Module for Efficiency Improvement through an Automatic Water Cooling System: a Prototype Case Study // Clean Prod. 2018. Vol. 196. P. 195–204.

27. Сколько нужно заряжать аккумулятор: время зарядки АКБ автомобиля [Электронный ресурс]. URL: <https://avtoran.ru/skolko-zarazat-akkumulator-avtomobilnyj-raznymi-tokami/> (дата обращения: 22.08.2023).

11. Елистратов В.В., Аронова Е.С. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 164 с. EDN: QKKVHZ.

28. Карамов Д.Н. Комплексная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии и аккумулирующие устройства на примере п. «Батамай» Кобяйского района Якутии // Энергетика России в XXI веке: Инновационное развитие и управление: сб. тр. Всеросс. конф. Новосибирск, 2015. С. 582–590. EDN: VDLHED.

## References

1. Doroshin A.N., Vissarionov V.I., Malinin N.K. Mnogofaktornyy analiz effektivnosti energokompleksov na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii dlya energoobespecheniya avtonomnogo potrebitelya [Multiple-Factor Analysis of the Energy Facility Efficiency Based on Renewable Energy Sources in the System of Energy Supply of the Autonomous Consumer]. *Vestnik MEI — Bulletin of MEI*, 2011, No. 2, pp. 45–53. EDN: NTZARP. [in Russian].

2. Bezrukikh P.P., Strebkov D.S. *Vozobnovlyayemaya energetika: strategiya, resursy, tekhnologiya* [Renewable Energy: Strategy, Resources, Technology]. Moscow, VIESKh Publ., 2005. 263 p. ISBN 5-85941-030-1. EDN: QMIOBD. [in Russian].

3. Nehari T., Benlakam M., Nehari D. Effect of the Fins Length for the Passive Cooling of the Photovoltaic Panels. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2016, No. 60(2), pp. 89–95. doi: 10.3311/PPme.8571.

4. *Kachestvo solnechnykh paneley: Sayt* [Quality of Solar Panels: Website]. URL: <https://www.alter7.ru/stat/solar-batareya.html> (accessed 12.05.2023). [in Russian].

5. Tremyasov V.A., Kenden K.V. Dizel'-solnechnyye ustanovki dlya elektrosnabzheniya otdalennykh rayonov Respubliki Tyva [Diesel-Solar Installations for Power Supply to Remote Areas of the Republic of Tyva]. *Sbornik trudov sed'moy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Energetika: upravleniye, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»: trudy Amurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Collection of Proceedings of the Seventh All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Energy: Management, Quality and Efficiency of Energy Resources»: Proceedings of Amur State University]. Amur, 2013, pp. 282–286. EDN: SAJRZF. [in Russian].

6. *Что vybrat' PWM (SHIM) ili MPPT kontroller?* [What to Choose a PWM or MPPT Controller?] [Electronic Resource]. URL: <https://reenergo.ru/blog/chto-vybrat-pwm-shim-ili-mppt-kontroller/> (accessed 22.08.2023). [in Russian].

7. Okhotkin G.P. Metodika rascheta moshchnosti solnechnykh elektrostantsiy [The Method of Calculating Power of Solar Power]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta — Bulletin of the Chuvash University*, 2023, No. 3, pp. 222–230. EDN: RUBSRL. [in Russian].

8. Vissarionov V.I., Katsay V.I., Doroshin A.N., Doroshina A.V. Metodika rascheta energeticheskogo kompleksa dlya teplo- i elektrosnabzheniya avtonomnogo potrebitelya na baze vozobnovlyayemykh istochnikov energii [Method of Calculation of the Energy Complex for Heat and Power Supply of an Autonomous Consumer on the Basis of Renewable Energy Sources]. *Effektivnoye antikrizisnoye upravleniye — Effective Anti-Crisis Management*, 2012, No. 2 (71), pp. 82–92. EDN: OXDZJZ. [in Russian].

9. *Kontroller zaryada solnechnoy paneli / batarei Epever Tracer MPPT 1210A: Sayt.* [Solar Panel/Battery Charge Controller Epever Tracer MPPT 1210A: Website]. URL: [https://www.ozon.ru/product/kontroller-zaryada-solnechnoy-paneli-batarei-epever-tracer-mppt-1210a-528350988/?advert=Ax038WzItc8RrMWwqy05uWF8A7KJdsST\\_woWUlxU9GhvcCvUyju6klMFZdizGD2yum28jBoOXDVTcMYRLO22FzfHyXyAGyyMn\\_63LF\\_RZPog1w7cK\\_3ctZdl870mNM8MnuyFqwk62vz6p-USbZY-aqySScbEhgX-EvIV49SgvKx3\\_meVW3vtP8g6EeIVrrG4GCDKvyGdheCccntR8FW4rQqMQNZdsLlhXv0KtCObtCi7Mwxel0N-a7pHp39QkwuhOI1vW9FaOVIwGQ5eLq4yYqqa0PktSRhjEkt3V5jK1nsLKCNOhI0zmNfzPW3E51os\\_ujPchMxZ\\_SJCC&avtc=1&avte=2&avts=1697621537&keywords=mppt+kontroller+zaryada+solnechnoy+batarei#section-description--offset-140](https://www.ozon.ru/product/kontroller-zaryada-solnechnoy-paneli-batarei-epever-tracer-mppt-1210a-528350988/?advert=Ax038WzItc8RrMWwqy05uWF8A7KJdsST_woWUlxU9GhvcCvUyju6klMFZdizGD2yum28jBoOXDVTcMYRLO22FzfHyXyAGyyMn_63LF_RZPog1w7cK_3ctZdl870mNM8MnuyFqwk62vz6p-USbZY-aqySScbEhgX-EvIV49SgvKx3_meVW3vtP8g6EeIVrrG4GCDKvyGdheCccntR8FW4rQqMQNZdsLlhXv0KtCObtCi7Mwxel0N-a7pHp39QkwuhOI1vW9FaOVIwGQ5eLq4yYqqa0PktSRhjEkt3V5jK1nsLKCNOhI0zmNfzPW3E51os_ujPchMxZ_SJCC&avtc=1&avte=2&avts=1697621537&keywords=mppt+kontroller+zaryada+solnechnoy+batarei#section-description--offset-140) (accessed 12.05.2023). [in Russian].

10. *PWM kontroller zaryada dlya solnechnykh paneley Smart Watt Delta PWM 2410 10A 12/24V: Sayt.* [PWM Charge Controller for Solar Panels Smart Watt Delta PWM 2410 10A 12/24V: Website]. URL: [https://www.ozon.ru/product/pwm-kontroller-zaryada-dlya-solnechnykh-paneley-smart-watt-delta-pwm-2410-10a-12-24v276366288/?asb=eaANxpxqi9n5SMeqJM%252BixAs047%252FQSnv9hW3H8WIXVTPc%253D&asb2=GGtxoMkFmEEExS1gBkvn32hUee7IH2MJw4665Xmh18Rrwa\\_Idkl9dCD3A8Yc4pAqu&avtc=1&avte=4&avts=1697621511&keywords=kontroller+zaryada+S HIM](https://www.ozon.ru/product/pwm-kontroller-zaryada-dlya-solnechnykh-paneley-smart-watt-delta-pwm-2410-10a-12-24v276366288/?asb=eaANxpxqi9n5SMeqJM%252BixAs047%252FQSnv9hW3H8WIXVTPc%253D&asb2=GGtxoMkFmEEExS1gBkvn32hUee7IH2MJw4665Xmh18Rrwa_Idkl9dCD3A8Yc4pAqu&avtc=1&avte=4&avts=1697621511&keywords=kontroller+zaryada+S HIM) (accessed 12.05.2023). [in Russian].

11. Yelistratov V.V., Aronova Ye.S. *Solnechnyye energoustanovki. Otsenka postupleniya*

*solnechnogo izlucheniya: uchebnoye posobiye* [Solar Power Plants. Assessment of Solar Radiation Intake: Textbook]. Saint-Petersburg, Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 164 p. EDN: QKKVHZ. [in Russian].

12. *Kakoy vybrat' solnechnyy kontroller zaryada: SHIM ili MPPT?* [Which Solar Charge Controller to Choose: PWM or MPPT?]. [Electronic Resource]. URL: <https://tsolar.ru/2019/05/27/kakoy-vybrat-solnechnyy-kontroller-z/> (accessed 22.08.2023). [in Russian].

13. Iovlev Yu. *Akkumulyatornyye batarei: uchebnoye posobiye* [Batteries: Textbook]. 2014. 60 p. URL: <https://coollib.com/b/299672-yuriy-iovlev-akkumulyatornyie-batarei/read> (accessed 22.08.2023). [in Russian].

14. *ATmega8* [Electronic Resource]. URL: <https://www.promelec.ru/fs/sources/e4/09/f3/32/e79e1c9c5417d1d11d1a7cc7.pdf> (accessed 22.08.2023). [in Russian].

15. Zinov'yev G.S. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. 5th ed., rev. and add. Moscow, Yurayt Publ., 2012. 285 p. ISBN 978-5-9916-1972-1. [in Russian].

16. Which controller should I choose - PWM or MPPT? [electronic resource]. URL: <https://shop.solarhome.ru/mppt-or-pwm.html> (date of application: 08/22/2023).

17. Makhsumov I.B. *Razrabotka energo-kompleksa na baze vozobnovlyayemykh istochnikov energii dlya elektrosnabzheniya trudnodostupnykh rayonov respubliki Tadjikistan s ispol'zovaniyem termozashchity solnechnykh moduley: diss. ... kand. tekhn. nauk; Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet* [Development of an Energy Complex Based on Renewable Energy Sources for Power Supply to Hard-to-Reach Areas of the Republic of Tajikistan Using Thermal Protection of Solar Modules: diss. ... Cand. Engin. Sci.; South Ural State University]. Chelyabinsk, 2020. 209 p. [in Russian].

18. *The Effect of Temperature on Solar Panel Performance.* URL: <https://solarcalculator.com.au/solar-panel-temperature/> (accessed: 12.05.2023). [in Russian].

19. Kalashnik V.I., Kazarov K.R., Chernikov V.A. *Regulyator zaryada akkumulyatornykh batarey ot solnechnykh paneley* [Battery Charge Regulator from Solar Panels]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva — Mechanization and Electrification of Agriculture*, 2015, No. 1, pp. 20–22. EDN: VNZQSL. [in Russian].

20. Swar A. Zubeer, Mohammed H.A., Ilkan M. *A Review of Photovoltaic Cells Cooling Techniques. E3S Web of Conferences*, 2017, No. 22, pp. 2–11. doi: 10.1051/e3sconf/20172200205.

21. *JinkoSolar JKM230P-60 Manuals* [Electronic Resource]. URL: <https://www.manualslib.com/products/Jinkosolar-Jkm230p-60-4186139.html> Passport jkm230 (accessed 22.08.2023). [in Russian].
22. Strebkov D.S., Tver'yanovich E.V. *Solnechnyye elektrostantsii: kontsentratory solnechnogo izlucheniya: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Solar Power Plants: Solar Radiation Concentrators: a Textbook for Universities]. 2nd ed., rev. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 265 p. ISBN 978-5-534-08777-2. [in Russian].
23. *Batrex* [Electronic Resource]. URL: <https://avvila.ru/brands/batrex/> (accessed 22.08.2023). [in Russian].
24. *Mini Water Pump* [Electronic Resource]. URL: <https://sl.aliexpress.ru/p?key=nMwQZ4j> (accessed 22.08.2023). [in Russian].
25. *Solar Power Meter TES-1333* [Electronic Resource]. URL: [https://www.tes.com.tw/en/product\\_detail.asp?seq=285](https://www.tes.com.tw/en/product_detail.asp?seq=285) (accessed 22.08.2023).
26. Zanlorenzi G., Szejka A.L., Junior O.C. Hybrid Photovoltaic Module for Efficiency Improvement through an Automatic Water Cooling System: a Prototype Case Study. *Clean Prod.*, 2018, Vol. 196, pp. 195–204.
27. *Skol'ko nuzhno zaryazhat' akkumulyator: vremya zaryadki AKB avtomobilya* [How Much to Charge the Battery: the Charging Time of the Car Battery]. [Electronic Resource]. URL: <https://avtoran.ru/skolko-zarazat-akkumulator-avtomobilnyj-raznymi-tokami/> (accessed 22.08.2023). [in Russian].
28. Karamov D.N. Kompleksnaya optimizatsiya avtonomnoy sistemy elektrosnabzheniya, ispol'zuyushchey vozobnovlyayemyye istochniki energii i akkumuliruyushchiye ustroystva na primere p. «Batamay» Kobyayskogo rayona Yakutii [Comprehensive Optimization of an Autonomous Power Supply System Using Renewable Energy Sources and Storage Devices Using the Example of the Village “Batamay” of the Kobyai Region of Yakutia]. *Sbornik trudov vsereossiyskoy konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke: Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye»* [Collection of Proceedings of the All-Russian Conference «Russian Energy in the 21st Century: Innovative Development and Management»]. Novosibirsk, 2015, pp. 582–590. EDN: VDLHED. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 06.10.2023; одобрена после рецензирования 13.10.2023; принята к публикации 20.11.2023.*

*The article was submitted 06.10.2023; approved after reviewing 13.10.2023; accepted for publication 20.11.2023.*

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Баширов Мусса Гумерович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

### **Баширова Эльмира Муссаевна**

кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

### **Вагапов Ильнур Фазылитдинович**

магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

### **Гамисония Гиорги Кахаберович**

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

### **Ганичева Лидия Сергеевна**

магистрант кафедры «Прикладная информатика», Национальный исследовательский университет ИТМО, Москва, Россия

### **Горшков Борис Михайлович**

доктор технических наук, профессор «Высшей школы передовых производственных технологий», Поволжский государственный университет сервиса, Тольятти, 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

### **Зайниев Азат Венерович**

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

### **Ивашкин Олег Николаевич**

Газопромысловое управление, ООО «Газпром добыча Ямбург», Новый Уренгой, Россия

### **Ивекеев Владимир Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

### **Коломеец Дмитрий Алексеевич**

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



---

**Кузьмина Александра Федоровна**

магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате),

**Лымарь Алексей Борисович**

старший преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Максудов Денис Вилевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Николаев Александр Аркадьевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Омельченко Евгений Яковлевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Пашкин Василий Валериевич**

инженер-энергетик I категории, Газопромысловое управление, ООО «Газпром добыча Ямбург», Новый Уренгой, Россия; аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Петушков Михаил Юрьевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Прокоп Георгий Светославович**

студент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Рыжевол Сергей Сергеевич**

аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Соловьев Богдан Алексеевич**

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

**Сорогин Александр Сергеевич**

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

---

**Сорокин Александр Владимирович**

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

**Тулупов Платон Гарриевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Усманов Марсель Фаргатович**

магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Хамитов Рустам Нуриманович**

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

**Холодилов Сергей Сергеевич**

соискатель кафедры электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Шабанов Виталий Алексеевич**

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

**Шайдуллин Венер Фанусович**

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

**Хакимьянов Марат Ильгизович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Юсупов Ренат Анверович**

аспирант «Высшей школы передовых производственных технологий», Поволжский государственный университет сервиса, Тольятти, Россия

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Bashirov Mussa G.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

### **Bashirova Elmira M.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Lecturer of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

### **Dimukasheva Gulnaz E.**

Postgraduate student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Gamisonia Giorgi K.**

Postgraduate Student of Economics and Strategic Development Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Ganicheva Lidiya S.**

Undergraduate Student of the Applied Computer Science Department, ITMO University, Moscow, Russia

### **Gorshkov Boris M.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Higher School of Advanced Production Technologies, Volga Region State University of Service, Togliatti, Russia

### **Ivashkin Oleg N.**

Gas Producing Department, Gazprom dobycha Yamburg LLC, Novy Urengoy, Russia

### **Ivekeev Vladimir S.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

### **Khakimyanov Marat I.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Khamitov Rustam N.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Equipment Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia; Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

### **Kholodilov Sergey S.**

Departmental Candidate of Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

### **Kolomeets Dmitry A.**

Undergraduate Student of the Department «Eurasian Polytechnic School», Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

---

**Kuzmina Alexandra F.**

Undergraduate Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

**Lymar Aleksei B.**

Senior Lecturer of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Maksudov Denis V.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Nikolaev Aleksandr A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Omelchenko Evgenii Ya.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Pashkin Vasiliy V.**

Energy Engineer, Gas Producing Department, Gazprom dobychaYamburg LLC, NovyUrengoy, Russia; Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Petushkov Mikhail Yu.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Prokop Georgiy S.**

Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

**Ryzhevol Sergey S.**

Postgraduate Student of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Shabanov Vitaly A.**

Candidate of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Shaydullin Vener F.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Solovev Bogdan A.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

---

**Sorogin Aleksandr S.**

Postgraduate Student of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Sorokin Alexander V.**

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Tulupov Platon G.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Usmanov Marcel F.**

Undergraduate Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

**Vagapov Ilnur F.**

Undergraduate Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

**Yusupov Renat A.**

Postgraduate Student of the Higher School of Advanced Production Technologies, Volga Region State University of Service, Togliatti, Russia

**Zayniev Azat V.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Zherebtsov Sergey N.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Snigur Artem**

Student of Department of Electrical Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Styskin Andrey V.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Teregulov Tagir R.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Urazbakhtin Ruslan R.**

Head of the UAV Research Department of the FIS «Motors of the Future», Ufa State University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Vavilov Vyacheslav E.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Director of the FIS «Motors of the Future», Ufa State University of Science and Technology, Ufa, Russia

---

**Yangirov Ilgiz F.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Zaitsev Evgeny A.**

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

**Zaitseva Alina A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

**Zakharov Igor L.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Zamanova Guzel I.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the General Physics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Zayniev Azat V.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, 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

## СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАНЫХ В 2023 ГОДУ

*Барвинов А. В., Хамитов Р. Н., Ганичева Л. С., Жеребцов С. Н.* Электроснабжение мало-мощных потребителей, установленных на нефтепроводах в удаленных районах Крайнего Севера, № 3, С. 49–63.

*Баширов М. Г., Баширова Э. М., Усманов М. Ф., Вагапов И. Ф., Кузьмина А. Ф.* Разработка учебно-исследовательского комплекса «Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и экспертные системы», № 4, С. 137–149.

*Баширов М. Г., Баширова Э. М., Прокон Г. С.* Технические решения для повышения надежности электроснабжения насосных агрегатов технологических установок нефтегазового производства при провалах напряжения, № 4, С. 45–53.

*Баязитов Ф. А., Юсупова Ю. Р., Филиппов В. Н., Альмухаметов А. А.* Удаленный доступ к мобильному роботу, № 1, С. 135–143.

*Беляев А. С., Филипас А. А.* Исследование работы системы опорного обезвешивания на примере математического и натурального моделирования, № 2, С. 135–144.

*Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г., Лобанов А. В.* Резонансные явления в системах зажигания авиационных двигателей, № 2, С. 7–15.

*Гильманов Э. А.* Способы и современные устройства плавного пуска высоковольтных двигателей, № 1, С. 93–105.

*Глазырин А. С., Кладиев С. Н., Тимошкин В. В., Боловин Е. В., Козлова Л. Е., Набунский И. А., Раков И. В., Попов С. С.* Настройка и исследование режимов работы наблюдателя угловой частоты вращения регулируемого электропривода постоянного тока, № 2, С. 30–42.

*Демин А. Ю., Пашали Д. Ю., Заманова Г. И., Нафикова Р. М.* Адаптация диагностики по методу И. Накатани к использованию измерительных генераторов заданной электрической мощности и цифровой обработке данных, № 3, С. 39–48.

*Демин А. Ю., Пашали Д. Ю., Юшкова О. А.* Токовихревой способ выявления дефектов многослойных крупногабаритных изделий, № 2, С. 43–50.

*Зайниев А. В., Шайдуллин В. Ф., Хакимьянов М. И.* Анализ современных методов диагностирования газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами на объектах добычи нефти, № 3, С. 133–144.

*Зайниев А. В., Шайдуллин В. Ф., Хакимьянов М. И.* Определение надежности элементов газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами методом анализа иерархий, № 4, С. 108–119.

*Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Зайцев Е. А., Култаев Д. Р., Белявцев М. В.* Разработка алгоритма навигации и формирование безопасных траекторий автономного полета беспилотного летательного аппарата в условиях многочисленных помех и препятствий, № 3, С. 167–178.

*Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Зайцев Е. А., Култаев Д. Р., Белявцев М. В., Силин И. П.* Разработка алгоритма управления группой беспилотных летательных аппаратов самолетного типа, № 3, С. 179–188.

*Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Месропян А. В., Гарипов И. Р., Пронин Е. А.* Параметризация вентиляторного узла внешней системы охлаждения электродвигателя, № 2, С. 51–61.

*Королев В. И.* Методы прогнозного мониторинга технического состояния электрических машин, № 2, С. 62–72.

*Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Уразбахтин Р. Р., Месропян А. В.* Разработка и исследования бесконтактного электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов, № 3, С. 26–38.

---

*Кириллов Р. В., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И., Хазиева Р. Т.* Исследование повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, № 1, С. 68–81.

*Кириллов Р. В., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И., Хазиева Р. Т.* Моделирование электромагнитных процессов в фильтрокомпенсирующем устройстве в составе системы заряда емкостного накопителя, № 1, С. 82–92.

*Кондрашова Ю. Н., Ефименко А. М., Снигур А.* Оценка влияния баланса мощностей на результирующую устойчивость генераторов с учетом реконструкции в аварийных и послеаварийных режимах применительно к энергетическому узлу предприятия черной металлургии, № 3, С. 74–88.

*Королев В. И.* Прогнозный мониторинг технического состояния путем анализа составляющих сигнала вибрации подшипников вращающихся электрических машин, № 3, С. 89–100.

*Косарев Б. А., Кошук Г. А., Лазарев Д. В., Охотников А. А., Хамитов Р. Н.* Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах в условиях распределенной генерации при резкопеременном характере нагрузки потребителя, № 3, С. 64–73.

*Купцов Д. В., Хазиева Р. Т.* Анализ схмотехнических решений и способов повышения энергетической эффективности зарядных устройств, № 2, С. 73–79.

*Максудов Д. В.* Влияние частоты питающего напряжения на эффективность образования озона в озонаторе сотовой структуры, № 4, С. 65–74.

*Максудов Д. В.* Методика расчета озонатора сотовой структуры, № 4, С. 54–64.

*Николаев А. А., Афанасьев М. Ю., Маклаков А. С., Буланов М. В.* Методика выбора параметров пассивного фильтра для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с активными выпрямителями, № 3, С. 9–25.

*Николаев А. А., Ивекеев В. С., Тулупов П. Г., Рыжеев С. С.* Сравнительный анализ эффективности различных моделей электрического контура электродуговой печи для использования в цифровом двойнике, № 4, С. 9–30.

*Овчинников А. В., Новикова К. О., Фетисов В. С.* Подзарядка беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на контактных платформах с адаптируемой шириной контактных полос, № 2, С. 80–89.

*Омельченко Е. Я., Лымарь А. Б.* Идентификация параметров схемы замещения асинхронных двигателей при помощи нейронных сетей, № 4, С. 31–44.

*Пашкин В. В., Шабанов В. А., Ивашкин О. Н.* Оптимизационный алгоритм управления частотно-регулируемым электроприводом в электротехническом комплексе двухступенчатого охлаждения газа, № 4, С. 75–83.

*Петков Р. Э., Ишемгузин А. И.* Обратногоходовой преобразователь с быстродействующей схемой управления, № 1, С. 125–134.

*Петушков М. Ю., Холодилов С. С.* Определение диагностического сигнала для мониторинга синхронных двигателей с постоянными магнитами, № 4, С. 95–107.

*Раков И. В.* Динамическая идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме, № 1, С. 24–48.

*Раков И. В.* Методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности, № 3, С. 101–117.



---

*Ревякин Е. Е., Сушков В. В., Хамитов Р. Н.* Исследование совместной работы автономной газотурбинной электростанции и генерирующего узла с возобновляемыми источниками электроэнергии, № 1, С. 14–23.

*Рохлов В. А., Хамитов Р. Н., Захаров И. Л., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С.* Информационное обеспечение системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети, № 3, С. 189–205.

*Сафиуллин Р. А.* Управление плаванием композитного электромеханического микроробота, № 3, С. 153–166.

*Сидоров А. В., Сушков В. В., Сидоров С. В., Сухачев И. С.* Влияние резонансных явлений на технический ресурс асинхронных электродвигателей при импульсных перенапряжениях, № 1, С. 5–13.

*Сираев Ф. Ф., Хазиева Р. Т.* Использование широтно-импульсной модуляции для управления резонансным инвертором, № 2, С. 90–97.

*Соловьев Б. А., Бодылев А. С., Павлов А. Д., Каекбирдина И. Д.* Анализ перспектив развития геотермальной энергетики, № 1, С. 117–124.

*Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Димукашева Г. Е., Коломеец Д. А.* Применение термоэлектрического модуля Пельтье в технологиях охлаждения и генерации электроэнергии, № 4, С. 127–136.

*Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Саъдулов Р. Ш.* Технологии автоматизации как ключевой компонент пути развития производства Индустрии 4.0, № 2, С. 145–158.

*Сорогин А. С., Хамитов Р. Н., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С.* Система управления режимом заряда и разряда аккумуляторной батареи в составе фотоэлектрической станции, № 4, С. 150–166.

*Сорокин А. В., Шабанов В. А.* Алгоритм вычисления емкостных токов при однофазном замыкании на землю, использующий параметры аварийного и доаварийного режимов, № 4, С. 84–94.

*Сорокин А. В., Шабанов В. А.* Двухсторонний метод определения места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, № 2, С. 98–109.

*Стыскин А. В., Рогинская Л. Э., Янгиров И. Ф., Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Максудов Д. В.* Разработка методики расчета параметрических трансформаторов, № 2, С. 110–122.

*Филипченко А. С.* Классификация специализированных вычислительных систем на транспорте, № 2, С. 159–169.

*Хамитов Р. Н., Зыкин П. В.* Синтез системы управления шероховатостью на основе нечеткой логики посредством программного пакета MATLAB SIMULINK, № 3, С. 145–152.

*Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Саттаров Р. Р., Копытин И. И.* Оптимизация конструктивных параметров электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами, № 1, С. 49–57.

*Шабанов В. А., Степанова В. Д.* Графоаналитическое исследование режимов однофазного замыкания на землю, № 2, С. 123–134.

*Шулаева Е. А., Данилов В. И.* Разработка образовательного приложения, моделирующего процессы промышленного производства в игровом двигателе UNITY 3D PERSONAL, № 2, С. 170–180.

---

*Шулаева Е. А., Маринич А. А.* Разработка системы мониторинга безопасности информационной среды предприятия, № 1, С. 144–155.

*Юдинцев А. Г., Дмитриев В. М., Ганджа Т. В., Шурыгин Ю. А.* Алгоритм определения параметров регулятора, удовлетворяющих требованиям переходного процесса в понижающем преобразователе постоянного напряжения, № 2, С. 16–29.

*Юсупов Р. А., Горшков Б. М.* Увеличение нагрузочной способности эксплуатируемых силовых трансформаторов, № 4, С. 120–126.

*Янгиров И. Ф., Лобанов А. В., Халиков А. Р.* Двухспиральный магнитокумулятивный источник сверхсильных магнитных полей, № 1, С. 106–116.

*Янгиров И. Ф., Халиков А. Р., Федосов Е. М., Лобанов А. В., Терегулов Т. Р., Максудов Д. В., Стыскин А. В.* Электромеханический вибрационный преобразователь с замкнутым спиральным вторичным элементом и улучшенными характеристиками, № 3, С. 118–132.

*Ярыш Р. Ф., Чернявская И. А., Гарифуллина А. Р.* Эффективность применения автоматических установок компенсации реактивной мощности в нефтепромысловых электрических сетях, № 1, С. 58–67.

---

## LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2023

- Barvinov A. V., Khamitov R. N., Ganicheva L. S., Zherebtsov S. N.* Power supply for low-power consumers installed on oil pipelines in remote areas of the Far North, № 3, P. 49–63.
- Bashirov M. G., Bashirova E. M., Prokop G. S.* Technical solutions for increasing the reliability of power supply to pumping units of oil and gas production installations in the event of voltage dips, № 4, P. 45–53.
- Bashirov M. G., Bashirova E. M., Usmanov M. F., Vagapov I. F., Kuzmina A. F.* Educational and research complex on the discipline «Intelligent decision support systems and expert systems», № 4, P. 137–149.
- Bayazitov F. A., Yusupova J. R., Filippov V. N., Almukhametov A. A.* Remote access to mobile robot, № 1, P. 135–143.
- Belyaev A. S., Filipas A. A.* Research of the operation of the support weightening system on the example of mathematical and natural modeling, № 2, P. 135–144.
- Charykov V. I., Evdokimov A. A., Sattarov R. R., Kopytin I. I.* Optimization of design parameters of an electromagnetic separator with permanent magnets, № 1, P. 49–57.
- Demin A. Yu., Pashali D. Yu., Yushkova O. A.* Eddy Current method for defect detecting in multilayer large-scale objects, № 2, P. 43–50.
- Demin A. Yu., Pashali D. Yu., Zamanova G. I., Nafikova R. M.* Adaptation of diagnostics by I. Nakatani's method to the use of measuring generators with prescribed electrical power and digital data processing, № 3, P. 39–48.
- Filipchenko A. S.* Classification of specialized computing systems in transport, № 2, P. 159–169.
- Gilmanov E. A.* Methods and modern devices for soft start of high voltage motors, № 1, P. 93–105.
- Gizatullin F. A., Gabidullina Z. G., Lobanov A. V.* Resonance phenomena in aircraft engine ignition systems, № 2, P. 7–15.
- Glazyrin A. S., Kladiev S. N., Timoshkin V. V., Bolovin E. V., Kozlova L. E., Nabunskiy I. A., Rakov I. V., Popov S. S.* Setup and investigation of the operation modes of the speed observer in a controlled DC electric drive, № 2, P. 30–42.
- Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Mesropyan A. V., Garipov I. R., Pronin E. A.* Parameterization of the fan assembly of the external electric motor cooling system, № 2, P. 51–61.
- Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Urazbakhtin R. R., Mesropyan A. V.* Development and research of brushless electric motor for unmanned aerial vehicles, № 3, P. 26–38.
- Khamitov R. N., Zykin P. V.* Synthesis of fuzzy logic roughness control system by MATLAB SIMULINK software package, № 3, P. 145–152.
- Kirillov R. V., Afyatonov R. R., Vasilyev P. I., Khazieva R. T.* Investigation of a DC voltage booster converter based on a multifunctional integrated electromagnetic component, № 1, P. 68–81.
- Kirillov R. V., Afyatonov R. R., Vasilyev P. I., Khazieva R. T.* Simulation of electromagnetic processes in the filter-compensator device as part of the charging system of the capacitive storage, № 1, P. 82–92.
- Kondrashova Yu. N., Efimenko A. M., Snigur A.* Estimation of the influence of the capacity balance on the resulting stability of generators taking into account reconstruction in emergency and post-emergency modes as applied to the power unit of the ferrous metallurgy enterprise, № 3, P. 74–88.
- Korolev V. I.* Methods of predictive monitoring of the technical condition of electrical systems, № 2, P. 62–72.

- 
- Korolev V. I.* Predictive monitoring of technical condition by analyzing the vibration signal components of rotating electric machine bearings, № 3, P. 89–100.
- Kosarev B. A., Koshchuk G. A., Lazarev D. V., Okhotnikov A. A., Khamitov R. N.* Methods for maintaining voltage and frequency values within acceptable limits in conditions of distributed generation with a sharply variable nature of the load of the consumer, № 3, P. 64–73.
- Kuptsov D. V., Khazieva R. T.* Analysis of circuit solutions and ways to increase energy efficiency, № 2, P. 73–79.
- Maksudov D. V.* Influence of supply voltage frequency on the efficiency of ozone formation in a cellular ozonator, № 4, P.65–74.
- Maksudov D. V.* Methodology for calculating an ozonizer with a honeycomb structure, № 4, P. 54–64.
- Nikolaev A. A., Afanasev M. Yu., Maklakov A. S., Bulanov M. V.* Methodology for selecting parameters of a passive filter to improve the quality of electricity in electric networks with an active rectifier, № 3, P. 9–25.
- Nikolaev A. A., Ivekeev V. S., Tulupov P. G., Ryzhevol S. S.* Comparative analysis of efficiency between different models of electric circuit for application in electric arc furnace's digital twin, № 4, P. 9–30.
- Omelchenko E. Ya., Lyamar A. B.* Identification of the parameters of an induction motor equipment circuit using neural networks, № 4, P. 31–44.
- Ovchinnikov A. V., Novikova K. O., Fetisov V. S.* Recharge of VTOL UAVs on landing platforms with adaptable contact band width, № 2, P. 80–89.
- Pashkin V. V., Shabanov V. A., Ivashkin O. N.* A method for controlling a frequency-controlled drive of the gas air cooling apparatus with two-stage cooling, № 4, P. 75–83.
- Petkov R. E., Ishemgujin A. I.* Reverse-pass converter with a high-speed control circuit, № 1, P. 125–134.
- Petushkov M. Yu., Kholodilov S. S.* Definition of a diagnostic signal for monitoring permanent magnet synchronous motors, № 4, P. 95–107.
- Rakov I. V.* Dynamic estimation parameters of the elimination circuit of induction motor on the basis of instant full power balance in a steady-state mode, № 1, P. 24–48.
- Rakov I. V.* Methodology for evaluating parameters of the electrical complex «Cable line – Induction motor» based on power consumption balance, № 3, P. 101–117.
- Revyakin E. E., Sushkov V. V., Khamitov R. N.* Research on cooperative working of isolated gas-turbine power plant and renewable energy sources generation node, № 1, P. 14–23.
- Rokhlov V. A., Khamitov R. N., Zakharov I. L., Zherebtsov S. N., Ganicheva L. S.* Information support of optimal distribution network configuration management system, № 3, P. 189–205.
- Safiullin R. A.* Swimming control of a composite electromechanical microrobot, № 3, P. 153–166.
- Shabanov V. A., Stepanova V. D.* Graphoanalytical study of single-phase earth fault modes, № 2, P. 123–134.
- Shulaeva E. A., Danilov V. I.* Development of an educational application simulating industrial production processes in the UNITY 3D PERSONAL game engine, № 2, P. 170–180.
- Shulaeva E. A., Marinich A. A.* Development of an enterprise information environment security monitoring system, № 1, P. 144–155.

- 
- Sidorov A. V., Sushkov V. V., Sidorov S. V., Sukhachev I. S.* Influence of resonance phenomena on the technical resource of asynchronous machines at impulse overvoltages, № 1, P. 5–13.
- Siraev F. F., Khazieva R. T.* Using pulse width modulation to control the resonant inverter, № 2, P. 90–97.
- Solovev B. A., Bodylev A. S., Pavlov A. D., Kaekbirdina I. D.* Analysis of geothermal power engineering and development prospects, № 1, P. 117–124.
- Solovev B. A., Gamisonia G. K., Dimukasheva G. Ye., Kolomeets D. A.* Application of Peltier thermoelectric module in cooling and electric power generation technologies, № 4, P. 127–136.
- Solovev B. A., Gamisonia G. K., Sayduloev R. Sh.* Automation technologies as a key component of the Industry 4.0 manufacturing development path, № 2, P. 145–158.
- Sorogin A. S., Khamitov R. N., Zherebtsov S. N., Ganicheva L. S.* Battery charge and discharge mode control system as part of a photovoltaic plant, № 4, P. 150–166.
- Sorokin A. V., Shabanov V. A.* An algorithm for calculating capacitive currents in single-phase earth fault using the parameters of emergency and pre-emergency modes, № 4, P. 84–94.
- Sorokin A. V., Shabanov V. A.* A two-way method for determining the location of a single-phase earth fault in networks with an isolated neutral, № 2, P. 98–109.
- Styskin A. V., Roginskaya L. E., Yangirov I. F., Gorbunov A. S., Karimov R. D., Maksudov D. V.* Development of a method for calculation of parametric transformers, № 2, P. 110–122.
- Yangirov I. F., Khalikov A. R., Fedosov E. M., Lobanov A. V., Teregulov T. R., Maksudov D. V., Styskin A. V.* Electromechanical vibration transducer with a closed spiral secondary element and improved characteristics, № 3, P. 118–132.
- Yangirov I. F., Khalikov A. R., Lobanov A. V.* Double-spiral magnetic-cumulative source of super strong magnetic fields, № 1, P. 106–116.
- Yarysh R. F., Chernyavskaya I. A., Garifullina A. R.* Efficiency of application of automatic power factor correction units in oilfield electric networks, № 1, P. 58–67.
- Yudintsev A. G., Dmitriev V. M., Gandzha T. V., Shurygin Yu. A.* Algorithm for determining the regulator parameters meeting the requirements of the transient process in a step-down DC voltage converter, № 2, P. 16–29.
- Yusupov R. A., Gorshkov B. M.* Increasing the load capacity of operated power transformers, № 4, P. 120–126.
- Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Zaitsev E. A., Kultaev D. R., Belyavtsev M. V.* Development of navigation algorithm and formation of safe trajectories of autonomous flight of an unmanned aerial vehicle under conditions of numerous interferences and obstacles, № 3, P. 167–178.
- Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Zaitsev E. A., Kultaev D. R., Belyavtsev M. V., Silin I. P.* Development of a control algorithm for a group of aircraft-type unmanned aerial vehicles, № 3, P. 179–188.
- Zayniev A. V., Shaydullin V. F., Khakimyanov M. I.* Analysis of modern methods for diagnosis of gas piston units with synchronous generators at oil production facilities, № 3, P. 133–144.
- Zayniev A. V., Shaydullin V. F., Khakimyanov M. I.* Determining the reliability of elements of gas piston units with synchronous generators by the method of hierarchy analysis, № 4, P. 108–119.

---

Список опечаток в № 3, т. 19, 2023

List of errata in No. 3, vol. 19, 2023

*Исправление авторов*

| Страница | Строка | Напечатано | Следует читать |
|----------|--------|------------|----------------|
| 118      | 12 сн. | Викторович | Владимирович   |
| 118      | 6 сн.  | Рафаилович | Рафаэлевич     |
| 119      | 7 св.  | Викторович | Владиславович  |
| 207      | 7 сн.  | Викторович | Владимирович   |
| 208      | 6 сн.  | Рафаилович | Рафаэлевич     |
| 208      | 9 сн.  | Викторович | Владиславович  |

## 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.**