

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3-4, т. 18, 2022

Группы научных специальностей, по которым ведется прием статей в научный журнал  
«Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

- 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки),
- 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки),
- 05.09.12 – Силовая электроника (технические науки),
- 05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),
- 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),
- 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям) (технические науки),
- 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки),
- 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)



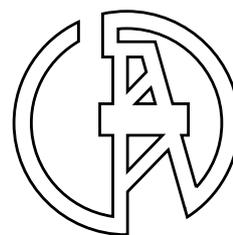
## Electrical and data processing facilities and systems

№ 3-4, т. 18, 2022



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



УГНТУ

№ 3–4, т. 18, 2022

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

## Учредитель

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

Журнал включен 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».

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

### Главный редактор:

Главный редактор:  
М.И. Хакимьянов — д-р техн. наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»  
(г. Уфа, Российская Федерация)

### Члены редакционной коллегии:

К. Лингфей — Ph. D, профессор  
«Нанкинский университет авионики и аэронавтики»  
(г. Нанкин, Китай)



А. Вахеди — Ph. D, профессор  
«Иранский университет науки и технологий»  
(г. Тегеран, Иран)



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



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



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



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



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



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



В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, профессор  
Костанайского регионального университета  
имени Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан)



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



### Зам. главного редактора:

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

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



Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»  
(г. Уфа, Российская Федерация)



И. Цицмане — д-р техн. наук, профессор  
Рижского технического университета, эксперт научного  
совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия)



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



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



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



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



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



Р.Р. Саттаров — д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный авиационный технический  
университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



**Ответственный секретарь:** П. И. Васильев  
**Технический редактор:** С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте [www.ugnes.ru](http://www.ugnes.ru)  
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).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022.

Адрес редакции и издательства: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1  
Тел.: (347) 243-16-19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Свободная цена. 12+

Дата выхода в свет: 19.12.2022 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20.23.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 173.

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.

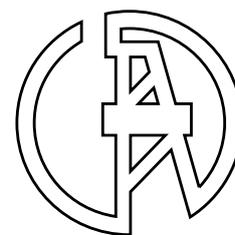
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 3–4, v. 18, 2022

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» (USPTU)

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of these on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences».

International standard serial number ISSN 1999-5458.

## Editorial board:

### Editor-in-chief:

M.I. Khakimyanov — Dr. Sci. Tech.,  
Associate Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum  
Technological University»  
(Ufa, Russia )

### Members of an editorial board:

X. Lingfei — Ph. D., Professor of Nanjing University  
of Aeronautics and Astronautics  
(Nanjing, China)

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

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

M.A. Urakseev — Dr. Sci. Tech., Professor  
of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»  
(Ufa, Russia )

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

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

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

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

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

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



### Deputy editor-in-chief:

R.T. Khazieva — Cand. Sci. Tech.  
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum  
Technological University»  
(Ufa, Russia )

S.V. Pavlov — Dr. Sci. Tech., Professor  
of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»  
(Ufa, Russia )

R.R. Safin — D. Sci. Tech., Professor  
of FSBEI HE «Bashkir State University»  
(Ufa, Russia )

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

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

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

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

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

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

R.R. Sattarov — Dr. Sci. Tech., Professor  
of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»  
(Ufa, Russia )

**Assistant editor:** P. I. Vasiliev  
**Technical editor:** S. V. Khalitova



The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC).

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website [www.ugues.ru](http://www.ugues.ru).

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2022.

Address of Editors office and Founder: 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243–16–19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Price is free. **12+**

Date of publication 19.12.2022 Paper format 60×84/8. Offset printing. 20.23 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 173.

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 «Electrical and data processing facilities and systems».

The items of this publication preserve original edition by their authors.

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т.</i> Разработка эффективного устройства для электрогидроимпульсной обработки водных растворов	5
<i>Димукашева Г.Е., Зекрин Б.Р., Кириллов Р.В., Стрельников Д.С., Хазиева Р.Т.</i> Анализ устойчивости частотно-регулируемого асинхронного привода магистрального насосного агрегата	13
<i>Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А., Аюпова А.Р., Сафина Г.Ф.</i> Импульсный высоковольтный источник напряжения на базе двухспирального магнитокумулятивного генератора с улучшенными характеристиками	23
<i>Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Вавилов В.Е., Халиков А.Р., Федосов Е.М., Сафина Г.Ф., Аюпова А.Р.</i> Электропривод со сложной геометрией вторичного элемента	35
<i>Косарев Б.А.</i> Феррорезонансные перенапряжения в электроустановках 6–220 кВ: теория и результаты экспериментальных исследований	45
<i>Косарев Б.А.</i> Феррорезонансные процессы в системах электроснабжения с распределенной генерацией	56
<i>Маклаков А.С., Николаев А.А., Лисовская Т.А., Линьков С.А.</i> Возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством высокомоощного рекуперативного электропривода переменного тока	65
<i>Накатаев А.А., Текле С.И., Зюзев А.М., Нестеров К.Е.</i> Испытательный стенд для моделирования режимов работы электропривода штанговой глубинной насосной установки	75
<i>Шабанов В.А., Сорокин А.В.</i> Признаки поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю	89

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Лопатеева О.Н., Юрова А.Д.</i> Разработка обучающей системы для подготовки специалистов по приему и пуску очистных устройств	101
<i>Соловьев Б.А., Гамисония Г.К.</i> Методы прогнозирования мощности ветра для шельфовых ветроэлектростанций	108
<i>Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С.</i> Синтез пропорционально-интегрально-дифференциальной системы управления продольной подачи токарного станка с числовым программным управлением	121
<i>Шулаева Е.А., Пенкин И.А.</i> Разработка цифрового двойника узла сероочистки углеводородного сырья	132
<i>Юдинцев А.Г., Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Зайченко Т.Н., Дубинин Н.М.</i> Структурно-функциональная схема цифрового двойника испытательного комплекса системы электроснабжения космических аппаратов на основе многоуровневой компьютерной модели	141

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Важдаев К.В., Ураксеев М.А., Аллабердин А.Б., Субханкулов К.М.</i> Оптоэлектронные приборы на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн	151
<b>Об авторах</b>	159
<b>Список статей, изданных в 2022 году</b>	167

---

# Content

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Aflyatunov R.R., Vasilyev P.I., Kirillov R.V., Khazieva R.T.</i> Development of an efficient device for electrohydro-pulsed processing of aqueous solutions	5
<i>Dimukasheva G.E., Zekrin B.R., Kirillov R.V., Strelnikov D.S., Khazieva R.T.</i> Analysis of stability of a the variable-frequency drives of the main pumps	13
<i>Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Safullin R.A., Ayupova A.R., Safina G.F.</i> High-voltage pulse generator based on dual-spiral magnetic accumulation generator with improved characteristics	23
<i>Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Vavilov V.E., Khalikov A.R., Fedosov E.M., Safina G.F., Ayupova A.R.</i> Electric drive with a complex geometry of the secondary element	35
<i>Kosarev B.A.</i> Ferroresonant overvoltages in electrical installations 6–220 kV: theory and results of experimental studies	45
<i>Kosarev B.A.</i> Ferroresonance processes in power supply systems with distributed generation	56
<i>Maklakov A.S., Nikolaev A.A., Lisovskaya T.A., Linkov S.A.</i> Reactive power compensation using a high-power regenerative AC drive	65
<i>Nakataev A.A., Tekle S.I., Ziuzev A.M., Nesterov K.Ye.</i> Test bench for simulating operation modes of sucker rod pump electric drive	75
<i>Shabanov V.A., Sorokin A.V.</i> Features of a faulty phase at single phase-to-ground faults	89

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Lopateeva O.N., Yurova A.D.</i> Development of a training system for personnel in the launch and reception of cleaning devices	101
<i>Solovev B.A., Gamisonia G.K.</i> Wind power prediction methods for shelf wind power plants	108
<i>Khamitov R.N., Zykin P.V., Glazyrin A.S.</i> Synthesis of proportional-integral-differential control system for longitudinal feed of CNC lathe	121
<i>Shulaeva E.A., Penkin I.A.</i> Development of a digital twin of the unit for sulfur removal of hydrocarbons	132
<i>Yudintsev A.G., Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Zaichenko T.N., Dubinin N.M.</i> Structural and functional diagram of the digital twin of the test complex of the spacecraft power supply system based on a multi-level computer model	141

## METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Vazhdaev K.V., Urakseev M.A., Allaberdin A.B., Subkhankulov K.M.</i> Optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves	151
<b>About the Authors</b>	159
<b>List of Articles Published in 2022</b>	167



**Радмир Рифович Афлятунов**  
**Radmir R. Aflyatunov**

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



**Петр Игоревич Васильев**  
**Petr I. Vasilyev**

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



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

доцент базовой кафедры «Электроэнергетика  
и электротехнологии» в составе «Электротехника  
и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет, Уфа, Россия



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

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

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-5-12

## РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

### Актуальность

Рост и развитие растений напрямую зависит от полива их водными растворами, которые содержат достаточное количество микроэлементов. В статье авторы предлагают эффективный источник питания для электротехнологической установки, предназначенной для водных растворов. Данная установка позволяет увеличивать полезные вещества и стимулирует их усваиваемость растениями.

### Цель исследования

Основной задачей является разработка эффективного устройства для электрогидроимпульсной обработки водных растворов.

### Методы исследования

В данном исследовании использованы следующие методы: патентный обзор и анализ научной литературы.

### Результаты

Авторы предлагают использовать источник напряжения на основе многофункционального интегрированного элемента. В статье представлена схема питания электротехнологической установки на основе двухсекционного единого конструкторско-технологического компонента. Своей многофункциональностью источник питания

на основе представленного компонента позволит в широких пределах изменять напряжение и во много раз снизить массу и габариты существующих установок. Одна из секций многофункционального компонента будет использоваться в качестве трансформатора, а вторая — в качестве конденсатора.

**Ключевые слова:** многофункциональный интегральный электромагнитный компонент, фильтрокомпенсирующее устройство, устройство для электрогидроимпульсной обработки водных растворов, аналитический расчет параметров

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

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

## DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT DEVICE FOR ELECTROHYDRO-PULSED PROCESSING OF AQUEOUS SOLUTIONS

### Relevance

The growth and development of plants directly depends on watering them with aqueous solutions that contain a sufficient amount of trace elements. In the article, the authors propose an efficient power source for an electrotechnological installation designed for aqueous solutions. This installation allows you to increase nutrients and stimulates their absorption by plants.

### Aim of research

The main task is to develop an efficient device for electrohydropulse treatment of aqueous solutions.

### Research methods

In this study, the following methods were used: patent review and study of scientific literature.

### Results

The authors propose to use a voltage source based on a multifunctional integrated element. The article presents a power supply circuit for an electrotechnological installation based on a two-section single design and technological component. With its versatility, the power supply based on the presented component will allow changing the voltage over a wide range and reducing the weight and dimensions of existing installations many times over. One of the sections of the multifunctional component will be used as a transformer, and the second as a capacitor.

**Keywords:** multifunctional integral electromagnetic component, filter-compensating device, device for electrohydropulse treatment of aqueous solutions, analytical calculation of parameters

**Acknowledgments:** The research was funded by a grant from the President of the Russian Federation Scholarship in 2022–2024 for young scientists and graduate students carrying out promising research and development in priority areas of modernization of the Russian economy. Grantee Khazieva Regina T.

The priority direction of the modernization of the Russian economy (the direction of the competition No. SP-2022 of the Council for Grants of the President of the Russian Federation) «Energy efficiency and energy saving, including the development of new types of fuel». Research topic «Development and research of a filter-compensating device to improve the quality of electricity».

Электрогидроимпульсный метод обработки позволяет с высокой эффективностью получать продукт на выходе с минимальным воздействием на окружающую среду [1]. Современные сельскохозяйственные производства проявляют большой интерес к электрогидроимпульсным технологиям. Это связано с тем, что из года в год плодородие почв снижается, так как почвенный покров подвержен загрязнению [2, 3]. Существует много методов повышения питательных веществ в почве с использованием электрогидравлических установок, например, обеззараживание почвы, электрогидравлическая обработка торфа, почвы и воды.

Авторами предлагается использовать разработанный источник питания для вышеуказанных установок с целью повышения эффективности процессов производства. Данный источник питания позволит повысить энергетическую эффективность, мощность и КПД всей установки, снизить массу и габариты [4]. Источник питания на основе гибридного элемента позволит улучшить надежность благодаря тому, что заменит одним элементом несколько в существующей схеме питания установки.

Авторами обоснована актуальность исследования источника питания установки для обработки водных растворов в силу того, что известные устройства имеют ряд недостатков [5–8]. Эти недостатки заключаются в том, что источники питания для устройства данного типа имеют большие габариты и крупную массу.

Авторами предлагается заменить источник питания, в качестве которого в

устройстве предлагается однофазный повышающий трансформатор [9, 10], на источник питания, в котором резонансный контур и повышающий трансформатор выполнены в виде единого конструкторско-технологического компонента, состоящего из первой и второй проводящих обкладок, свернутых в спираль и разделенных диэлектриком; обкладки выполняют роль первичной обмотки трансформатора, первая обкладка имеет вывод в начале обкладки, вторая обкладка имеет вывод в конце обкладки, вывод первой обкладки и вывод второй обкладки подключены в диагональ инвертора и проводочной обмотки, имеющей магнитную связь с обкладками, выполняющей роль вторичной обмотки трансформатора [11].

Таким образом, в результате изменений, которые предлагают авторы, произойдут существенное улучшение энергетических показателей и уменьшение массы и габаритов известного технологического устройства.

В известном устройстве для электрогидравлической обработки воды в качестве источника питания используется однофазный повышающий трансформатор [12].

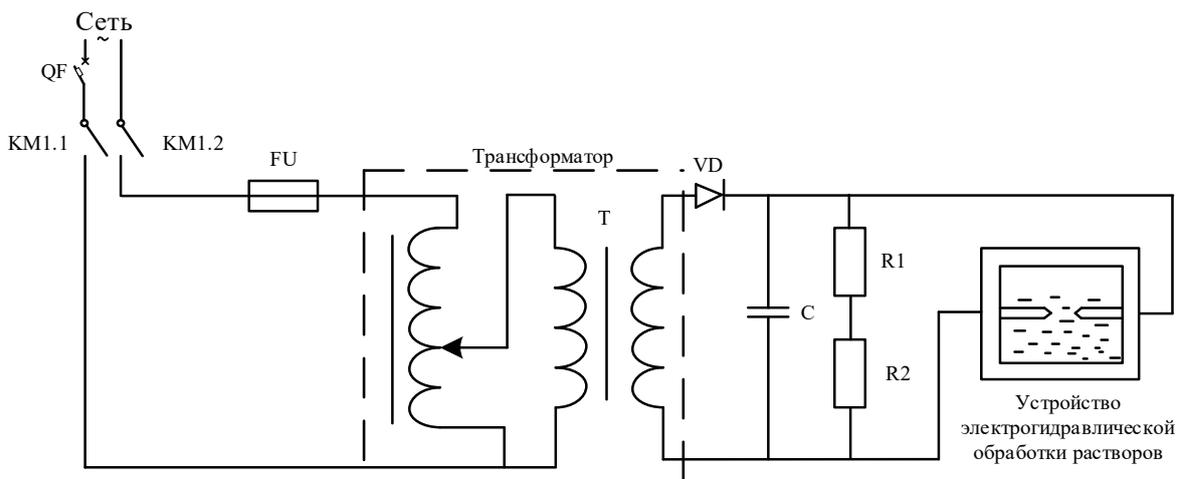
На рисунке 1 изображена принципиальная электрическая схема известного устройства электрогидравлической обработки водных растворов. Питание в схеме известного устройства, показанной на рисунке 1, производится следующим образом: питание подается на магнитный пускатель, который замыкает контакты КМ1.1 и КМ1.2. Но для замыкания данных контактов нужно включить автомат QF, который выполняет функцию ограничивающего устройства. В составе извест-

ной установки помимо повышающего трансформатора имеются выпрямляющий диод, высоковольтный конденсатор, вольтметр, резистивный делитель и соответственно сам искровой промежуток, который формирует гидроудар.

В известном устройстве при подаче напряжения на повышающий однофазный трансформатор происходит заряд конденсатора. После процесса заряда емкостного накопителя происходит его разряд в искровом промежутке [13].

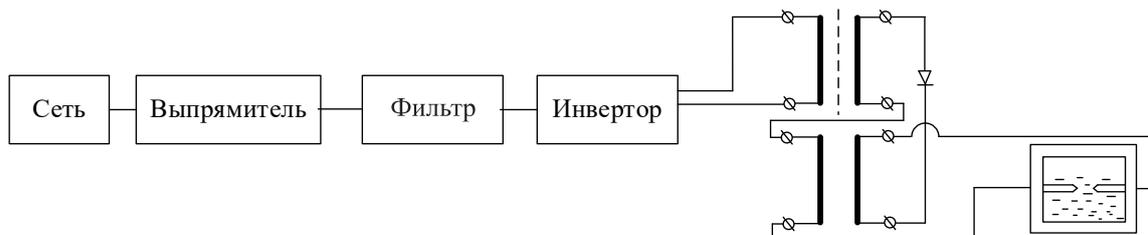
Авторами предлагается заменить устройство заряда емкостного накопителя [14], в результате чего процесс заряда будет происходить с высоким КПД, а на выходе можно будет получить требуемое напряжение и ток для производства гидроудара.

На рисунке 2 представлена предлагаемая авторами схема питания для устройства электрогидравлической обработки водных растворов. Источник питания состоит из следующих компонентов: генераторный блок в составе выпрямителя, сглаживающего фильтра, ШИМ инвертора, системы управления и единого конструкторско-технологического компонента, состоящего из двух магнитосвязанных секций. Единый конструкторско-технологический компонент выполнен из двух магнитосвязанных секций, он будет использоваться в качестве повышающего трансформатора и конденсатора, что позволит заменить в существующей схеме повышающий однофазный трансформатор и конденсатор, объединив их в один компонент.



**Рисунок 1.** Принципиальная схема известного устройства электрогидравлической обработки водных растворов

**Figure 1.** Schematic diagram of a well-known device for electro-hydraulic treatment of aqueous solutions



**Рисунок 2.** Установка для электрогидравлической обработки водных растворов на основе гибридного электромагнитного элемента

**Figure 2.** Installation for electrohydraulic treatment of aqueous solutions based on a hybrid electromagnetic element

Работает предлагаемое устройство источника питания на основе гибридного элемента следующим образом: переменное напряжение от сети поступает на выпрямитель, с которого выпрямленное напряжение, сглаживаемое фильтром, поступает на вход ШИМ инвертора. С выхода инвертора ШИМ поступает сигнал, который усиливается за счет резонанса в резонансном контуре, образованным проводящими обкладками единого конструкторско-технологического компонента, рассчитанного и изготовленного для работы в режиме резонанса. Использование двухсекционного единого конструкторско-технологического компонента позволяет получить большее напряжение (определяемое добротностью резонансного контура) и снизить массу и габариты существующих установок. Вторая секция многофункционального компонента будет использоваться в качестве конденсатора [15]. Конденсатор после накопления энергии будет отдавать на разряд для образования гидроудара.

В процессе исследования установки электрогидравлической обработки водных растворов была построена амплитудно-частотная характеристика коэффициента усиления по напряжению.

Коэффициент усиления напряжения на обкладках многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) вычисляется как отношение напряжения на нагрузке к напряжению от источника питания МИЭК:

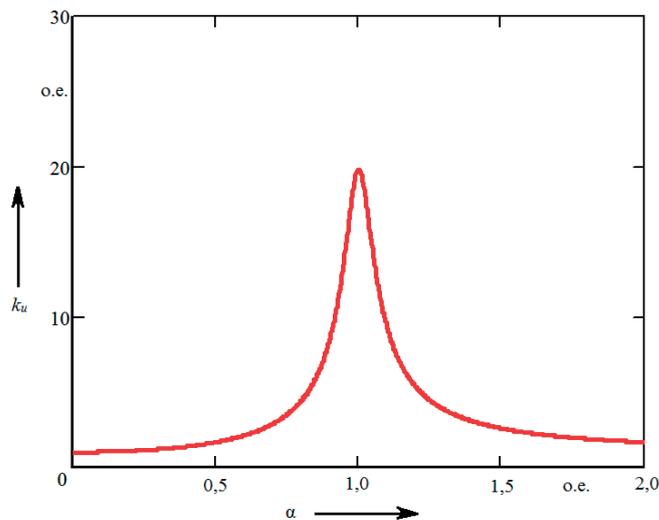
$$k_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  — напряжение на нагрузке;

$U_{\text{ВХ}}$  — напряжение на источнике питания.

На рисунке 3 представлен график зависимости коэффициента усиления на МИЭК в составе установки для электрогидравлической обработки водных растворов от частоты в относительных единицах. Из графика видно, что МИЭК позволяет в 20 раз увеличить напряжение на выходе в режиме резонанса.

В результате проведения исследований авторами предложена схема питания для электротехнологической установки обработки водных растворов. Замещение однофазного повышающего трансформатора и конденсатора в существующей схеме установки на многофункциональный компонент, который будет выполнять их функции, позволит уменьшить массогабаритные показатели и повысит суммарное КПД установки. Благодаря замене, описанной



**Рисунок 3.** Амплитудно-частотная характеристика коэффициента усиления по напряжению

**Figure 3.** Amplitude-frequency characteristic of coefficient voltage gain

ранее, процесс обработки растворов позволит экономить потребление электроэнергии и снизить затраты на эксплуатацию оборудования; будет поддерживаться требуемый уровень напряжения на выходе, КПД заряда конденсатора на основе многофункционального компонента будет максимальным.

### Выводы

В результате исследований авторами предложен эффективный вариант источника питания для установки электрогидроимпульсной обработки водных растворов в сельскохозяйственной промыш-

ленности. Приведена схема устройства питания на основе многофункционального компонента, представляющего собой конденсатор и повышающий трансформатор в одном конструкторско-технологическом виде. Замена существующих источников питания на источники питания, построенные на основе многофункциональных интегрированных компонентов, позволит повысить надежность и эффективность электро-технологической установки.

### Список источников

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
2. Held M. Similarities of Shock Wave Damage in Air and in Water // *Propellants, Explos., Pyrotechn.* 1990. Vol. 15. No. 4. P. 149-156.
3. Legowski Z., Wlodarczyk E. Acoustic Theory of Shock Waves in Perfect Gas // *J. Techn. Phys.* 1988. Vol. 29. No. 3-4. P. 365-375.
4. Ким К.К. Использование электрогидроимпульсного эффекта в железнодорожной отрасли. Саратов, 2019. 203 с.
5. Булкаирова Г.А., Айтпаева З.К., Дюсембаева А.Н., Тлеубергенова А.Ж., Токтаболат Г. Исследование влияния электрогидроимпульсных ударных волн на дробление природного минерала кварца // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана.* 2017. № 1. С. 86-90.
6. Сакипова С.Е., Ахмерова К.Е., Кусаинова А.К. Влияние электрогидроимпульсного разрушения и дробления на структуру и свойства природных материалов // *Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. матер. VII Междунар. конф.* 2017. С. 696-698.
7. Kusaiynov K., Sakipova S.E., Satybalidin N.M. Dynamics of Pulsed Electric Discharge Development in the Heterogeneous Environment // *Eurasian Physical Technical Journal.* 2006. Vol. 3, No. 1 (5). P. 31-34.
8. Кусаинов К., Нусупбеков Б.Р., Сакипова С.Е., Хасенов А.К. и др. Электроимпульсный способ избирательного разрушения материалов в жидкой среде // *Инновационный Патент РК, № 12-3/3737 от 31.07.2014.*
9. Kussaiynov K., Sakipova S.E., Nussupbekov B.R., Khasenonov A.K., Akhmerova K.E. Electro-Pulse Processing Metal Containing Raw Materials for Extraction of Valuable Components // *International Scientific Colloquium «Modeling for Electromagnetic Processing — MEP».* 2014, Hannover, P. 289-295.
10. Кусаинов К., Хасенов А.К., Сакипова С.Е. Радиационно-термические явления и гидромеханические эффекты, сопровождающие электрический разряд в многокомпонентных неорганических средах // *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2013. Т. 56. № 1-2. С. 126-128.
11. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Исследование разрядной цепи электрогидроимпульсной очистительной системы // *Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: сб. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, 27–29 сентября 2017.* Альметьевск: Изд-во АГНИ, 2017. С. 74-80.
12. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Математическое моделирование электрогидроимпульсной очистительной системы // *Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сб. матер. I Всеросс. науч. конф., 12–14 декабря 2017.* Тольятти: Изд-во Тольяттинского государственного университета, 2017. Т. 1. С. 320-328.
13. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Исследование циклического перезаряда электрогидроимпульсной очистительной системы //

Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2017. Вып. 4. С. 258-263.

14. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Электрогидроимпульсная очистительная система с индуктивно-емкостным преобразователем // Булатовские чтения: сб. матер. II Междунар. науч.-практ. конф., 31 марта 2018. Краснодар: Издательский Дом — Юг, 2018. Т. 6. С. 242-245.

15. Хазиева Р.Т., Тимерьянов А.З. Электрогидроимпульсная очистительная система на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф., 14–17 апреля 2021. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. С. 106-111.

### References

1. Yutkin L.A. *Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic Effect and Its Application in Industry]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 253 p. [in Russian].

2. Held M. Similarities of Shock Wave Damage in Air and in Water. *Propellents, Esplos., Pyrotechn.*, 1990, Vol. 15, No. 4, pp. 149-156.

3. Legowski Z., Wlodarczyk E. Acoustic Theory of Shock Waves in Perfect Gas. *J. Techn. Phys.*, 1988, Vol. 29, No. 3-4, pp. 365-375.

4. Kim K.K. *Ispol'zovanie elektrogidroimpul'snogo effekta v zheleznodorozhnoi otrasli* [The Use of Electrohydroimpulse Effect in the Railway Industry]. Saratov, 2019. 203 p. [in Russian].

5. Bulkaïrova G.A., Aitpaeva Z.K., Dyusembaeva A.N., Tleubergenova A.Zh., Toktabolat G. Issledovanie vliyaniya elektrogidroimpul'snykh udarnykh voln na drobleniye prirodnoho minerala kvartsa [Investigation of the Effect of Electrohydroimpulse Shock Waves on the Crushing of the Natural Quartz Mineral]. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana — Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan*, 2017, No. 1, pp. 86-90. [in Russian].

6. Sakipova S.E., Akhmerova K.E., Kusaiynova A.K. Vliyanie elektrogidroimpul'snogo razrusheniya i drobleniya na strukturu i svoystva prirodnykh materialov [Influence of Electrohydroimpulsive Destruction and Crushing on the

Structure and Properties of Natural Materials]. *Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoi konferentsii «Deformatsiya i razrusheniye materialov i nanomaterialov»*. [Proceedings of the VII International Conference «Deformation and Destruction of Materials and Nanomaterials»]. 2017, pp. 696-698. [in Russian].

7. Kusaiynov K., Sakipova S.E., Satybal'din N.M. Dynamics of Pulsed Electric Discharge Development in the Hetero-geneous Environment. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2006, Vol. 3, No. 1 (5), pp. 31-34.

8. Kusaiynov K., Nusupbekov B.R., Sakipova S.E., Khasenov A.K. e.a. *Elektroimpul'snyi sposob izbiratel'nogo razrusheniya materialov v zhidkoi srede* [Electro-Pulse Method of Selective Destruction of Materials in a Liquid Medium]. Innovation Patent of the Republic of Kazakhstan, No. 12-3/37 dated 31.07.2014. [in Russian].

9. Kussaiynov K., Sakipova S.E., Nussupbekov B.R., Khasenov A.K., Akhmerova K.E. Electro-Pulse Processing Metal Containing Raw Materials for Extraction of Valuable Components [Electro-Pulse Processing Metal Containing Raw Materials for Extraction of Valuable Components.] *International Scientific Colloquium «Modeling for Electromagnetic Processing» (MEP–2014)*. [International Scientific Colloquium «Modeling for Electromagnetic Processing» (MEP–2014). 2014, Hannover, pp. 289-295.

10. Kusaiynov K., Khasenov A.K., Sakipova S.E. Radiatsionno-termicheskie yavleniya i gidromekhanicheskie efekty, soprovozhdayushchie elektricheskii razryad v mnogokomponentnykh neorganicheskikh sredakh [Radiation-Thermal Phenomena and Hydromechanical Effects Accompanying an Electric Discharge in Multicomponent Inorganic Media]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika — Izvestia of Higher Educational Institutions. Physics*, 2013, Vol. 56, No. 1-2, pp. 126-128. [in Russian].

11. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Issledovanie razryadnoi tsepi elektrogidroimpul'snoi ochistitel'noi sistemy [Investigation of the Discharge Circuit of an Electrohydroimpulse Purification System]. *Sbornik Mezhdunarodnoi nauchno-prak-ticheskoi konferentsii molodykh uchennykh «Energiya molodezhi dlya neftegazovoi industrii»*, September 27–29, 2017. [Collection of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Youth Energy for the Oil and Gas Industry», 27–29 sentyabrya 2017.

Al'met'evsk, Izd-vo AGNI, 2017, pp. 74-80. [in Russian].

12. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Matematicheskoe modelirovanie elektrogidroimpul'snoi ochistitel'noi sistemy [Mathematical Modeling of Electrohydroimpulse Purification System]. *Sbornik materialov I Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: podkhody, metody, resheniya», 12–14 dekabrya 2017.* [Collection of Materials of the I All-Russian Scientific Conference «Information Technologies in Modeling and Management: Approaches, Methods, Solutions», December 12–14, 2017]. Tol'yatti, Izd-vo Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017, Vol. 1, pp. 320-328. [in Russian].

13. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Issledovanie tsiklicheskogo perezaryada elektrogidroimpul'snoi ochistitel'noi sistemy [Investigation of Cyclic Recharge of Electrohydroimpulse Purification System]. *Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov «Energeticheskie i Elektrotekhnicheskie Sistemy».* [International Collection of Scientific Papers «Energy and Electrical Systems»]. Magnitogorsk, Izd-vo Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, 2017, Issue 4, pp. 258-263. [in Russian].

14. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Elektrogidroimpul'snaya ochistitel'naya sistema s induktivno-emkostnym preobrazovatelem [Electrohydroimpulse Purification System with an Inductive-Capacitive Converter]. *Sbornik materialov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bulatovskie chteniya», 31 marta 2018.* [Collection of Materials of the II International Scientific and Practical Conference «Bulatov Readings», March 31 2018. Krasnodar, Izdatel'skii Dom — Yug, 2018, Vol. 6, pp. 242-245. [in Russian].

15. Khazieva R.T., Timer'yanov A.Z. Elektrogidroimpul'snaya ochistitel'naya sistema na osnove mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta [Electrohydroimpulse Cleaning System Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Sbornik nauchnykh trudov VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii», 14–17 aprelya 2021.* [Collection of Scientific Papers of the VI International Scientific and Technical Conference «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises», April 14–17 2021]. Ufa, UGNTU Publ., 2021, pp. 106-111. [in Russian].



**Гульназ Ержановна Димукашева**

**Gulnaz E. Dimukasheva**

студент кафедры

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



**Булат Ринатович Зекрин**

**Bulat R. Zekrin**

студент кафедры

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



**Роман Вячеславович Кириллов**

**Roman V. Kirillov**

доцент базовой кафедры «Электроэнергетика  
и электротехнологии» в составе «Электротехника  
и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Дмитрий Сергеевич Стрельников**

**Dmitry S. Strelnikov**

студент кафедры

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



**Регина Тагировна Хазиева**

**Regina T. Khazieva**

кандидат технических наук, доцент кафедры

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

УДК 620.92

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-13-22

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДА МАГИСТРАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

### Актуальность

Актуальной и значимой становится в наши дни проблема экономии потребления электроэнергии. Большое количество электродвигателей эксплуатируются неэкономично ввиду малоэффективной системы регулирования или её отсутствия. Большинство из этих двигателей используются для магистральных насосных агрегатов. Использование современных технологий частотно-регулируемого электропривода позволяет сэкономить не менее 20 % электроэнергии по сравнению с классическими методами регулирования и повысить устойчивость электродвигателя.

**Цель исследования**

В данной статье анализируется устойчивость частотно-регулируемого магистрального насосного агрегата при провалах питающего напряжения. Целью работы является анализ устойчивости при провалах напряжения и условий самозапуска электродвигателя при восстановлении напряжения. Для достижения цели произведена оценка статической и динамической устойчивости асинхронного двигателя, влияния напряжения питания асинхронного двигателя на его устойчивость по результатам математического моделирования.

**Методы исследования**

В данном исследовании были использованы следующие методы: изучение научной литературы, компьютерное моделирование, выполненное в программном комплексе Matlab/Simulink.

**Результаты**

Авторами осуществляется анализ устойчивости частотно-регулируемого асинхронного привода магистрального насосного агрегата, где в процессе исследования показано, что устойчивость работы преобразователя частоты и привода чувствительна к провалам напряжения в сети питания. Компьютерная модель исследуемого объекта разработана в программном комплексе Matlab/Simulink. В результате моделирования получены осциллограммы угловой скорости ротора.

**Ключевые слова:** электропривод, магистральный насос, асинхронный двигатель, частотное регулирование, преобразователь частоты, математическая модель, коэффициент полезного действия

## ANALYSIS OF STABILITY OF A THE VARIABLE-FREQUENCY DRIVES OF THE MAIN PUMPS

**Relevance**

The problem of saving electricity consumption is becoming a topical and important issue nowadays. A large number of electric motors are operated irrationally due to inefficient or non-existent control systems. Most of these motors are used for mainline pumping units. The use of modern technologies of frequency-controlled electric drive makes it possible to save at least 20% of electric power in comparison with classical methods of regulation and increase the electric motor stability.

**Aim of research**

The stability of a frequency-controlled main pumping unit in case of supply voltage failures is analyzed. The aim of the work is to analyze the stability in case of voltage dips and the conditions for self-starting of the electric motor during voltage recovery. To achieve this aim, there was made an assessment of the static and dynamic stability of an asynchronous motor, the influence of the supply voltage of an asynchronous motor on its stability according to the results of mathematical modeling.

**Research methods**

In this study, the following methods were used: a study of the scientific literature, computer simulation performed in the Matlab/Simulink software package.

**Results**

The authors analyze the stability of the frequency-controlled asynchronous drive of the main pump unit, where in the process of research it is shown that the stability of the frequency converter and drive is sensitive to voltage dips in the supply network. The computer model of the investigated object was developed in the Matlab/Simulink software package. As a result of modeling the oscillograms of angular velocity of the rotor were obtained.

**Keywords:** electric drive, main pump, induction motor, frequency regulation, frequency converter, mathematical model, efficiency

Асинхронные электродвигатели (АД), составляющие большую часть электрических машин на сегодняшний день, используются как основные преобразователи электрической энергии в механическую. Доля асинхронных двигателей составляет большую часть от числа всех электродвигателей, выпускаемых промышленностью, также они составляют подавляющую часть промышленной нагрузки. Из-за своих высоких механических и эксплуатационных характеристик, больших значений КПД и низкой стоимости асинхронные электродвигатели получили такое широкое распространение. Большое практическое значение имеет анализ условий для поддержания стабильной работы электропривода [1].

Из-за нарушений устойчивой работы электрических машин нарушается работа технологических процессов. Это приводит к тяжелым последствиям, устранение которых занимает много времени и сил оперативного персонала. Поэтому вопросу обеспечения достаточного уровня устойчивости при проектировании и при их эксплуатации необходимо уделять большое внимание.

Актуальной и значимой становится в наши дни проблема экономии потребления электроэнергии. Большое количество электродвигателей эксплуатируются нерационально ввиду малоэффективной системы регулирования или её отсутствия. Большинство из этих двигателей используются для магистральных насосных агрегатов. Использование современных технологий частотно-регулируемого электропривода позволяет сэкономить не менее 20 % электроэнергии по сравнению с классическими методами регулирования [2].

В данной статье рассматривается поведение частотно-регулируемого магистрального насосного агрегата при возмущениях в системе электроснабжения и

определение параметров электропривода, влияющих на устойчивость работы.

В работе поставлена цель исследовать статическую и динамическую устойчивость АД магистрального насосного агрегата и влияние напряжения на устойчивость АД.

Для достижения цели решаются задачи:

- исследование и анализ статической и динамической устойчивости АД;
- исследование влияния частоты питающего напряжения на характер изменения скорости вращения, электромагнитного момента и тока одной фазы статора электродвигателя при снижении напряжения в питающей сети.

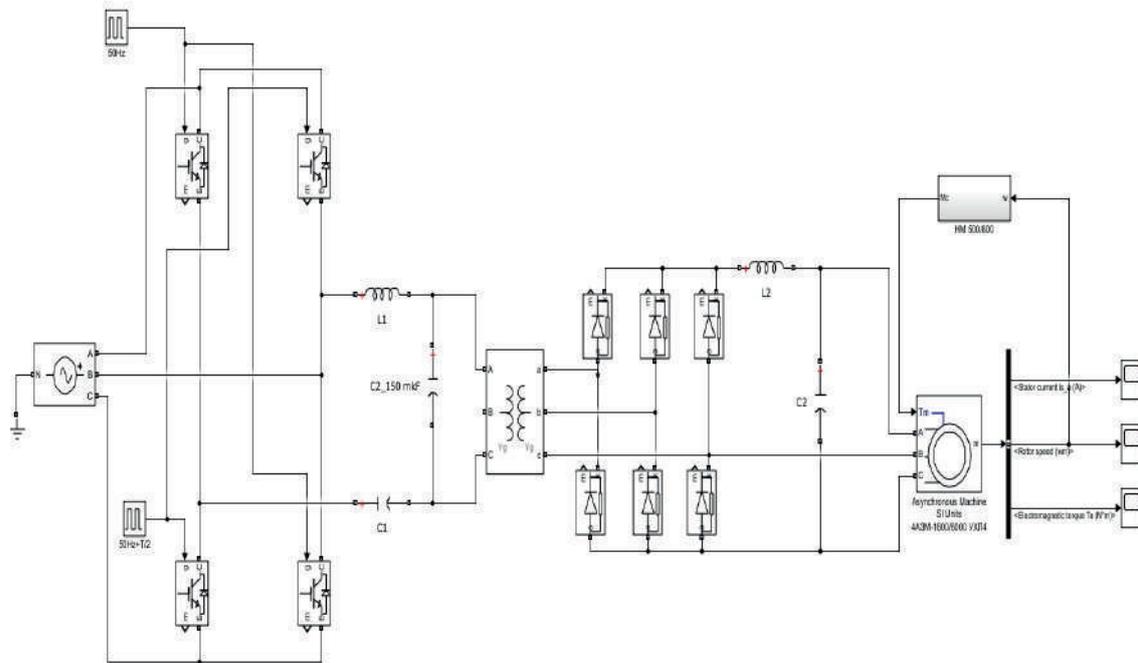
Для исследования устойчивости был рассмотрен режим работы электропривода с частотой  $f = 50$  Гц.

Модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода магистрального насосного агрегата, построенная в среде Simulink пакета MatLab [3], с помощью которой была исследована устойчивость при исчезновении напряжения, изображена на рисунке 1.

Модель содержит: трехфазный программируемый источник напряжения, неуправляемый выпрямитель, низкочастотный фильтр — LC фильтр, IGBT инвертор, управляющийся ШИМ-генератором импульсов, модель электродвигателя и блок, в котором реализована модель насоса относительно момента сопротивления на валу приводного двигателя [4].

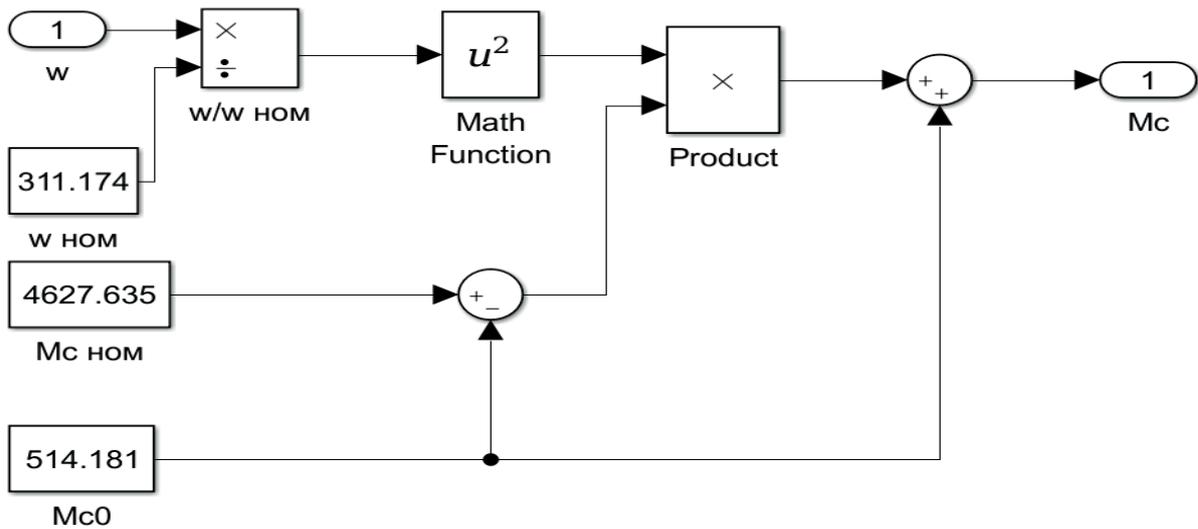
Модель насоса относительно создаваемого им момента сопротивления на валу приводного двигателя представлена на рисунке 2.

В окне настроек блока Three-Phase Programmable Voltage Source был задан период исчезновения напряжения  $U = 0$  с 10 по 16 с с последующим его восстановлением до значения  $0,5U_{ном}$ .



**Рисунок 1.** Модель высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода

**Figure 1.** Model of high voltage frequency-controlled asynchronous electric drive



**Рисунок 2.** Модель насоса относительно момента сопротивления

**Figure 2.** Model of the pump with respect to the drag torque

В окне настройки данных блока Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units были заданы параметры, которые были получены в результате расчетов схемы замещения асинхронной машины, схема замещения приведена на рисунке 3 [5].

Существуют два принципа, позволяющих управлять частотными преобразователями — скалярный и векторный.

*Скалярный* — это принцип управления, который изменяет значения амплитуды и питающего напряжения по следующему закону:

$$\frac{U}{f^n} = const, \quad (1)$$

где  $n \geq 1$ .

Преимущества данного способа — это доступность и простота в реализации частотного управления.

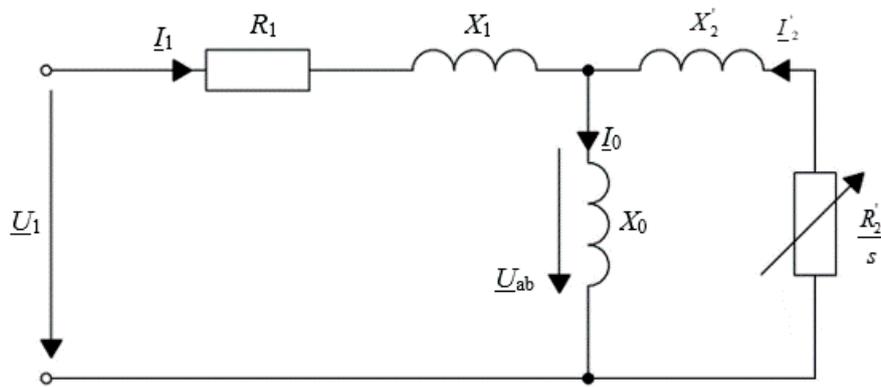


Рисунок 3. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Figure 3. T-chart of asynchronous motor substitution

*Векторный принцип* — это принцип, который позволяет максимально приблизить параметры асинхронного электропривода к характеристикам привода постоянного тока. Достигается данная особенность благодаря разделению каналов регулирования потокосцепления и скорости вращения электродвигателя.

Для регулирования скорости АД используется скалярное частотное регулирование, которое является наиболее целесообразным, эффективным и перспективным способом регулирования для турбомеханизмов. При частотном регулировании, с целью поддержания постоянства магнитного потока, при одновременном изменении частоты необходимо изменять напряжение в следующем соотношении  $U/f^2 = \text{const}$  (закон частотного управления для вентиляторной нагрузки).

Механическая характеристика магистрального насоса имеет сложную форму с падающим участком. Рабочий участок механической характеристики магистрального насоса может быть описан уравнением:

$$M_C = M_{C0} + (M_{C,\text{ном}} - M_{C0}) \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (2)$$

где  $M_{C,\text{ном}}$  — момент сопротивления производственного механизма при номинальной угловой скорости вращения вала;

$M_{C0}$  — момент сопротивления от трения в движущихся частях производственного механизма;

$\omega$  — угловая скорость турбомеханизма;

$\omega_{\text{ном}}$  — номинальная угловая скорость вращения вала [6].

Асинхронный двигатель при медленно изменяющемся возмущении постепенно нагружается до значения опрокидывающего момента.

Предельное снижение скорости вращения электродвигателей — до границы опрокидывания — может определяться величиной критического скольжения. В этом случае может быть применен обычный критерий устойчивости асинхронного электродвигателя:

$$\frac{dM_D}{ds} > 0 \text{ при } M_c = \text{const} \quad (3)$$

или

$$\frac{dM_D}{ds} - \frac{dM_c}{ds} > 0 \text{ при } M_c = M_c(n), \quad (4)$$

где  $M_D$  — вращающий момент электродвигателя;

$M_c$  — сопротивление на валу электродвигателя.

Эти неравенства означают, что при снижении напряжения режим работы электродвигателя должен сохраняться на устойчивой части его механической характеристики.

Величина опрокидывающего момента асинхронного электродвигателя зависит от напряжения и частоты:

$$M_{\text{max}}(U, f) = M_{\text{max}} \left( \frac{U}{f} \right)^2, \quad (5)$$

где  $M_{\text{max}}$  — кратность опрокидывающего момента электродвигателя при номинальных значениях напряжения и частоты.

На основании этой зависимости и критерия устойчивости можно определить допустимый провал напряжения по условию сохранения устойчивой работы включенных электродвигателей:

$$\Delta U_{max} \leq \left(1 - f \sqrt{\frac{M_{с.кр}}{M_{max}}}\right) 100 \%, \quad (6)$$

где  $M_{с.кр}$  — момент сопротивления на валу электродвигателя при критическом скольжении для вентиляторного момента.

Указанный критерий определяет устойчивость работы всей электроустановки в целом, ибо если электродвигатели в процессе затормаживания достигнут критический скольжений, то полные их сопротивления и коэффициент мощности резко уменьшатся, и ток в цепи питания возрастет [7].

При быстром изменении возмущения динамический момент  $J \frac{d\omega}{dt}$  алгебраически складывается с электромагнитным моментом двигателя [8].

Инерция (запасенная системой энергия) также имеет большое влияние на работу привода.

Для анализа устойчивости и режима работы двигателя при возмущении в питающей сети сравниваются значения вращающего электромагнитного момента двигателя и тормозного статического момента механизма [9].

В случае если электромагнитный момент двигателя больше тормозного статического момента механизма, то возникает положительный динамический момент, что приведет к дальнейшему возрастанию скорости, пока не наступит установившийся режим.

В другом варианте, если электромагнитный момент двигателя меньше тормозного статического момента механизма, то возникает отрицательный динамический момент, он будет противодействовать движению привода, будет наблюдаться снижение скорости, и двигатель будет тормозить, пока не наступит установившийся режим [10].

Двигатель работает устойчиво, если он вернулся в изначальное состояние после прекращения возмущения в сети [11].

В начальный момент времени  $t = 0$  с осуществляется запуск электродвигателя. При этом он плавно и быстро разгоняется до номинальной скорости вращения и в момент времени  $t = 4$  с выходит на номинальный режим работы, который длится на промежутке времени с 4 по 10 с. В период времени  $t = 10$  с происходит исчезновение напряжения.

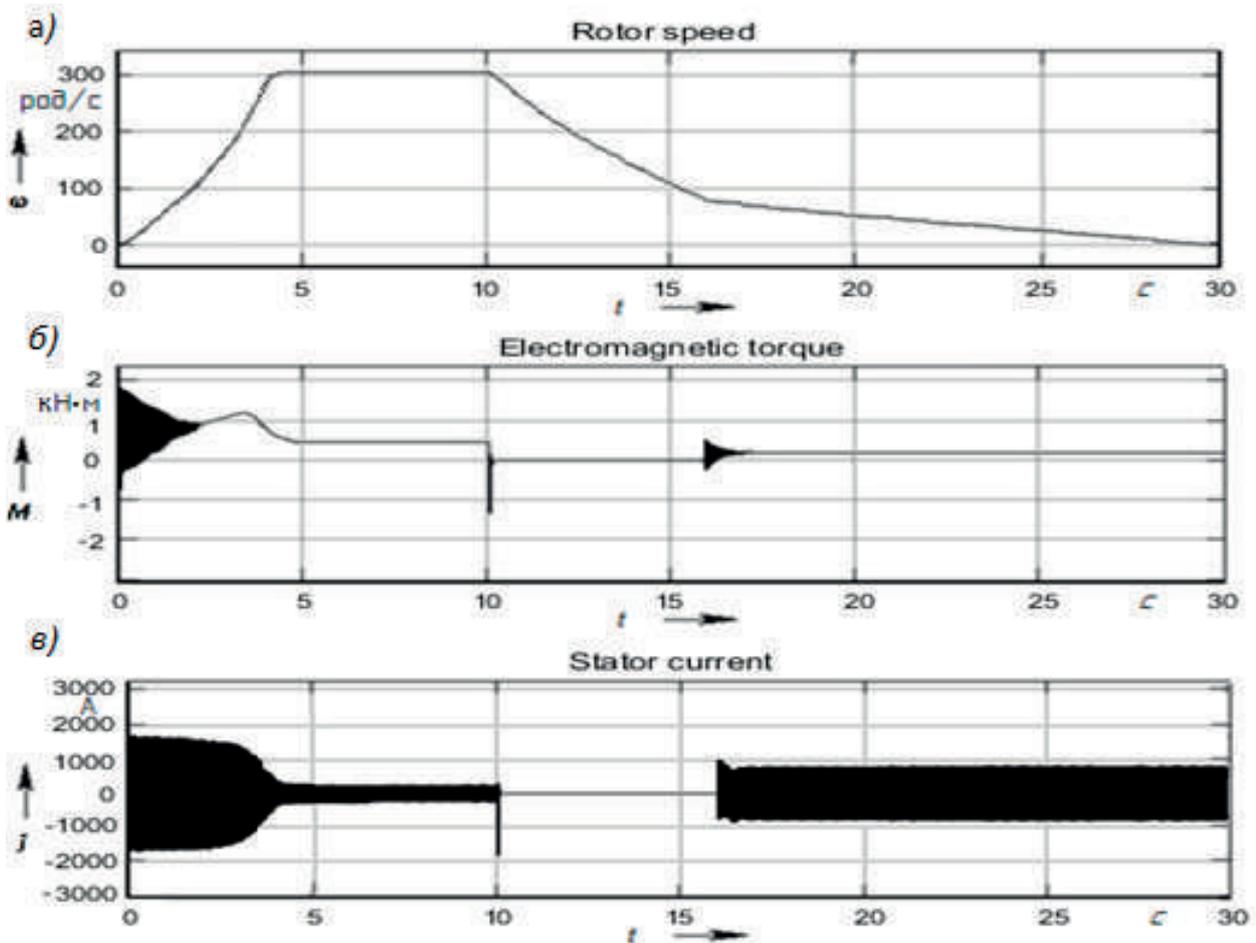
На рисунке 5 представлены полученные в результате моделирования осциллограммы угловой скорости ротора, электромагнитного момента и тока одной фазы статора при исчезновении напряжения с 10 по 16 с и с последующим его восстановлением до 50 % от номинального значения (рисунок 6).

Как видно из графика угловой скорости ротора (рисунок 5, а), при исчезновении питания в момент времени  $t = 10$  с значение скорости снижается до нуля, так как появился тормозной момент, под действием которого двигатель начинает процесс торможения.

Электромагнитный момент сохраняет постоянство за счёт установившихся значений напряжения за исключением временного интервала электромагнитных переходных процессов (рисунок 5, б) и восстанавливается до значения 1 кН·м в момент времени  $t = 16$  с.

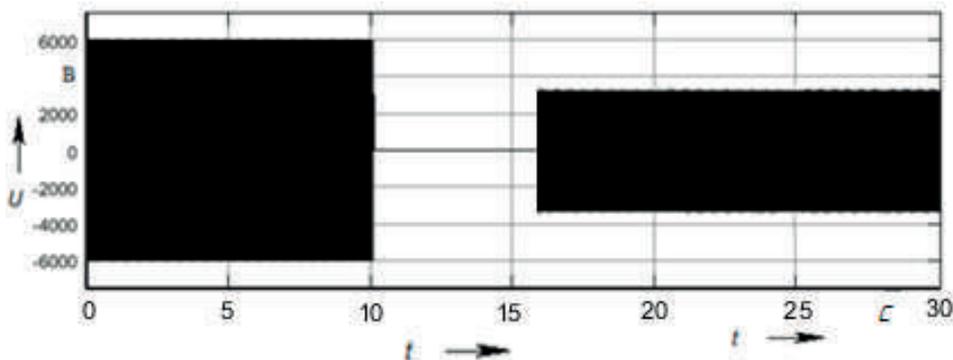
В результате исследования было выявлено, что при восстановлении напряжения до  $0,5U_{ном}$  в момент времени  $t = 16$  с в АД происходят броски тока.

При исчезновении напряжения в момент времени  $t = 16$  с случилось опрокидывание двигателя, потому что значение скольжения  $s$  при торможении оказалось больше значения предельного скольжения  $s_{пр}$ . Следовательно, момент сопротивления механизма стал больше максимального момента двигателя и появился отрицательный динамический момент —  $\Delta M_{дин}$ , само-



**Рисунок 5.** Осциллограммы при исчезновении напряжения: угловой скорости ротора (а), электромагнитного момента (б), тока одной фазы статора (с)

**Figure 5.** Oscillograms when the voltage disappears: of rotor angular velocity (а), of electromagnetic torque (б), of current of one stator phase (с)



**Рисунок 6.** Осциллограмма напряжения в сети 6 кВ при исчезновении напряжения и его восстановления до 50 %

**Figure 6.** Oscillogram of voltage in 6 kV network during voltage loss and its recovery up to 50 %

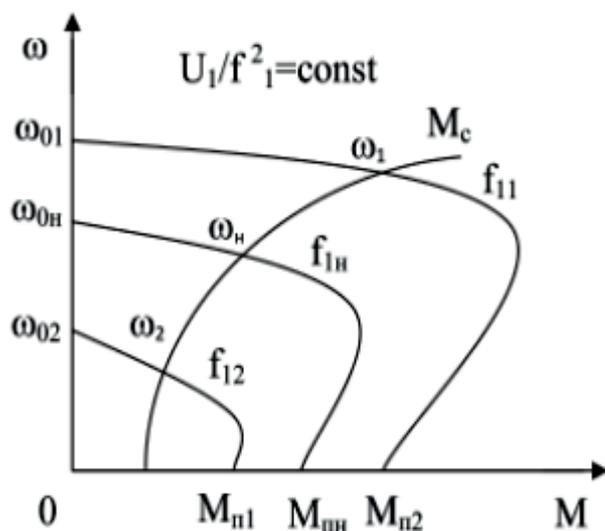
запуск не был обеспечен. В реальных условиях это могло бы привести к нарушению технологического процесса. Двигатель не вернулся в исходное состояние

после прекращения воздействия, значит он работает неустойчиво.

При выбеге возможно использование динамического торможения, которое в

отличие от режима свободного выбега, когда торможение осуществляется лишь за счет момента статического сопротивления, характеризуются появлением тормозных моментов, за счет которых остановка двигателя происходит за более короткое время [12–16]. Но в данной работе такой вид торможения не применяется и не рассматривается, так как целью данной работы является анализ устойчивости электродвигателя [17].

На рисунке 7 видно, что чем ниже частота напряжения, питающего электродвигатель, тем ниже относительное снижение скорости вращения двигателя за время исчезновения напряжения. Потери мощности при частотном регулировании невелики, поскольку не сопровождаются увеличением скольжения. Получаемые при этом механические характеристики



**Рисунок 7.** Механические характеристики асинхронного электродвигателя для нагрузки вентиляторного характера

**Figure 7.** Mechanical characteristics of asynchronous electric motor for fan load

#### Список источников

1. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2007. С. 101–102.
2. Проектирование систем частотного регулирования: каталог. М.: Dandoss, 2012. 4 с.

обладают высокой жесткостью. Следовательно, преобразователь частоты повышает устойчивость работы электропривода и магистрального насоса, что является преимуществом при обеспечении бесперебойности технологического процесса.

#### Выводы

В процессе исследования показано, что устойчивость работы преобразователя частоты и привода чувствительна к провалам напряжения в сети питания. Устойчивость также зависит от режима работы привода, при котором происходит провал напряжения. С уменьшением потребляемой мощности возрастает устойчивость привода.

Был сделан вывод, что вопрос обеспечения устойчивости асинхронного двигателя имеет большое значение, так как нарушение технологического процесса по причине аварии, вызванное нарушением устойчивости работы электрических машин, приводит к серьёзным последствиям, на ликвидацию которых затрачивается большое количество времени. Также данный вопрос актуален не только для магистральных насосных агрегатов, но и для поршневых и газопоршневых насосов.

Восстановление напряжения должно быть таким, чтобы значение скольжения при затормаживании оказалось меньше значения предельного скольжения. Также следует не допускать появления отрицательного динамического момента, в таком случае будет обеспечен самозапуск электродвигателя.

3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

4. Горюнов В.Н., Хацевский К.В., Шагаров А.А., Шагаров Д.А. Исследование влияния полупроводниковых преобразователей на питающую сеть на основе математических моделей

// Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 125–126.

5. Радин В.И. Электрические машины: Асинхронные машины. М.: Высш. шк., 1988. С. 98–101.

6. Епифанов А.П. Основы электропривода. СПб.: Лань, 2009. 192 с.

7. Коломиец А.П. Электропривод и электрооборудование. М.: КолосС, 2007. 328 с.

8. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.

9. Tong W. Mechanical Design of Electric Motors. Radford, CRC Press Publ., 2017. P. 321–322.

10. Paul C., Oleg W., Scott D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Radford, Wiley-IEEE Press Publ., 2002. P. 407–408.

11. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. С. 32–33.

12. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АКАДЕМА, 2004. 202 с.

13. Коломиец А.П. Электропривод и электрооборудование. М.: КолосС, 2007. 328 с.

14. Усольцев А.А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 164 с.

15. Воронин П.А. Системы управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода: методические указания по курсу «Системы управления электроприводов». Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2011. 51 с.

16. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: АКАДЕМА, 2006. 265 с.

17. Димукашева Г.Е., Стрельников Д.С., Зекрин Б.Р., Хазиева Р.Т. Изучение устойчивости работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода магистрального насосного агрегата // Булатовские чтения: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 275–280.

## References

1. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. *Avtomatizirovannyi elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov* [Automated Electric Drive of Typical Production Mechanisms and Technological Complexes]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, pp. 101–102. [in Russian].

2. *Proektirovanie sistem chastotnogo regulirovaniya: catalog* [Design of Frequency Control

Systems: Catalog]. Moscow, Dandoss Publ., 2012. 4 p. [in Russian].

3. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ.; Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. [in Russian].

4. Goryunov V.N., Khatsevskii K.V., Shagarov A.A., Shagarov D.A. *Issledovanie vliyaniya poluprovodnikovyykh preobrazovatelei na pitayushchuyu set' na osnove matematicheskikh modelei* [Investigation of the Effect of Semiconductor Converters on the Power Supply Network Based on Mathematical Models]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Herald*, 2013, No. 2 (120), pp. 125–126. [in Russian].

5. Radin V.I. *Elektricheskie mashiny: Asinkhronnye mashiny* [Electric Machines: Asynchronous Machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, pp. 98–101. [in Russian].

6. Epifanov A.P. *Osnovy elektroprivoda* [Fundamentals of Electric Drive]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2009. 192 p. [in Russian].

7. Kolomiets A.P. *Elektroprivod i elektrooborudovanie* [Electric Drive and Electrical Equipment]. Moscow, KolosS Publ., 2007. 328 p. [in Russian].

8. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoichivosti elektricheskikh system* [Stability Issues of Electrical Systems]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 456 p. [in Russian].

9. Tong W. *Mechanical Design of Electric Motors*. Radford, CRC Press Publ., 2017, pp. 321–322.

10. Paul C., Oleg W., Scott D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Radford, Wiley-IEEE Press Publ., 2002. P. 407–408.

11. Chilikin M.G. *Obshchii kurs elektroprivoda* [General Course of Electric Drive]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, pp. 32–33. [in Russian].

12. Braslavskii I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushchii asinkhronnyi elektroprivod* [Energy-Saving Asynchronous Electric Drive]. Moscow, АКАДЕМА Publ., 2004. 202 p. [in Russian].

13. Kolomiets A.P. *Elektroprivod i elektrooborudovanie* [Electric Drive and Electrical Equipment]. Moscow, KolosS Publ., 2007. 328 p. [in Russian].

14. Usol'tsev A.A. *Sovremennyyi asinkhronnyi elektroprivod optikomekhanicheskikh kompleksov* [Modern Asynchronous Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes]. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 2011. 164 p. [in Russian].
15. Voronin P.A. *Sistemy upravleniya chastotnoreguliruemogo asinkhronnogo elektroprivoda: metodicheskie ukazaniya po kursu «Sistemy upravleniya elektroprivodov»* [Control Systems of Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drive: Methodological Guidelines for the Course «Control Systems of Electric Drives»]. Orenburg, IPK GOU OGU, 2011. 51 p. [in Russian].
16. Sokolovskii G.G. *Elektroprivody peregannogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Alternating Current Electric Drives with Frequency Control]. Moscow, ACADEMA Publ., 2006. 265 p. [in Russian].
17. Dimukasheva G.E., Strel'nikov D.S., Zekrin B.R., Khazieva R.T. *Izuchenie ustoychivosti raboty chastotno-reguliruemogo asinkhronnogo elektroprivoda magistral'nogo nasosnogo agregata* [Studying the Stability of the Operation of a Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drive of the Main Pumping Unit]. *Sbornik statei IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bulatovskie chteniya»* [Collection of Articles of the IV International Scientific and Practical Conference «Bulatov Readings»]. 2020, pp. 275–280. [in Russian].



**Флюр Рашитович Исмагилов**  
**Flyur R. Ismagilov**

доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия



**Ильгиз Флюсович Янгиров**  
**Ilgiz F. Yangirov**

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия



**Рузил Ахнафович Сафиуллин**  
**Ruzil A. Safiullin**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры технических дисциплин,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Нефтекамский филиал,  
Нефтекамск, Россия



**Айгуль Рафисовна Аюпова**  
**Augul R. Auyrova**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры математического  
моделирования и информационной безопасности,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Нефтекамский филиал,  
Нефтекамск, Россия



**Гульнара Фриловна Сафина**  
**Gulnara F. Safina**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры математического  
моделирования и информационной безопасности,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Нефтекамский филиал,  
Нефтекамск, Россия

УДК 621.313.13:621.314.571.00.24

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-23-34

## ИМПУЛЬСНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ ДВУХСПИРАЛЬНОГО МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

### Актуальность

В работе предлагается оригинальная конструкция высоковольтного электромеханического двухспирального источника напряжения на базе магнитокумулятивного генератора (МКГ) и умножителя напряжений с улучшенными характеристиками. В умножителе с помощью специальных переключений осуществляется сложение всех напряжений, возникающих при электрическом взрыве проводников в отдельных индуктивных накопителях энергии, подсоединенных параллельно к МКГ.

Представлены математическая модель и результаты математического моделирования работы источника напряжения, расчетные соотношения найдут применение для практического электроэнергетического использования. В ходе выполнения работы использованы методы теории электрических цепей, магнитного поля, элементы математического анализа и теория электрических колебательных процессов (биения, резонанса и т.д.) в сложных электрических контурах. В результате получено соотношение, определяющее максимальное значение частоты биений между двумя электрическими контурами, связанными слабой емкостной связью, создание магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ-излучением и с возможностью его регулирования. Результаты работы найдут применение в энергетике (установка для борьбы с гололедом, шунтирующий реактор для повышения коэффициента мощности и т.д.), машиностроении, медицине (кардиология), военной технике и т.д. В дальнейшем планируется использование полученных результатов работы МКГ по направлению изучения применения импульсного электромагнитного поля для обезвоживания и обессоливания нефти, что приведет к повышению эффективности действующих установок на нефтегазовых предприятиях.

#### **Цели исследования**

Разработка конструкции высоковольтного электромеханического двухспирального источника напряжения на базе магнитокумулятивного генератора и умножителя напряжений с улучшенными характеристиками, теоретическое и экспериментальное исследования с последующими выводами и рекомендациями.

Исследования предлагаемого двухспирального магнитокумулятивного генератора и разработка мероприятий для его дальнейшего промышленного применения.

#### **Методы исследования**

Методы математического моделирования, исследования и испытания техники высокого напряжения.

#### **Результаты**

Предложена опытная конструкция высоковольтного электромеханического двухспирального источника напряжения на базе магнитокумулятивного генератора и умножителя напряжений с улучшенными техническими характеристиками. На базе созданной математической модели получены расчетные соотношения с экспериментальным исследованием и предложения для его внедрения в отдельные отрасли нефтегазовой промышленности.

**Ключевые слова:** магнитокумулятивный генератор, умножитель, электрический взрыв, моделирование, лайнер, соленоид двухспиральный, колебательный процесс

## **HIGH-VOLTAGE PULSE GENERATOR BASED ON DUAL-SPIRAL MAGNETIC ACCUMULATION GENERATOR WITH IMPROVED CHARACTERISTICS**

#### **Relevance**

The paper proposes an original design of a high-voltage electromechanical two-spiral voltage source based on a magnetic accumulation generator (MAG) and a voltage multiplier with improved characteristics. In the multiplier, with the help of special switches, the addition of all voltages arising from the electrical explosion of conductors in separate inductive energy storage devices connected in parallel to the magnetic accumulation generator is carried out. A mathematical model and the results of mathematical modeling of the operation of the voltage source are presented, the calculated ratios will find application for practical use. In the course of the work, methods of the theory of electric circuits, magnetic field, elements of mathematical analysis and the theory of electrical oscillatory processes (beating, resonance, etc.) in complex circuits were used. As a result, a ratio is obtained that determines the maximum value of the beat frequency between two electrical

circuits connected by a weak capacitive coupling, creating a magnetic accumulation generator with high microwave radiation and with the possibility of its regulation. The results of the work will be used in power engineering (an ice control unit, a shunt reactor to increase the power factor, etc.), mechanical engineering, medicine (cardiology), military equipment, etc. In the future, it is planned to use the obtained results of work in the direction of studying the use of a pulsed electromagnetic field for dewatering and desalting oil, which will lead to an increase in the efficiency of existing installations in practice.

### **Aims of research**

Development of the design of a high-voltage electromechanical two-spiral voltage source based on a magnetic accumulation generator and a voltage multiplier with improved characteristics, theoretical and experimental studies with subsequent conclusions and recommendations.

Studies of the proposed double-spiral MAG and the development of an event for its further practical application.

### **Research methods**

Methods of mathematical modeling, research and testing of high voltage equipment.

### **Results**

A pilot design of a high-voltage electromechanical two-spiral voltage source based on a magnetic accumulation generator and a voltage multiplier with improved characteristics is proposed, calculated ratios with experimental research and proposals for implementation in individual industries and testing laboratories are obtained on the basis of the created mathematical model.

**Keywords:** magnetic accumulation generator, multiplier, electric explosion, simulation, liner, double-spiral solenoid, oscillatory process

### **Введение**

Успешное решение целого ряда задач прикладной физики и техники непрерывно связано с увеличением энергообеспеченности, мощности и напряжения формируемых электромагнитных импульсов для экспериментальных работ [1–9]. К настоящему времени имеется уже достаточно большой опыт по созданию различных типов источников энергии (химических, электромеханических, электрических) [1, 3, 10]. Но использование значительной энергии от таких источников не всегда представляется возможным из-за больших массогабаритных характеристик и из-за трудностей обеспечения в нагрузке требуемой мощности, которая определяется временем формирования данного импульса (чем короче время, тем больше напряжение, а следовательно, и мощность).

В настоящее время прошла апробацию коммутационная схема, осуществляющая сложение (более устоявшееся определение — умножение) всех напряжений, воз-

никающих при электрическом взрыве проводников в отдельных индуктивных накопителях энергии, присоединенных параллельно к общему источнику энергии — магнитокумулятивному генератору (МКГ) [11, 12]. Техническая сложность задач, которые должны быть решены при создании таких мощных коммутирующих устройств, формирующих высокое напряжение, а также разнообразие требований, предъявляемых к ним в зависимости от параметров и режимов работы импульсного источника энергии, обычно требуют всесторонних исследований. Наличие источников с приемлемыми параметрами позволяет существенно ускорить процесс разработки.

Для примера можно взять промышленный МКГ типа ВМГ-80 со следующими технико-габаритными показателями с линейным умножителем напряжений [13]:

- энергоемкость 200 кДж;
- масса и габаритные показатели 60 кг;  $1,0 \times 0,5 \times 0,5$  м<sup>3</sup>;

- индуктивность разрядного контура 8 мкГн;
- максимальный ток 230 кА;
- выходное напряжение умножителя 2,2 МВ;
- коммутируемый ток нагрузки  $5,1 \pm 0,5$  кА;
- нарастание тока за  $t = 1$  мкс до 4,8 кА.

В последние годы существенное развитие электроэнергетики ставит задачу создания высокоэффективного взрывомагнитного (магнитокумулятивного) генератора и его оптимизации путем создания его оригинальной математической модели и проведения экспериментальных исследований.

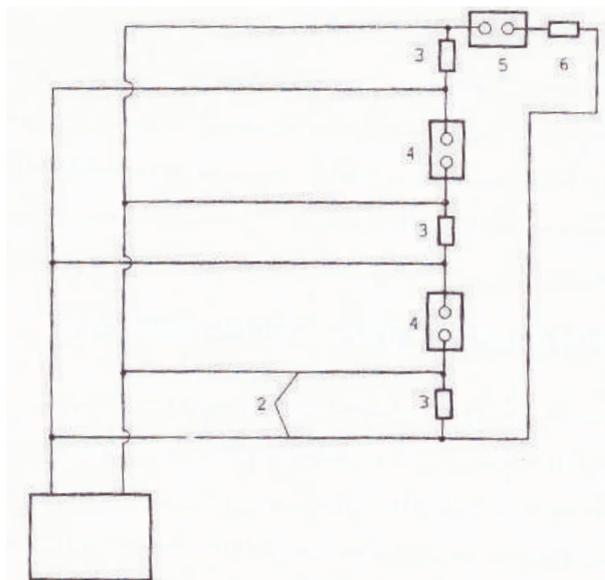
В настоящей работе предлагается оригинальная конструкция взрывомагнитного генератора, разработана ее математическая модель, в корне отличающаяся от ранее созданной и практически рекомендованной в работах [1, 2]. Предлагаемый МКГ положен в основу построения высоковольтного источника питания (ВМКГ) с умножителем напряжения и накопителями энергии.

#### Физические основы метода построения высоковольтного источника напряжения

Высоковольтный источник на основе умножителя напряжений электрически взрывающихся проводников органически объединяет одно из существенных преимуществ генераторов по схеме Маркса. Он дает возможность умножения напряжения за счет специального переключения единичных источников с возможностью получения напряжения в мегавольтном диапазоне от единичного генератора на основе электрически взрывающихся проводников. Общая структурная схема источника напряжения показана на рисунке 1.

Энергия от источника начальной энергии 1 подводится по отдельным передаю-

щим линиям 2 к системе взрывающихся проводников 3. Каждая такая электрическая цепь, рассматриваемая отдельно, представляет собой индуктивный накопитель энергии (индуктор) и является единственным генератором напряжения на основе электрически взрывающихся проводников (ЭВП), из которых собран такой высоковольтный источник. Протекающий в них ток нагревает проводники 3 и обуславливает их электрический взрыв на момент достижения максимума тока. Возникающий при электрическом взрыве проводников 3 импульс напряжения приводит к срабатыванию коммутаторов 4, разделяющих для всех единичные генераторы. Образовавшийся в результате такого переключения суммарный импульс напряжения осуществляет пробой разрядника-обострителя 5 и прикладывается к нагрузке 6.



- 1 — источник начальной энергии;  
 2 — передающая линия; 3 — ЭВП;  
 4 — коммутатор;  
 5 — разрядник-обостритель; 6 — нагрузка

- 1 — initial energy source; 2 — transmitting line; 3 — EEC; 4 — switch;  
 5 — arrester-exacerbator; 6 — load

**Рисунок 1.** Общая структура схемы источника напряжения

**Figure 1.** General structure of voltage source circuit

В идеальном случае, когда в процессе коммутации сохраняется электропрочность материалов, пренебрежимо малы индуктивности у коммутатора и разрушаемого промежутка по сравнению с индуктивностями контуров, где они располагаются; импульс напряжения на выходе источника будет равен сумме напряжений единичных генераторов. Тем самым появляется возможность получать импульсы напряжения с любыми требуемыми амплитудами путем варьирования числа цепей с ЭАП. Кроме того, в  $N$ -индукторном умножителе сопротивление всех разомкнутых промежутков (ЭВП) будет в  $N^2$  раз больше, чем для одноиндукторного источника напряжения. Все эти теоретические выводы подтвердились в экспериментальных работах [11, 12, 14, 15], созданных на базе МКГ.

### Конструкция нового типа двухспирального МКГ

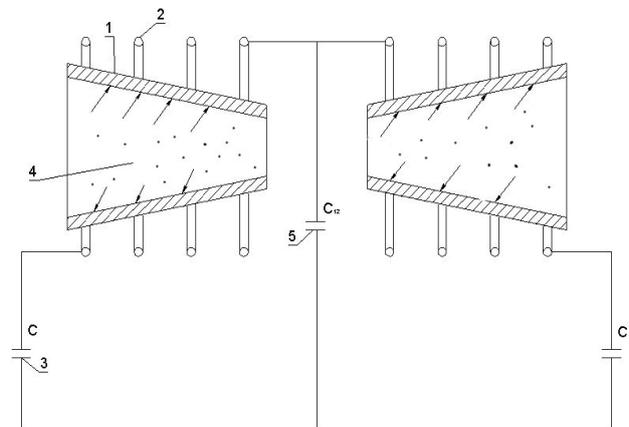
Основными элементами этого генератора являются соленоиды 2 и металлический тонкостенный полый конус (лайнер) 1 с зарядом взрывчатого вещества (рисунок 2).

Лайнер представляет собой цилиндрическую или коническую трубу, изготовленную из высокопластичного сплава алюминия или меди. Толщина лайнера рассчитывается из условия обеспечения заданной скорости и угла подхода поверхности лайнера к соленоиду, а также из условия его механической прочности. Лайнер монтируется внутри соленоида вдоль его оси. При срабатывании заряда взрывчатого вещества 4 лайнер расширяется и совершает механическую работу по сжатию магнитного поля соленоида, часть этой работы преобразуется в электромагнитную энергию. Кроме этого, расширяющийся лайнер последовательно замыкает витки соленоида, уменьшая его индуктивность и, соответственно, увеличивая собственную частоту электрической цепи генератора.

Режим работы спирального магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой, в том числе и его СВЧ-излучение, существенным образом зависит от закона изменения индуктивности его соленоида.

В последнее время большое внимание стало уделяться исследованиям физических процессов, протекающих в спиральном генераторе, работающем на емкостную нагрузку. Конструктивно конденсатор может быть выполнен в виде одного элемента или представлять собой конденсаторную батарею.

При этом важную роль в процессе функционирования магнитокумулятивного генератора играет реализуемый закон изменения индуктивности. В частности, в соответствии с законом изменения индуктивности будет реализовываться апериодический или колебательный характер функции тока от времени. Изменение индуктивности определяется шагом



1 — лайнер; 2 — соленоид;  
3 — электроемкости; 4 — взрывчатое  
вещество; 5 — блок статических  
конденсаторов связи

1 — liner; 2 — solenoid; 3 — capacitor;  
4 — detonation substance;  
5 — block of static coupling capacitors

**Рисунок 2.** Схема магнитокумулятивного генератора

**Figure 2.** Diagram of magnetic accumulation generator

намотки соленоида вдоль его оси, углом подхода поверхности лайнера к образующей соленоида и скоростью приближения поверхности лайнера к соленоиду.

На характере функции тока от времени будет существенно сказываться суммарное активное сопротивление магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой. Была теоретически и экспериментально показана возможность формирования сверхвысокочастотного радиоизлучения при функционировании спирального магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой. При этом интенсивность и спектральные характеристики радиочастотного излучения также существенно зависят от функции изменения индуктивности соленоида [16].

В работе создана математическая модель, в которой использованы ранние работы по спиральным преобразователям [17, 18]. При выполнении теоретических исследований были использованы методы теории электрических цепей, магнитного поля, методы математического анализа и теория электрических колебательных процессов в связанных контурах (биения, индукция и т.д.) [19, 20].

### Математическая модель

В работах [17, 18] описана математическая модель и аналитические выводы с экспериментальным сопровождением, которые позволяют утверждать, что теория МКГ применима в случае слабой емкостной связи между электрическими контурами. С учетом неравенства  $\frac{c}{C_{12}} \ll 1$  можно записать следующее выражение для частоты обменного процесса [18]:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{обм}} &= \sqrt{\frac{1}{LC}} - \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{1}{C} + \frac{2}{LC_{12}} \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{2LC}{C_{12}} \right)} \right) = \sqrt{\frac{1}{LC}} \frac{c}{c_{12}} = \frac{c}{c_{12}} \omega. \end{aligned}$$

Из последнего равенства следует, что между частотой обменного процесса, т.е. угловой частотой биения в системе, состоящей из двух электрических контуров, связанных слабой емкостной связью, и угловой частотой свободных колебаний в контуре, состоящем из емкости  $C$  и индуктивности  $L$ , существует простая электроемкостная связь.

Таким образом, изменяя величины  $L$ ,  $C$ ,  $C_{12}$  между двумя электрическими контурами, связанными слабой емкостной связью, добиваются максимального значения  $\omega_{\text{обм}} = \omega$  биений, что является важным практическим результатом в воздействии на материалы в нефтегазовой отрасли, энергетике и электромеханике [5, 10, 18, 20, 21].

### Экспериментальная часть МКГ без умножителей

На рисунках 3 и 4 приведены огибающие (сплошные линии) экспериментальных осциллограмм производных тока для двух вариантов исполнения СМКГ, работающих на емкостную нагрузку. Производная тока выбрана как величина, характеризующая процессы в генераторе и более часто измеряемая в подобных экспериментах. Производная тока и время представлены на рисунках в безразмерном виде.

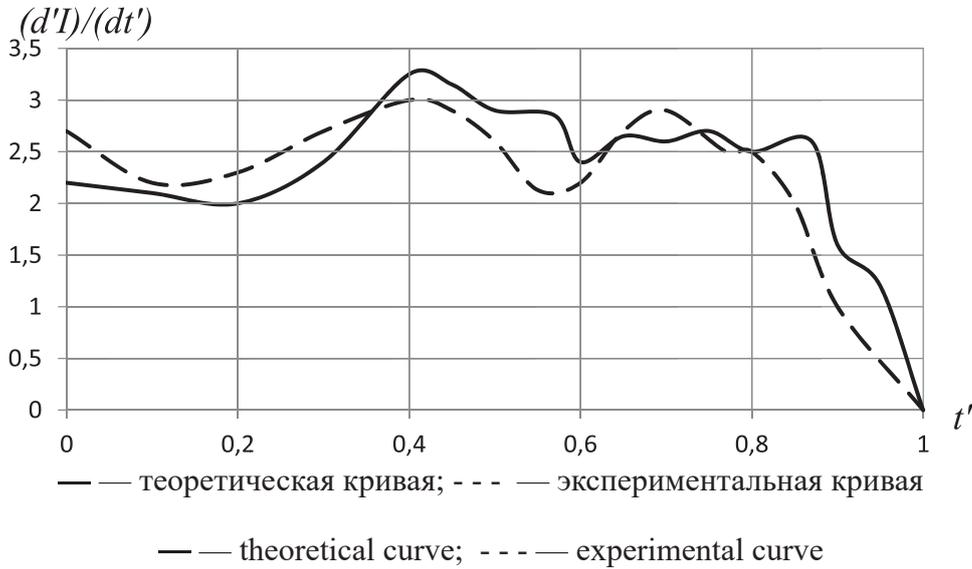
СМКГ обоих вариантов имели одинаковую конструкцию и геометрические параметры соленоида. Оба варианта генераторов содержали соленоид диаметром 90 мм и имели по 9 витков изолированного провода. Варианты различались между собой только толщиной изоляции провода соленоида и начальным напряжением зарядки конденсатора.

Фторопластовая изоляция в генераторе первого варианта (рисунок 3) пробивалась в среднем при импульсном (время действия порядка микросекунды) напряжении 3,5 кВ. Фторопластовая изоляция

в генераторе второго варианта (рисунок 4) пробивалась при импульсном напряжении 28 кВ. Начальный момент времени конденсатора генератора первого варианта был заряжен до напряжения 16 кВ, а конденсатор генератора второго варианта — до напряжения 30 кВ.

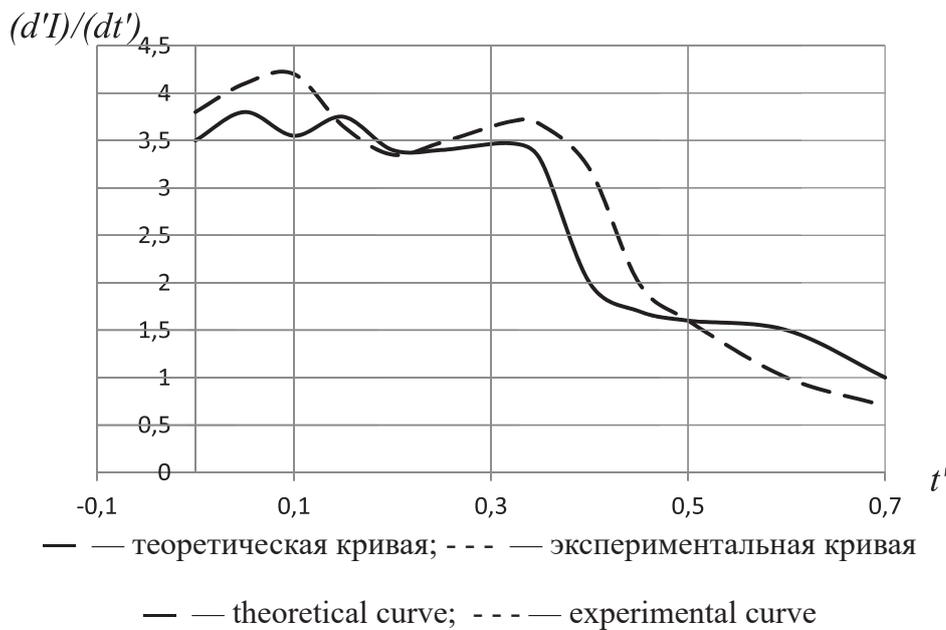
На тех же рисунках приведены огибающие (пунктирные линии) зависимости производной тока от времени, рассчитанные по изложенной в статье методике.

Из сравнения расчетных экспериментальных огибающих видно, что предложенная математическая модель каче-



**Рисунок 3.** Зависимость амплитуды производной тока от времени для генератора первого варианта

**Figure 3.** Dependence of current derivative amplitude on time for generator of the first version



**Рисунок 4.** Зависимость амплитуды производной тока от времени для генератора второго варианта

**Figure 4.** Dependence of current derivative amplitude on time for generator of the second version

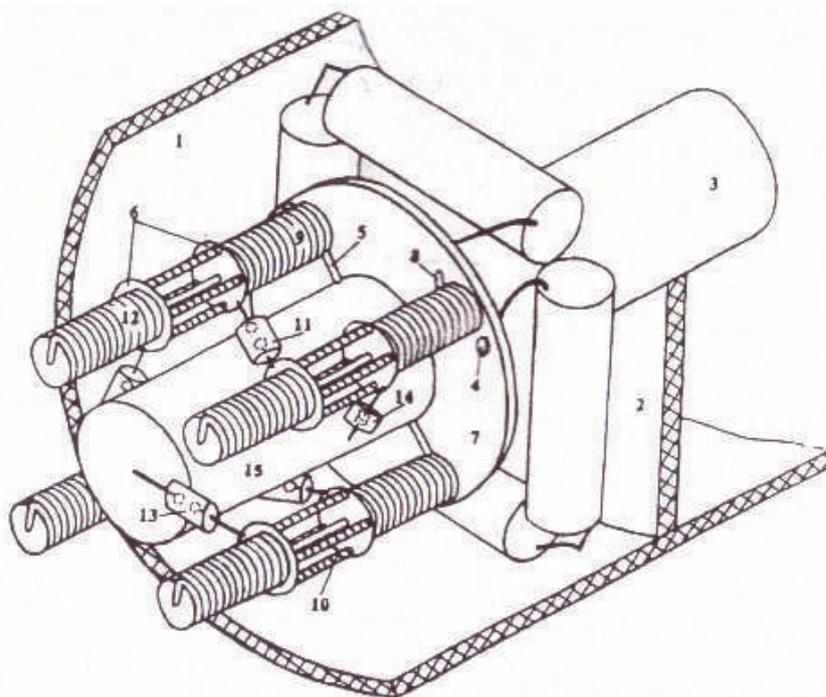
ственно описывает процесс в реальном генераторе. Отличие экспериментальной огибающей осциллограммы производной тока от теоретической на конечном участке может быть объяснено наличием массивного фланца, к которому крепятся лайнер и соленоид. Наличие близко расположенного фланца способно исказить картину замыкания последних витков соленоида. При этом следует отметить, что использование математической модели, аналогичной рассмотренной в настоящей статье, но не учитывающей наличие электрической изоляции проводов, дает огибающую производной тока, имеющую не более одного экстремума, что противоречит наблюдаемой в эксперименте картине. Эта особенность

модели, не учитывающая наличие изоляции проводов соленоида, не может быть скомпенсирована введением эмпирических коэффициентов.

### Экспериментальная часть ВМКГ-80 с линейным множителем напряжений

Экспериментальная установка со специальным генератором типа ВМКГ-80, имеющим на выходе трансформаторный узел, показана на рисунке 5 [21–23].

При работе ВМКГ-80 в разрядном контуре индуктивностью 8 мкГ был получен максимальный ток 230 кА, уменьшающийся до 200 кА к моменту срабатывания разрядников-обострителей. Коммутируемый в нагрузку ток равен  $5,1 \pm 0,5$  кА

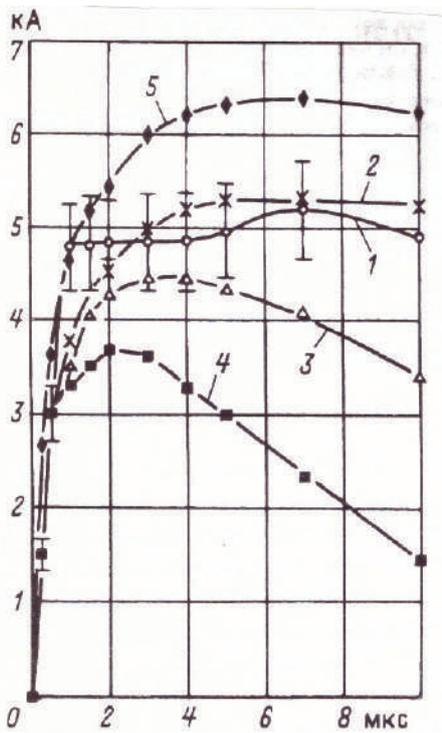


1 — корпус; 2, 7 — диэлектрические стойки; 3 — ВМКГ-80; 4 — зажим для подключения токовывода 8 накопителя к ВМКГ-80; 5, 8 — токовыводные накопители; 6 — электроды; 9, 12 — соленоиды накопителя; 10 — ЭВП; 11 — разрядник; 13 — диэлектрический каркас накопителя; 14 — разрядник-обостритель; 15 — нагрузка

1— housing; 2, 7 — dielectric posts; 3 — HMC80; 4 — clamp for connection of the current terminal 8 of the accumulator to the HMC80; 5, 8 — current terminal accumulators; 6 — electrodes; 9, 12 — solenoids of the accumulator; 10 — EVP, 11 — arrester; 13 — dielectric frame of accumulator; 14 — arrester-exacerbator; 15 — load

**Рисунок 5.** Общий вид компактного источника напряжения ВМКГ-80

**Figure 5.** General view of compact voltage source of HMC80



1 — экспериментальная линия; 2–5 — расчетные линии

1 — experimental line; 2–5 — calculation lines

**Рисунок 6.** Электротехнические характеристики семииндукторного умножителя

**Figure 6.** Electrical characteristics of seven-inductor multiplier

(рисунок 6) и нарастал за  $t = 7$  мкс, хотя ток 4,8 кА, соответствующий резкому перелому на кривой, был достигнут уже за 1 мкс. На выходе умножителя напряжения было сформировано напряжение 2,2 МВ, что соответствует семикратному увеличению напряжения по сравнению с единичным напряжением. Экспериментальные значения совпадают с теоретическими в пределах допустимой точности эксперимента.

Как видно из рисунка 6 расчетные линии совпадают с экспериментальными в интервале сглаживания и качественно описывают процессы динамики сверхсильных магнитных полей и токов.

### Выводы

Разработанная конструкция ВМКГ основана на принципе сжатия импульсного магнитного поля с помощью энергии взрывчатых веществ. Разработана оригинальная конструкция магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ-

излучением с возможностью его регулирования. Изменяя емкость  $C$  и индуктивность  $L$ , можно добиваться максимального значения  $\omega_{\text{обм}} = \omega$  электрического биения, что позволит повысить СВЧ его излучения. Данная разработка найдет применение в машиностроении для обработки материалов СВЧ-излучением, дефектоскопии для обнаружения микродефектов, геофизике для обнаружения полезных ископаемых, медицине (онкологии), спутниковой связи, радиолокации, микроволновых печах и обработке пищевых продуктов, магнетронах, СВЧ-антеннах, в импульсной энергетике и т.д. Описана математическая модель МКГ, проведено его экспериментальное сопровождение, сделаны выводы о достоверности результатов работы. Решения дифференциальных уравнений математической модели методом конечных элементов позволяют повысить точность результатов для высокоточных и технологичных производственных решений.

### Список источников

1. Долотенко М.И. Магнитокумулятивные генераторы МК-1 сверхсильных магнитных полей. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 224 с.

2. Kato K.G., Crouch D.D., Sar D.R. Improved Magneto-Cumulative Generator Performance by Using Variable Bitter Coil-Type Stator Windings // 2005 IEEE Pulsed Power Conference,

- 13-15 June 2005. Mon-terey, CA, USA, 2015. P. 513–516.
3. Базанов А.А., Ивановский А.В., Шайдуллин В.Ш. Модель дискового взрывомагнитного генератора с магнитодинамическим формирователем субмикросекундного импульса тока в лайнерной нагрузке // Журнал технической физики. 2014. Т. 14. Вып. 4. С. 136–144.
  4. Баско М.М. Физические основы инерциального термоядерного синтеза. М.: ИТЭФ, 2008. 148 с.
  5. Ur-Rehman A., Khan N. Design and Fabrication of a High Voltage Lightning Impulse Generator // Engineering. 2016. Vol. 8. P. 69–73.
  6. Суркаев В.И., Усачев М.М., Кумыш М.М. Исследование миллисекундного электрического взрыва металлических проводников // Письма в Журнал технической физики. 2011. Т. 37. Вып. 23. С. 97–104.
  7. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
  8. Агранат М.Б., Андреев Н.Е., Иванов М.И. Экспериментальные исследования взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с наноструктурированными мишенями // Известия Кабар-дино-балкарского государственного университета. 2014. Т. 4. № 1. С. 66–71.
  9. Goforth J.H. e.a. A New 40 MA Ranchero Explosive Pulsed Power System // Proceedings of the 17th IEEE International Pulsed Power Conference, June 2009. Washington D.C. Peterkin and Curry, eds. 2009. P. 301.
  10. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А. и др. Двухспиральный магнитокумулятивный генератор СВЧ-излучения для геологии // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 195–200.
  11. Borriskin A.S., Broskii A.Ya., Dimant E.M. e.a. Linear and Circular Multiloop Voltage Multiplier // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application. N.Y.: Nova Science Publishers, 2004. P. 697–712.
  12. Velasko J.A., Araujo J.C., Bedoui S. Lightning Performance Analysis of Transmission Lines Using the Monte Carlo Method and Parallel Computing // Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. 2018. Vol. 26. No. 3. P. 398–409.
  13. Иванов М.Д., Хазиева Р.Т. Моделирование генератора переменного напряжения для создания импульсного электромагнитного поля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 2. Т. 17. С. 5–17.
  14. Вепринцев В.И. Основы теории цепей. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2003. 164 с.
  15. Борискин А.С., Димант Е.М., Селемир В.Д., Соловьев А.А. Высоковольтный источник напряжения на базе магнитокумулятивного генератора типа ВМГ-80 // Электричество. 2001. № 3. С. 8–15.
  16. Пичугина М.Т. Высоковольтная электротехника. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 136 с.
  17. Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В. Электромеханический двухспиральный магнитокумулятивный генератор СВЧ-излучения для сварочных работ // Сварочное производство. 2020. № 1. С. 9–15.
  18. Taflove A., Hagness S. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method. 3d Ed. London: Artech House, 2005. P. 51–80.
  19. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф. Конический спиральный датчик вибрации с улучшенными метрологическими характеристиками // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 3-4. С. 49–62.
  20. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А. и др. Специальные электромеханические системы с вибрационными преобразователями. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2021. 470 с.
  21. Yuan Zh., Ma Q., Liang Z., Yu H. Simulation of Electromagnetic Field of Indirect Electrostatic Discharge Test by Using FDTD Method // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China, 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748901.
  22. Патент на полезную модель 201511270507, РФ МПК Н 02 N 11/00. Электромагнитный магнитокумулятивный генератор / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Волкова Т.А. Опубл. в 22.04.2015. Бюл. № 33.
  23. Rumpf R.C., Garcia C.R., Berry E.A., Barton J.H. Finite-Difference Frequency-Domain Algorithm for Modeling Electromagnetic Scattering from General Anisotropic Objects // PIERS B. 2014. Vol. 61. P. 55–67.

## References

1. Dolotenko M.I. *Magnitokumu-lyativnye generatory MK-1 sverkhsil'nykh magnitnykh polei* [Magneto-Accumulative Generators MC-1 of

Super-Strong Magnetic Fields]. Sarov, RFYaTs-VNIIEF, 2015. 224 p. [in Russian].

2. Kato K.G., Crouch D.D., Sar D.R. Improved Magneto-Cumulative Generator Performance by Using Variable Bitter Coil-Type Stator Windings. *2005 IEEE Pulsed Power Conference, 13-15 June 2005, Monte-rey, CA, USA*, pp. 513–516.

3. Bazanov A.A., Ivanovskii A.V., Shaidullin V.Sh. Model' diskovogo vzryvomagnitnogo generadora s magnitodinamicheskim formirovatelem submikrosekundnogo impul'sa toka v lainernoi nagruzke [Model of a Disk Explosion-Magnetic Generator with a Magnetodynamic Shaper of a Sub-microsecond Current Pulse in a Liner Load]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki — Technical Physics, 2014, Vol. 14, Issue 4*, pp. 136–144. [in Russian].

4. Basko M.M. *Fizicheskie osnovy inertial'nogo termoyadernogo sinteza* [Physical Foundations of Inertial Thermonuclear Fusion]. Moscow, ITEF Publ., 2008. 148 p. [in Russian].

5. Ur-Rehman A., Khan N. Design and Fabrication of a High Voltage Lightning Impulse Generator. *Engineering*, 2016, Vol. 8, pp. 69-73.

6. Surkaev V.I., Usachev M.M., Kумыш M.M. Issledovanie millisekundnogo elektricheskogo vzryva metallicheskih provodnikov [Investigation of a Millisecond Electric Explosion of Metallic Conductors]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki — Letters to Journal of Technical Physics*, 2011, Vol. 37, Issue 23, pp. 97–104. [in Russian].

7. Mesyats G.A. *Impul'snaya energetika i elektronika* [Pulse Energy and Electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. [in Russian].

8. Agranat M.B., Andreev N.E., Ivanov M.I. Eksperimental'nye issledovaniya vzaimodeistviya femtosekundnykh lazernykh impul'sov s nanostrukturirovannymi mishenyami [Experimental Studies of the Interaction of Femtosecond Laser Pulses with Nanostructured Targets]. *Izvestiya Kabardino-balkarskogo gosudarstvennogo universiteta — Proceedings of the Kabardino-Balkar State University*, 2014, Vol. 4, No. 1, pp. 66–71. [in Russian].

9. Goforth J.H. e.a. A New 40 MA Ranchero Explosive Pulsed Power System. *Proceedings of the 17th IEEE International Pulsed Power Conference, June 2009*. Washington D.C. Peterkin and Curry, eds. 2009, p. 301.

10. Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Safiullin R.A. e.a. Dvukhsperimental'nyi magnitokumulyativnyi generator SVCh-izlucheniya dlya geologii [Double-Helix Magnetocumulative Microwave Radiation Generator for Geology]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii — Automation. Modern Technologies*. 2021, Vol. 75, No. 5, pp. 195–200. [in Russian].

11. Boriskin A.S., Broskii A.Ya., Dimant E.M. e.a. Linear and Circular Multiloop Voltage Multiplier. *Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application*. New York, Nova Science Publishers, 2004, pp. 697–712.

12. Velasco J.A., Araujo J.C., Bedoui S. Lightning Performance Analysis of Transmission Lines Using the Monte Carlo Method and Parallel Computing. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2018, Vol. 26, No. 3, pp. 398–409.

13. Ivanov M.D., Khazieva R.T. Modelirovanie generadora peremennogo napryazheniya dlya sozdaniya impul'snogo elektromagnitnogo polya [Modeling an AC Voltage Generator to Create a Pulse Electromagnetic Field]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 2. Vol. 17, pp. 5-17. [in Russian].

14. Veprintsev V.I. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of the Theory of Circuits]. Krasnoyarsk, Izd-vo KGTU, 2003. 164 p. [in Russian].

15. Boriskin A.S., Dimant E.M., Selemir V.D., Solov'ev A.A. Vysokovol'tnyi istochnik napryazheniya na baze magnitokumulyativnogo generadora tipa VMG-80 [High-Voltage Source Based on a Magnetic Cumulative Generator of the HMCG-80 Type]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2001, No. 3, pp. 8–15. [in Russian].

16. Pichugina M.T. *Vysokovol'tnaya elektrotehnika* [High Voltage Electrical Engineering]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2011. 136 p. [in Russian].

17. Yangirov I.F., Ismagilov F.R., Maksudov D.V. Elektromekhanicheskii dvukhsperimental'nyi magnitokumulyativnyi generator SVCh-izlucheniya dlya svarochnykh rabot [Electromechanical Double-Helix Magnetocumulative Microwave Generator for Welding]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding production*, 2020, No. 1, pp. 9–15. [in Russian].

18. Taflove A., Hagness S. *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-*

*Domain Method*. 3d Ed. London, Artech House, 2005, pp. 51–80.

19. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Konicheskiy spiral'nyi datchik vibratsii s uluchshennymi metrologicheskimi kharakteristikami [Conical Spiral Vibration Sensor with Improved Metrological Characteristics]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 3-4, Vol. 17, pp. 49-62. [in Russian].

20. Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Safiullin R.A. e.a. *Spetsial'nye elektromekhanicheskie sistemy s vibratsionnymi preobrazovatelyami* [Special Electro-mechanical Systems with Vibration Transducers]. Moscow, Izd-vo «Innovatsionnoe mashinostroenie», 2021. 470 p. [in Russian].

21. Yuan Zh., Ma Q., Liang Z., Yu H. Simulation of Electromagnetic Field of Indirect Electrostatic Discharge Test by Using FDTD Method. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, China, 2011, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748901.

22. Ismagilov F.R., Khairullin I.Kh., Yangirov I.F., Maksudov D.V., Volkova T.A. *Elektromagnitnyi magnitokumulyativnyi generator* [Electromagnetic Magnetocumulative Generator]. Patent na poleznuyu model RF, No. 201511270507, 2015. [in Russian].

23. Rumpf R.C., Garcia C.R., Berry E.A., Barton J.H. Finite-Difference Frequency-Domain Algorithm for Modeling Electromagnetic Scattering from General Anisotropic Objects. *PIERS B*, 2014, Vol. 61, pp. 55–67.



**Флюр Рашитович Исмагилов**  
**Flyur R. Ismagilov**

доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия



**Ильгиз Флюсович Янгиров**  
**Ilgiz F. Yangirov**

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия



**Вячеслав Евгеньевич Вавилов**  
**Vyacheslav E. Vavilov**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия



**Альберт Рашитович Халиков**  
**Albert R. Khalikov**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры теоретических основ электротехники,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия



**Евгений Михайлович Федосов**  
**Evgeniy M. Fedosov**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия



**Гульнара Фриловна Сафина**  
**Gulnara F. Safina**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры  
математического моделирования и информационной безопасности,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Нефтекамский филиал, Нефтекамск, Россия



**Айгуль Рафисовна Аюпова**  
**Aygul R. Ayurova**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры  
математического моделирования и информационной безопасности,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Нефтекамский филиал, Нефтекамск, Россия

УДК 621.313.13:621.314.571.001

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-35-44

## ЭЛЕКТРОПРИВОД СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

**Актуальность**

В современном быту и промышленности возникли потребности в создании микромашин не только с уменьшенными массогабаритными показателями, но и с необходимыми технико-экономическими показателями. Это связано с широким использованием в промышленности, быту, космической индустрии элементов робототехники с использованием миниатюрных приводов. В работе приведены аналитические соотношения для проектирования различных конструкций таких преобразователей со спиральным вторичным элементом, а также экспериментальные исследования их механических характеристик. В статье проводится исследование возможности применения новых технических разработок в области электропривода для разных областей промышленности.

**Цель исследования**

Провести теоретические и практические исследования технических характеристик нового типа электропривода.

**Методы исследования**

Методы математического моделирования, исследования и испытания техники высокого напряжения.

**Результаты**

Получены опытные образцы для частных использований. Проведены теоретические исследования с экспериментальным подтверждением и выводами для практического использования.

**Ключевые слова:** вторичный элемент, спираль, уравнение Бесселя, функция Хевисайда, механическая характеристика

## **ELECTRIC DRIVE WITH A COMPLEX GEOMETRY OF THE SECONDARY ELEMENT**

**Relevance**

In modern everyday life and industry, there is a need to create micromachines not only with reduced weight and size indicators, but also with the necessary technical and economic characteristics. This is due to the widespread use in industry, everyday life, and the space industry of robotics elements using miniature drives. The paper presents analytical relationships for modeling various designs of such converters with a spiral secondary element, as well as experimental studies of their mechanical characteristics. The article studies the possibility of applying new technical developments in the field of electric drive for various industries.

**Aim of research**

Conduct theoretical and practical research on the technical characteristics of a new type of electric drive.

**Research methods**

Methods of mathematical modeling, research and testing of high voltage equipment.

**Results**

Received prototypes for private use. Theoretical studies were carried out with experimental confirmation and conclusions for practical use.

**Keywords:** secondary element, spiral, Bessel equation, Heaviside function, mechanical characteristic

**Ведение**

Для прямого преобразования электрической энергии в механическое колебательное движение используются электрические двигатели со спиральным электропроводящим элементом (ЭСВЭ). Отсутствие механических преобразовательных механизмов повышает надежность и массогабаритные показатели таких электродвигателей. Однако теоретических исследований подобных электромеханических преобразователей в зарубежной и отечественной литературе мало [1].

В статье приведен теоретический анализ электродвигателя со спиральным электропроводящим элементом, получены выражения для расчета механических характеристик, которые подтверждены экспериментально.

**Конструкция и работа**

На рисунке 1 приведена конструктивная схема ЭСВЭ [2]. Здесь: 1 — спиральная электропроводящая пружина, через которую с помощью выводов 2 пропускают переменный ток необходимой

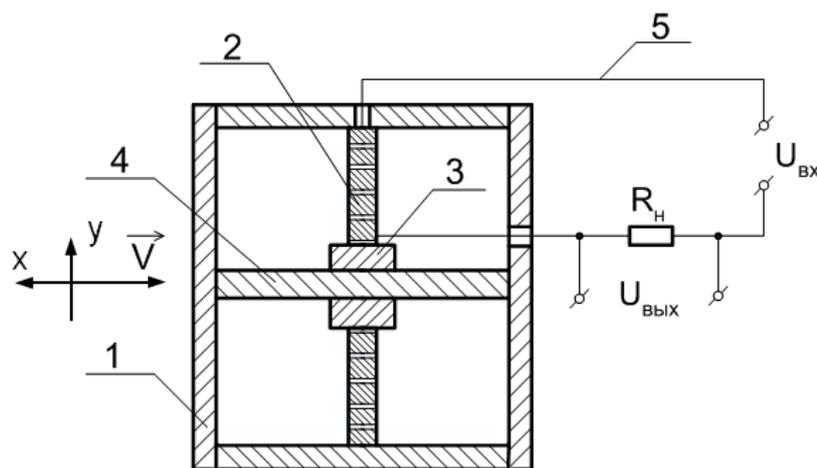
частоты; 3 — магнитная система, создающая магнитный поток в зоне расположения спирали [1]. При подключении спиральной электропроводящей пружины 1 к источнику переменного тока с помощью выводов 2 создается электродинамическая сила на витки спирали в магнитном поле магнитной системы 3, которая заставляет пружину скручиваться и раскручиваться. Изменяя свои витковые размеры, спираль приводит в колебательное движение рабочий орган, присоединенный к ее внешнему витку. Тем самым создаются вибрационные колебательные движения спиральной электропроводящей пружины.

**Математическая модель**

При решении задачи использованы общепринятые допущения [3].

На рисунке 2 изображена часть расчётной схемы электродвигателя с указанием сил, действующих на виток спирали [4–6].

При пропускании переменного тока через электропроводящую спиральную пружину в результате взаимодействия



1 — корпус; 2 — электропроводящая спиральная пружина; 3 — инерционная масса; 4 — вал; 5 — электрические выводные концы

1 — housing; 2 — electrically conductive coil spring; 3 — inertial mass; 4 — shaft; 5 — electrical output ends

**Рисунок 1.** Вибрационный электродвигатель со спиральным элементом

**Figure 1.** Vibrating electric motor with spiral element

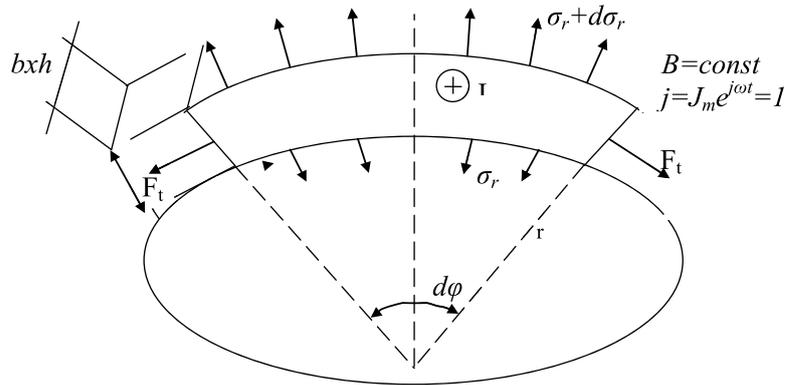


Рисунок 2. Силы, действующие на виток спирали

Figure 2. Forces acting on the spiral turn

тока с постоянным магнитным полем возникает электромагнитная радиальная сила [7]:

$$dF_{2r} = JBrd\varphi dr dz = JBrd\varphi dr, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока;  $B$  — индукция в зазоре.

Тангенциальная растягивающая сила:

$$dF_{2r} = \sigma_i dr dz = \sigma_i dr. \quad (2)$$

Сумма проекций тангенциальных сил:

$$dF_{2r} = -2F_t \sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right) = -\sigma_i dr d\varphi. \quad (3)$$

Сила, равная разности сил от радиальных напряжений  $\sigma_r$ , создаваемых на внутреннем и наружном радиусах жесткой связи сектора с примыкающими витками спирали [3]:

$$dF_{3r} = (\sigma_2 + d\sigma_r)(r + dz)d\varphi - \sigma_2 r d\varphi \approx (\sigma_r dz + rd\sigma_r)d\varphi. \quad (4)$$

Тогда уравнение движения спиральной пружины [7]:

$$dF_{1r} + dF_{2r} + dF_{3r} = \ddot{u} dm = \ddot{u} \rho r d\varphi dr, \quad (5)$$

где  $\ddot{u}$  — ускорение участка спирали.

Подстановка (4) в (5) дает следующие равенства:

$$JBrd\varphi dr - \sigma_i dr d\varphi + \sigma_r dr d\varphi + rd\sigma_i d\varphi = \rho r d\varphi dr \ddot{u},$$

$$JBrd\varphi dr - \sigma_i dr + \sigma_r dr + rd\sigma_r = \rho r dr \ddot{u}, \quad (6)$$

или

$$-\sigma_t + \frac{d}{dr}(r\sigma_r) = -JB + \rho r \ddot{u}. \quad (7)$$

Учитывая законы Гука для механического напряжения [5]:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{U}{r} + \mu \frac{dU}{dr} \right), \quad (8)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{dU}{dr} + \mu \frac{U}{r} \right), \quad (9)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;

$E$  — модуль упругости Юнга;

$r$  — радиус витка;

$U$  — радиальное перемещение витков.

Основное уравнение [4] выражается

через перемещение  $u$ :

$$\frac{E}{1-\mu^2} \left( -\frac{\ddot{U}}{r} - \mu \frac{d\ddot{U}}{dr} \right) + \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{d^2\ddot{U}}{dr^2} \cdot r + \frac{d\ddot{U}}{dr} + \mu \frac{d\ddot{U}}{dr} \right) = -JB + \rho r \ddot{U}, \quad (10)$$

$$\frac{d\ddot{U}}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\ddot{U}}{dr} - \frac{1}{r^2} \ddot{U} = -\frac{1-\mu^2}{E} (JB - \rho \ddot{U}), \quad (11)$$

$$\rho \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{d^2\ddot{U}}{dt^2} = \frac{\delta^2\ddot{U}}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta\ddot{U}}{\delta r} - \frac{1}{r^2} \ddot{U} + \frac{1-\mu^2}{E} JB, \quad (12)$$

где  $\rho$  — плотность материала спирали.

Введение обозначений  $\gamma = \frac{1-\mu^2}{E}$  позволяет решить это уравнение методом разделения переменных [4]:

$$U = R(r)\theta(t) = R(r)\theta_m e^{j\omega t}, \quad (13)$$

где  $R(r)$  — функция координат по оси  $OX$ ;

$\theta(t)$  — гармоническая функция времени.

Подстановка (13) в уравнение (12) дает равенство

$$\rho\gamma R(r)\ddot{\theta}(t) = \theta(t)\ddot{R}(r) + \frac{1}{r}\theta(t)R(r) - \frac{\theta(t)R(r)}{r^2} + \gamma JB \quad (14)$$

или

$$-\rho\gamma\omega^2 R(r)\theta_m(t) = \theta_m \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r}\theta_m \frac{dR(r)}{dr} - \frac{1}{r^2}\theta_m R(r) + \gamma JB. \quad (15)$$

Тогда основное уравнение динамики спиральной пружины будет иметь следующий вид:

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left[ (\sqrt{\rho\gamma\omega^2})^2 - \frac{1}{r^2} \right] R = -\frac{\gamma BJ_m}{\theta_m}. \quad (16)$$

Получается неоднородное уравнение Бесселя [8]:

$$x^2 y'' + xy' + (k^2 x^2 - \nu^2)y = f(x), \quad (17)$$

или окончательно

$$r^2 R'' + rR' + \left[ (\omega\sqrt{\rho\gamma})^2 r^2 - 1 \right] R = -\frac{\gamma BJ_m}{\theta_m} r^2. \quad (18)$$

Уравнение также может быть записано в виде

$$a_0(r)R'' + a_1(r)R' + a_2(r)R = f(r), \quad (19)$$

где

$$a_0 = r^2; a_1(r) = r;$$

$$a_2(r) = (\omega\sqrt{\rho\gamma})^2 r^2 - 1 \Rightarrow k^2 x^2 - \nu^2, f(r) = -\frac{\gamma BJ_m}{\theta_m} r^2.$$

Решение этого уравнения имеет вид [8]:

$$R(r) = \int_{r_0}^r \sigma(r; \xi) f(\xi) d\xi + c_1 \varphi_1 + c_2 \varphi_2, \quad (20)$$

где функция Грина [8]

$$\sigma(r; \xi) = -\frac{1}{a_0(\xi)} \frac{\varphi_1(r)\varphi_2(\xi) - \varphi_2(r)\varphi_1(\xi)}{\varphi_1(\xi)\varphi_2'(\xi) - \varphi_1'(\xi)\varphi_2(\xi)} \gamma \quad (\xi < r).$$

Геометрические размеры спирали определяются функцией Хевисайда:

$$\gamma(\xi < r) = \begin{cases} 1; & \xi < r \\ 0; & \xi > r \end{cases}$$

$$f(\xi) = -\frac{\gamma BJ_m}{\theta_m} \xi^2. \quad (21)$$

Введение обозначений

$$\omega(\xi) = \varphi_1(\xi)\varphi_2'(\xi) - \varphi_2(\xi)\varphi_1'(\xi), \quad (22)$$

$$m(r; \xi) = \varphi_1(r)\varphi_2(\xi) - \varphi_2(r)\varphi_1(\xi)$$

позволяет при использовании соотношений (21) и (22) получить уравнение (20) в виде

$$R(r) = -\int_{r_0}^r \frac{f(\xi) m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi + C_1 \varphi_1(r) + C_2 \varphi_2(r). \quad (23)$$

Рассмотрены частные решения однородного уравнения Бесселя:

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left[ (\omega\sqrt{\rho\gamma})^2 - \frac{1}{r^2} \right] R = 0, \quad (24)$$

где  $k = \omega\sqrt{\rho\gamma}$ ;  $\nu = 1$ , т.е.

$$\varphi_1(r) = J_\nu(kr) = J_\nu(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r) = J_1(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r),$$

$$\varphi_2(r) = N_\nu(kr) = N_\nu(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r) = N_1(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r), \quad (25)$$

что имеет разложение в ряд вида [8]

$$J_1(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r) = \frac{\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r}{2} \left[ 1 - \frac{\omega^2 \rho \gamma r^2}{2 \cdot 4} + \frac{\omega^4 \rho^2 \gamma^2 r^4}{2 \cdot 4^2 \cdot 6} - \frac{\omega^6 \rho^4 \gamma^4 r^6}{2 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8} + \dots \right], \quad (26)$$

$$N_1(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r) =$$

$$= \frac{J_1(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r) \cos \nu \pi - J_1(\omega\sqrt{\rho\gamma} \cdot r)}{\sin \nu \pi} \Big|_{\nu \neq 1+n \in \mathbb{Z}}.$$

Получена функция Бесселя 2-го рода 1-го порядка ( $\nu$ -порядка).

Тогда с учетом  $U = R(r)\theta(t) = R(r)\theta_m$  получается соотношение для амплитудного значения перемещения витка спирали:

$$U_m = -\int_{r_0}^r \frac{f(\xi) m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi \cdot \theta_m + C_1 \theta_m J_1(kr) + C_2 \theta_m N_1(kr), \quad (27)$$

или же

$$U_m = \gamma BJ_m \int_{r_0}^r \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi + C_1' J_1(kr) + C_2' N_1(kr). \quad (28)$$

Постоянные интегрирования находятся из следующих граничных условий [6].

1. В точке крепления электропроводящей пружины  $r = r_0$

$$U_m = \gamma BJ_m \int_{r_0}^r \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi + C_1 J_1(kr_0) + C_2 N_1(kr_0) = 0, \quad (29)$$

или

$$C_1 = -C_2 \frac{N_1(kr_0)}{J_1(kr_0)}. \quad (30)$$

2. Соответствующие силы в точке  $r = R_0$  во внешнем радиусе спирали

$$F_{\vartheta} = \int_{r_0}^{R_0} JB r dr = JB \left[ \frac{R_0^2}{2} - \frac{r_0^2}{2} \right], \quad (31)$$

$$F_t = \int_{r_0}^{R_0} \sigma_t dr = \left[ \begin{array}{l} \sigma_t = E \cdot \varepsilon_t / r \\ \varepsilon_t = [2\pi(r+u) - 2\pi r] / 2\pi r = \frac{u}{r} \end{array} \right] = \\ = E \varepsilon_t \ln \frac{R_0}{r_0} = \frac{E}{R_0} u(R_0) \ln \frac{R_0}{r_0}.$$

При условии  $F_{\vartheta} = F_t$  выполняется равенство:

$$JB \left[ \frac{R_0^2}{2} - \frac{r_0^2}{2} \right] = \gamma BJ \int_{r_0}^{R_0} \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi - \\ - C_2 \frac{N_1(kr_0)}{J_1(kr_0)} J_1(kR_0) + C_2(kR_0), \quad (32)$$

т.е.

$$C_2 = JB J_1(kr_0) \frac{\left[ \frac{R_0^2}{2} - \frac{r_0^2}{2} \right] - \gamma \int_{r_0}^{R_0} \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi}{J_1(kr_0) N_1(kR_0) - N_1(kr_0) J_1(kR_0)}. \quad (33)$$

В итоге результирующее амплитудное перемещение  $i$ -го витка спирали [9]

$$U_{mi} = \gamma BJ \gamma \int_{r_0}^{r_i} \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi + \\ + JB \left[ \left( \frac{R_0^2}{2} - \frac{r_0^2}{2} \right) - \gamma \int_{r_0}^{R_0} \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi \right] \times \\ \times \left[ \frac{J_1(kr_0) N_1(kr) - N_1(kr_0) J_1(kr)}{J_1(kr_0) N_1(kR_0) - J_1(kR_0) N_1(kr_0)} \right]. \quad (34)$$

Введение обозначения  $A = -\frac{J(kr_0)}{N_1(kr_0)}$  позволяет получить окончательное выражение для перемещения  $i$ -го участка в следующем виде:

$$U_{mi} = \gamma BJ \int_{r_0}^{r_i} \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi + \\ + JB \left[ \left( \frac{R_0^2}{2} - \frac{r_0^2}{2} \right) - \gamma \int_{r_0}^{R_0} \frac{m(r; \xi)}{a_0(\xi) W(\xi)} d\xi \right] \times \\ \times \left[ \frac{J_1(kr_i) + AN_1(kr_i)}{J_1(kR_0) + AN_1(kR_0)} \right]. \quad (35)$$

При пропускании переменного тока  $I_{\max} \sin \omega t$  через электропроводящую спиральную пружину в результате взаимодействия тока с постоянным магнитным полем возникают электромагнитные усилия [7]. Уравнение, описывающее вынужденное движение спирали, имеет вид [10]:

$$\ddot{U}_i + 2n\xi U + n\zeta \omega^2 U_i = \frac{F_{BHI}}{m_i} \sin \omega t, \quad (36)$$

где  $D = n\xi$  — степень успокоения;

$\omega_0$  — собственная частота спиральной пружины;

$F_{BHI}^* \sin \omega t$  — электромагнитная внешняя сила;

$m_i$  — масса  $i$ -го участка спирали;

$\omega$  — частота внешнего возмущения.

Решение уравнения (36) имеет вид:

$$U_i = \frac{F_{BHI}}{m_i \omega_0 \sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (37)$$

где  $q = \omega/\omega_0$  — относительная частота возмущения.

Длина  $i$ -го участка спирали может быть выражена через соотношение  $l_i = 2\pi U_i$ , тогда уравнение, определяющее выходные усилия исследуемого двигателя:

$$F_i = 2\pi m_i JB_0 U_{mi} \frac{q^2}{m_i \omega_0 \sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \times \\ \times \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (38)$$

Исследована выходная характеристика в относительных единицах, где за базовое значение принимается  $F_i^{BA3} = \pi m_i JB L$ , выраженная через полную длину спирали  $L$ . Тогда усилие двигателя в о.е. имеет вид:

$$f_{O.E.} = \frac{U_{mi}}{L} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (39)$$

где  $U_{mi}$  — определяется через выражение (35).

Таким образом, выражение (39) аналогично выражениям, полученным ранее авторами работ [11–20], но методические подходы к решению задачи различны, соответственно, различны ожи-

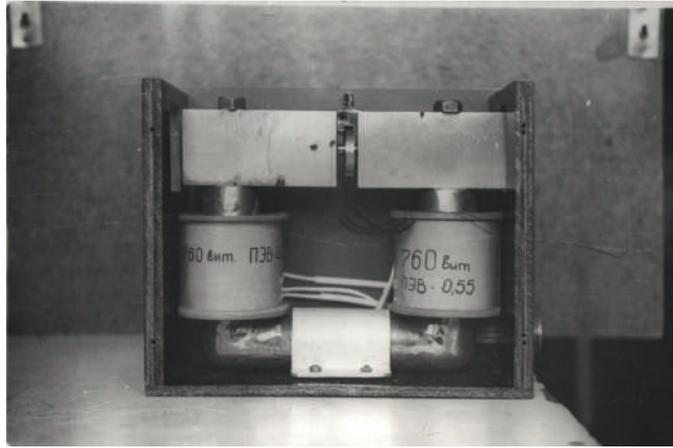


Рисунок 3. Экспериментальная модель ЭМВП-двигателя

Figure 3. Experimental model of an EMVP engine

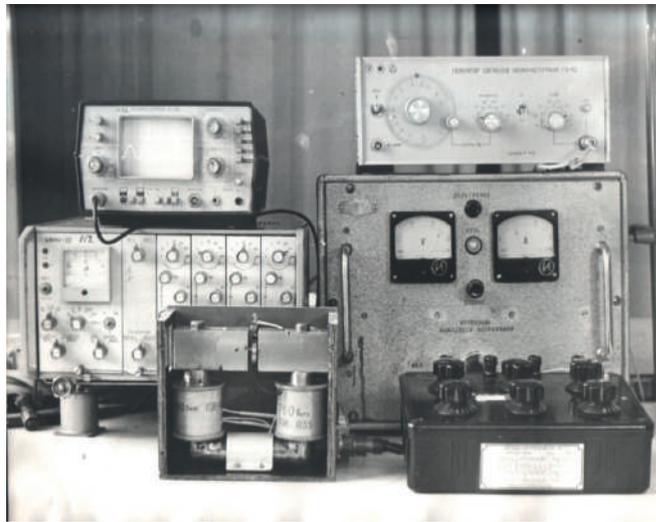


Рисунок 4. Общий вид экспериментальной установки

Figure 4. General view of the experimental unit

даемые результаты в пределах точности на практике.

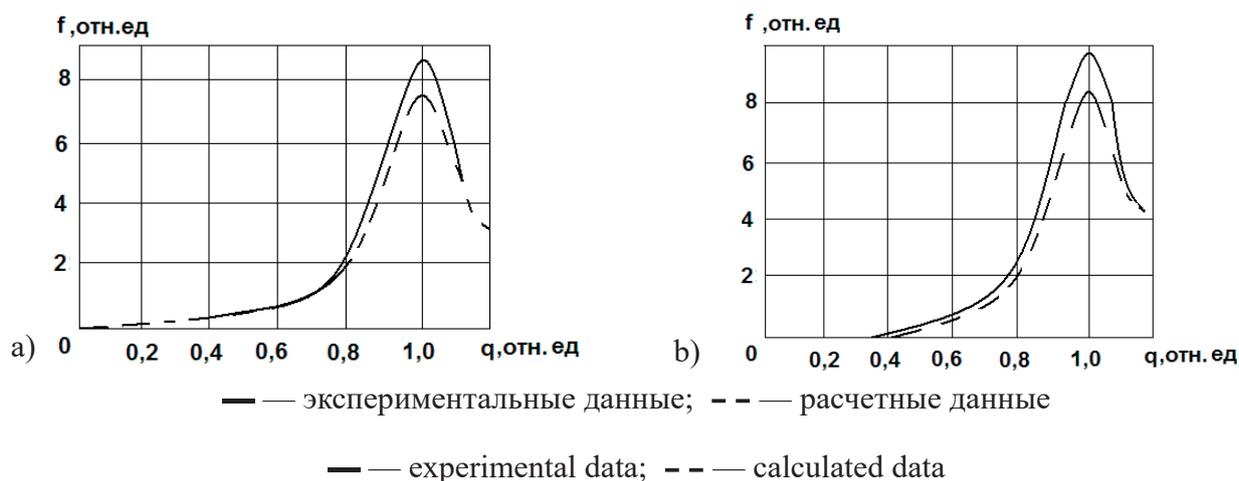
#### Экспериментальные исследования

Сравнение результатов вычислений относительных значений  $f_i^* = \frac{F_i}{\omega^2 J B_0 m_i U_w}$ , полученных численным решением (39), и результатов экспериментальных исследований для двух вариантов исполнений вибрационного электродвигателя со спиральной пружиной из латуни с различными геометрическими размерами приведены на рисунке 5. Для экспериментальных исследований использовались два варианта двигателя, отличающиеся

по ширине спирали, радиусам ее витков и длине ее ленты.

Экспериментальная проверка (рисунок 5) результатов математического моделирования на опытных образцах позволила сделать вывод, что рассчитанные по (39) значения механической характеристики в 80 % случаев совпадают с опытными в пределах погрешности измерений.

Полученные соотношения позволяют анализировать различные конструкции вибрационных преобразователей со спиральным элементом и могут быть использованы при расчетах и проектировании таких преобразователей, работающих как в линейной части механических характе-



**Рисунок 5.** Относительная механическая характеристика опытной модели вибрационного электродвигателя: первый вариант ЭД (а), второй вариант ЭД (б)

**Figure 5.** Relative mechanical characteristics of the experimental model of a vibrating electric motor: the first version of the electric motor (a), the second version of the electric motor (b)

ристик, так и в нелинейной части [6, 18, 20].

### Выводы

1. В работе впервые предлагается новая конструкция электропривода со сложной геометрией вторичного элемента, защищенная патентом РФ.

2. Разработана математическая модель привода с экспериментальным под-

тверждением полученных основных теоретических положений.

3. Установлено, что изменения геометрических размеров спиральной пружины и, соответственно материала, изменяют собственную частоту колебаний спиральной пружины.

4. Полученные теоретические и экспериментальные положения возможно использовать при исследовании и других функциональных преобразователей.

### Список источников

1. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Электромеханические преобразователи энергии со спиральным вторичным элементом. М.: Машиностроение, 2012. 192 с.

2. Пат. 2003982 РФ, МКИ G 01 P 15/11. Датчик скорости изменения ускорений / Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. 04929623, Заявлено 19.04.1991; Опубл. 30.11.1993. Б.И. № 43–44.

3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 271 с.

4. Янгиров И.Ф. Определение собственной частоты колебания спиральной пружины электромеханических преобразователей // Электротехника. 2002. № 11. С. 58–61.

5. Янгиров И.Ф. Оценка механической надежности спиральных конструкций электромеханических элементов систем управления // Приборы и системы управления. 1998. № 4. С. 53–54.

6. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Электромеханический преобразователь со спиральной вторичной системой // Электротехника. 1997. № 4. С. 40–43.

7. Астахов В.И. К расчету силового воздействия магнитного поля на тела, несущие токи // Изв. вузов. Электромеханика. 1984. № 10. С. 5–14.

8. Соболев С.Л. Уравнения математической физики. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

9. Yangirov I.F. Determining the Vibrational Eigenfrequency of the Spiral Spring in Electro-

mechanical Converters // Russian Electrical Engineering. 2002. Vol. 73. No. 11. P. 83–88.

10. Бессонов А.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1987. 528 с.

11. Yangirov I.F. Degree of the Static Characteristic of the Electromechanical Vibrating Transformer // Приборы и системы управления. 2003. № 10. С. 41–44.

12. Yangirov I.F. Transforming Characteristic of the Transformer of Linear Acceleration // Приборы и системы управления. 2003. № 10. С. 47–51.

13. Yangirov I.F. Oscillation Eigenfrequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring // Электротехника. 2002. № 11. С. 58–61.

14. Yangirov I.F. Vibration Motor with a Spiral Secondary Element // Russian Electrical Engineering. 2008. Vol. 79. No. 5. P. 238–242.

15. Селемир В.Д. и др. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения (MG-VII) / Под ред. В.К. Чернышева, В.Д. Селемира, Л.Н. Пляшкевича. Саров: ВНИИЭФ, 1997. Т. 1. С. 248.

16. Boriskin A.S., Brodskii A.Y., Dimant E.M. Linear and Circular Multiloop Voltage Multiplier // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application. 1994. P. 697-712.

17. Рикете Л.У., Бриджес Дж.Э., Майолетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты: Пер. с англ. / Под ред. Н.А. Ухтина. М.: Атомиздат, 1979. 156 с.

18. Саркисян Р.Г. Некоторые вопросы экспериментального определения механических характеристик электродвигателя: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИЭлектромаш, 1977. 32 с.

19. Стрижак В.Я., Коковский И.Я. Электрические настольные часы с радиокорректирующим устройством и пьезодвигателем // Изв. вузов. Приборостроение. 1984. № 3. С. 47-50.

20. Янгиров И.Ф. Система автоматизированного проектирования спирального вибрационного преобразователя // Технология машиностроения. 2011. № 3. С. 53–56.

## References

1. Ismagilov F.R., Yangirov I.F. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii so spiral'nykh vtorichnykh elementom* [Electromechanical Energy Converters with A Spiral Secondary

Element]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 192 p. [in Russian].

2. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F. *Datchik skorosti izmeneniya uskorennii* [Acceleration Change Rate Sensor]. Patent RF, No. 2003982, 1993. [in Russian].

3. Vol'dek A.I. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Induction Magnetohydrodynamic Machines with a Liquid Metal Working Body]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 271 p. [in Russian].

4. Yangirov I.F. Opredelenie sobstvennoi chasty kolebaniya spiral'noi pruzhiny elektromekhanicheskikh preobrazovatelei [Determination of the Natural Frequency of Oscillation of the Helical Spring of Electromechanical Converters]. *Elektrotehnika — Electrotechniques*, 2002, No. 11, pp. 58–61. [in Russian].

5. Yangirov I.F. Otsenka mekhanicheskoi nadezhnosti spiral'nykh konstruktsii elektromekhanicheskikh elementov sistem upravleniya [Evaluation of the Mechanical Reliability of Spiral Structures of Electromechanical Elements of Control Systems]. *Pribory i sistemy upravleniya — Instruments and Control Systems*, 1998, No. 4, pp. 53–54. [in Russian].

6. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F. Elektromekhanicheskii preobrazovatel' so spiral'noi vtorichnoi sistemoi [Electromechanical Converter with a Spiral Secondary System]. *Elektrotehnika — Electrotechniques*, 1997, No. 4, pp. 40–43. [in Russian].

7. Astakhov V.I. K raschetu silovogo vozdeistviya magnitnogo polya na tela, nesushchie toki [On the Calculation of the Force Impact of a Magnetic Field on Bodies Carrying Currents]. *Izv. universitets. Electromechanics — Russian Electromechanics*, 1984, No. 10, pp. 5–14. [in Russian].

8. Sobolev S.L. *Uravneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 352 p. [in Russian].

9. Yangirov I.F. Determining the Vibrational Eigenfrequency of the Spiral Spring in Electromechanical Converters. *Russian Electrical Engineering*, 2002, Vol. 73, No. 11, pp. 83–88.

10. Bessonov A.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: Elektricheskie tsepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 528 p. [in Russian].

11. Yangirov I.F. Degree of the Static Characteristic of the Electromechanical Vibrating Transformer. *Pribory i sistemy upravleniya — Instruments and Control Systems*, 2003, No. 10, pp. 41–44.
12. Yangirov I.F. Transforming Characteristic of the Transformer of Linear Acceleration. *Pribory i sistemy upravleniya — Instruments and Control Systems*, 2003, No. 10, pp. 47–51.
13. Yangirov I.F. Oscillation Eigen-frequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring. *Elektrotehnika — Electrotechniques*, 2002, No. 11, pp. 58–61.
14. Yangirov I.F. Vibration Motor with a Spiral Secondary Element. *Russian Electrical Engineering*, 2008, Vol. 79, No. 5, pp. 238–242.
15. Selemir V.D. e.a. *Megagaussnaya i megaampernaya impul'snaya tekhnologiya i primeniya (MG-VII)* [Megagauss and Megaampere Pulse Technology and Applications (MG-VII)]. Ed. by V.K. Chernyshev, V.D. Selemir, L.N. Plyashkevich. Sarov, VNIIEF, 1997, Vol. 1, pp. 248. [in Russian].
16. Boriskin A.S., Brodskii A.Y., Dimant E.M. Linear and Circular Multiloop Voltage Multiplier. *Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Application*, 1994, pp. 697-712.
17. Rikete L.U., Bridzhes Dzh.E., Maiioletta Dzh. *Elektromagnitnyi impul's i metody zashchity: Per. s angl.* [Electromagnetic Pulse and Protection Methods: Transl. from English]. Ed. by N.A. Ukhtin. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 156 p. [in Russian].
18. Sarkisyan R.G. *Nekotorye voprosy eksperimental'nogo opredeleniya mekhanicheskikh kharakteristik elektrodvigatelya: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Some Questions of the Experimental Determination of the Mechanical Characteristics of the Electric Motor: avtoref. ... Cand. Engin. Sci.]. Moscow, VNIIElektromash, 1977. 32 p. [in Russian].
19. Strizhak V.Ya., Kokovskii I.Ya. Elektricheskie nastol'nye chasy s radio-korrek-tiruyushchim ustroystvom i p'ezodvigatelem [Electric Table Clock with a Radio-Correcting Device and a Piezo-Engine]. *Izv. vuzov. Priborostroenie — Izv. universities. Instrumentation*, 1984, No. 3, pp. 47-50. [in Russian].
20. Yangirov I.F. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya spiral'nogo vibratsionnogo preobrazovatelya [Computer-Aided Design System for a Spiral Vibration Transducer]. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Engineering Technology*, 2011, No. 3, pp. 53–56. [in Russian].



**Борис Андреевич Косарев**

**Boris A. Kosarev**

кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры «Электрическая техника»,  
Омский государственный технический университет,  
Омск, Россия

УДК 621.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-45-55

## **ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ 6–220 кВ: ТЕОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **Актуальность**

Статья посвящена систематизации и обобщению теоретических и экспериментальных исследований феррорезонансных перенапряжений в электроустановках 6–220 кВ. Потребность в исследовании данного вопроса связана с активным внедрением в распределительные сети, а также сети среднего и низкого напряжения объектов распределенной генерации. В энергорайонах с объектами распределенной генерации параметры настройки и алгоритм работы устройств релейной защиты и автоматики отличаются от традиционных, используемых при централизованном электропитании. Также отличаются параметры генерации и характер электромеханических переходных процессов, что вызвано низкой динамической устойчивостью генерирующих установок на основе синхронной генерации и использованием сетевых инверторов с накопителем энергии при электронной генерации. Таким образом, из-за значительных отличий параметров режима работы сети с объектами распределенной генерации и без них необходимо пересматривать многие широко известные технические задачи, в том числе и вопрос феррорезонансных процессов. В качестве объекта исследований выбраны именно электроустановки 6–220 кВ, так как понятие распределенной генерации не подразумевает системообразующие сети, а максимальная установленная мощность отдельного объекта ограничена величиной 25 МВт.

### **Цель исследования**

Систематизировать и обобщить теоретические и экспериментальные исследования феррорезонансных перенапряжений в электроустановках 6–220 кВ.

### **Методы исследования**

Для исследования схемно-режимных условий возникновения феррорезонансных процессов в электроустановках 6–220 кВ проведен анализ зарубежных и отечественных публикаций, стандартов, а также использованы теоретические основы электротехники и теория нелинейных электрических цепей.

### **Результаты**

Рассмотрены физическая сущность явления феррорезонанса, условия возникновения феррорезонансных процессов и мероприятия по их предотвращению в сетях среднего и высокого напряжения, экспериментальные исследования феррорезонансных процессов.

Феррорезонансный процесс заключается в компенсации индуктивного и емкостного сопротивлений в колебательном контуре при насыщенном сердечнике индуктивности. Существуют различные режимы феррорезонанса, которые определяются начальными условиями: основной, субгармонический, аperiodический и хаотический. Обязательным условием возникновения феррорезонансного процесса является достаточная для насыщения сердечника индуктивности мощность источника питания.

Нелинейной индуктивностью, которая может участвовать в формировании колебательного контура, являются трансформаторы напряжения, силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы. В качестве емкости контура могут выступать линия электропередачи, система шин, батарея конденсаторов, шунтирующие конденсаторы выключателей. Аппаратные и оперативные мероприятия по защите от феррорезонансных процессов в электроустановках направлены на изменение емкости или индуктивности элементов сети, которые могут участвовать в формировании феррорезонансного колебательного контура, предотвращение формирования такого контура или уменьшение его добротности. Результаты экспериментальных исследований феррорезонансных процессов не противоречат методическим указаниям по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках.

**Ключевые слова:** феррорезонансные перенапряжения, распределенная генерация, феррорезонансный процесс, электроустановка, система шин, высоковольтный выключатель, нелинейная индуктивность

## **FERRORESONANCE OVERVOLTAGES IN ELECTRICAL INSTALLATIONS 6–220 kV: THEORY AND RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES**

### **Relevance**

The article is devoted to the systematization and generalization of theoretical and experimental studies of ferroresonance overvoltages in electrical installations 6–220 kV. The need to study this issue is associated with the active introduction of distributed generation facilities into distribution networks, as well as medium and low voltage networks. In power districts with distributed generation facilities, the settings and operation algorithm of relay protection and automation devices differ from the traditional ones used in centralized power supply. The generation parameters and the nature of electromechanical transients also differ, which is caused by the low dynamic stability of generating plants based on synchronous generation and the use of network inverters with energy storage in electronic generation. Thus, due to significant differences in the parameters of the network operation mode with and without distributed generation objects, it is necessary to revise many well-known technical problems, including the issue of ferroresonant processes. Electrical installations of 6–220 kV were chosen as the object of research, since the concept of distributed generation does not imply backbone networks, and the maximum installed power of an individual facility is limited by 25 MW.

### **Aim of Research**

Aim of research is to systematize and summarize the theoretical and experimental studies of ferroresonance overvoltages in electrical installations 6–220 kV.

### **Research methods**

To study the circuit-mode conditions for the occurrence of ferroresonant processes in electrical installations of 6–220 kV, an analysis of foreign and domestic publications, standards was carried out, and the theoretical foundations of electrical engineering and the theory of nonlinear electrical circuits were used.

### **Results**

The physical essence of the phenomenon of ferroresonance, the conditions for the occurrence of ferroresonant processes and measures to prevent them in medium and high voltage networks, experimental studies of ferroresonant processes are considered.

The ferroresonant process consists in compensating the inductive and capacitive resistances in the oscillatory circuit with a saturated inductance core. There are various modes of ferroresonance, which are determined by the initial conditions: fundamental, subharmonic, aperiodic and chaotic. A prerequisite for the occurrence of a ferroresonant process is the power of the power source sufficient to saturate the inductance core.

Non-linear inductance that can participate in the formation of an oscillatory circuit are voltage transformers, power transformers, shunt reactors. The capacity of the circuit can be a power line, a busbar system, a capacitor bank, shunt capacitors of switches. Hardware and operational measures to protect against ferroresonant processes in electrical installations are aimed at changing the capacitance or inductance of network elements that may participate in the formation of a ferroresonant oscillatory circuit, preventing the formation of such a circuit or reducing its quality factor. The results of experimental studies of ferroresonant processes do not contradict the guidelines for protection against resonant voltage increases in electrical installations.

**Keywords:** ferroresonance overvoltages, distributed generation, ferroresonant process, electrical installation, busbar system, high-voltage switch, non-linear inductance

## Введение

Любая система электроснабжения (СЭ) содержит индуктивности с ферромагнитным сердечником и емкостные элементы. Поэтому для СЭ существует принципиальная возможность формирования резонансных контуров и возникновения феррорезонансных процессов (ФП). Феррорезонансный процесс заключается в компенсации индуктивного и емкостного сопротивлений в колебательном контуре при насыщенном сердечнике индуктивности.

При ФП в элементах СЭ возникают перенапряжения, которые приводят к их аварийному выходу из строя. Проведено значительное количество исследований случаев возникновения феррорезонансных контуров в СЭ и предложены различные мероприятия по предотвращению ФП.

В настоящее время перспективным направлением развития СЭ является внедрение в распределительные сети и сети внутреннего электроснабжения предприятий объектов распределенной генерацией (РГ) [1, 2]. В таких СЭ объекты РГ максимально приближены к узлам нагрузки и имеют установленную мощность не более 25 МВт.

Основными преимуществами СЭ с РГ являются малые потери на передачу, возможность создания локальных СЭ и использования для генерации любых доступных энергоресурсов, перехода к

островному режиму работы при возникновении аварийного режима работы прилегающей сети, компенсации дефицита мощности в узлах нагрузки и т.п.

К недостаткам СЭ с РГ следует отнести значительные отклонения напряжения и частоты от их номинальных значений при сверхнормативных возмущениях режима работы таких систем. В случае использования генерирующих установок на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и турбогенераторных установок (ТГУ) со свободной силовой турбиной низкая режимная устойчивость обусловлена малыми значениями постоянных инерции таких установок [3]. При использовании альтернативных источников энергии на режимную устойчивость могут влиять стохастический характер генерации и параметры накопителей энергии. Также в СЭ с РГ из-за близости генерации и нагрузки возрастает влияние токов короткого замыкания на режим работы ГУ.

Таким образом, в СЭ с РГ существует высокая вероятность возникновения ФП за счет сверхнормативных возмущений режима работы ГУ и сети.

Вопрос возникновения ФП в СЭ с РГ представляется малоизученным. Однако при помощи обобщения и систематизации полученных данных о ФП в системах централизованного электроснабжения можно получить представление о ФП в СЭ с РГ. В качестве объекта исследований

выбраны именно электроустановки 6–220 кВ, так как понятие распределенной генерации не подразумевает системообразующие сети, а максимальная установленная мощность отдельной электростанции ограничена величиной 25 МВт.

В этой связи целью данной работы является систематизация и обобщение теоретических и экспериментальных исследований феррорезонансных перенапряжений в электроустановках 6–220 кВ.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- рассмотреть физическую сущность явления ФП;
- рассмотреть схемно-режимные условия возникновения ФП и мероприятия по их предотвращению в сетях среднего и высокого напряжения системы централизованного электроснабжения;
- рассмотреть основные случаи возникновения ФП в системах централизованного электроснабжения на примере экспериментальных исследований.

**Теоретические основы возникновения режима феррорезонанса в колебательном контуре.** Рассмотрим колебательный контур и возникновение в нем резонанса с точки зрения радиотехники.

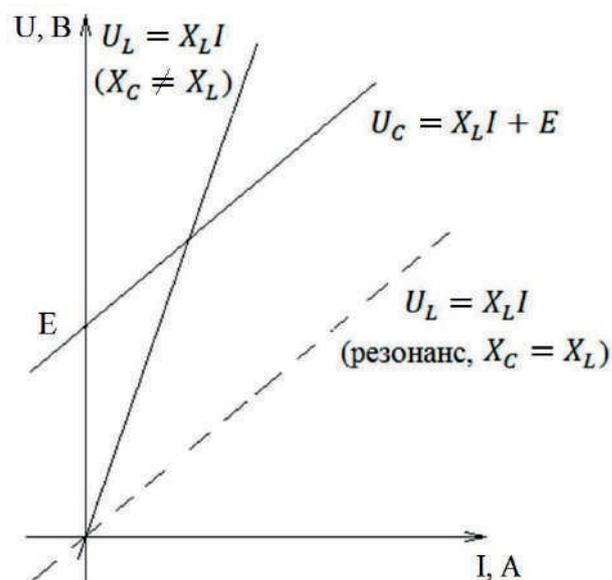
Простейший колебательный контур представляет собой последовательное или параллельное соединение двух реактивных сопротивлений противоположного знака: индуктивного  $X_L$  и емкостного  $X_C$ .

Реактивное сопротивление катушки индуктивности  $X_L$  прямо пропорционально частоте и индуктивности. Реактивное сопротивление конденсатора  $X_C$  обратно пропорционально частоте и емкости.

Резонансная частота колебательного контура  $f_0$  (при параллельном или последовательном соединении реактивных элементов) соответствует равенству сопротивлений  $X_L$  и  $X_C$  и рассчитывается согласно формуле Томсона.

Если в колебательном контуре индуктивное сопротивление линейное, тогда при неизменном емкостном сопротивлении ( $X_C = \text{const}$ ) существует единственное значение резонансной частоты  $f_0$ .

На рисунке 1 показано графическое решение условий возникновения резонанса.



$U_L$  — напряжение на катушке индуктивности;  $X_L$  — индуктивное сопротивление;  $I$  — ток в контуре;  $X_C$  — емкостное сопротивление;  $U_C$  — напряжение на конденсаторе;  $E$  — напряжение источника питания

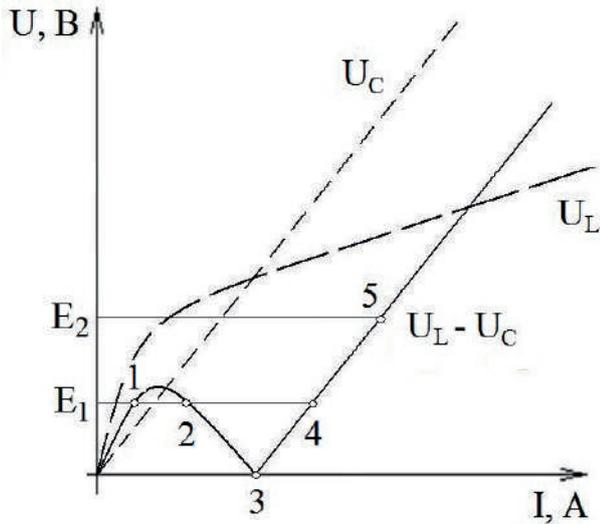
$U_L$  — voltage across the inductor;  $X_L$  — inductive reactance;  $I$  — current in the loop;  $X_C$  — capacitance;  $U_C$  — voltage across the capacitor;  $E$  — voltage of the power supply

**Рисунок 1.** Графическое решение условий возникновения резонанса в последовательном колебательном контуре с линейной индуктивностью

**Figure 1.** Graphical solution of the conditions for the occurrence of resonance in a series oscillatory circuit with a linear inductance

Резонансу соответствует параллельность прямых напряжения на конденсаторе  $U_C$  и напряжения на катушке индуктивности  $U_L$  (равенство угловых коэффициентов прямых  $X_L$  и  $X_C$ ).

Феррорезонанс характерен для нелинейной индуктивности, у которой индуктивное сопротивление  $X_L$  зависит не только от частоты, но и от плотности магнитного потока. Нелинейные свойства индуктивности определяются свойствами сердечника из ферромагнитного материала. При этом, кривая насыщения индуктивности содержит как линейные, так и криволинейные участки (рисунок 2).



$U_C$  — напряжение на конденсаторе;  
 $U_L$  — напряжение на катушке индуктивности;  $E_1$  и  $E_2$  — напряжения источника питания

$U_C$  — voltage across the capacitor;  
 $U_L$  — voltage on the inductor;  $E_1, E_2$  — power supply voltages

**Рисунок 2.** Графическое решение условий возникновения резонанса в последовательном колебательном контуре с нелинейной индуктивностью

**Figure 2.** Graphical solution of the conditions for the occurrence of resonance in a series oscillatory circuit with a nonlinear inductance

Показанный на рисунке 2 график вольт-амперных характеристик реактивных элементов можно условно разделить на индуктивную область (напряжение на индуктивности больше напряжения на емкости) и емкостную область (напряжение на емкости больше напряжения на

индуктивности). Граница разделения областей 3 является точкой резонанса напряжений при  $f_0$ . Некоторому значению напряжения источника питания  $E_1$  соответствуют три возможных рабочих точки 1, 2 и 4. В точке 1 возникновение феррорезонанса в колебательном контуре невозможно. Рабочая точка находится в индуктивной области. Точка 2 соответствует неустойчивому состоянию. Режим феррорезонанса возникает при переходе из индуктивной области в емкостную в точке 4 и зависит от начальных условий: остаточного магнитного потока в магнитопроводе индуктивного элемента, величины заряда конденсатора, напряжения источника питания, момента включения. Режим феррорезонанса отличается высокой устойчивостью при условии достаточной мощности источника питания для поддержания режима насыщения магнитопровода индуктивного элемента.

Существует несколько типов режима феррорезонанса [4]:

1. Основной режим феррорезонанса. При основном режиме феррорезонанса форма кривых тока и напряжения искажена, период колебаний соответствует источнику питания. Спектр сигнала содержит основную моду и гармоники. Фазовый портрет системы замкнутый. Сечение Пуанкаре содержит одну точку.

2. Субгармонический режим феррорезонанса. Период колебаний  $T$  кратен основной частоте:  $nT$ , где  $n$  — целое число. Спектр сигнала содержит основную моду  $f/n$  и гармоники. Фазовый портрет системы замкнутый и состоит из  $n$  траекторий. Сечение Пуанкаре содержит  $n$  точек.

3. Квазипериодический режим феррорезонанса. Сигнал колебаний непериодический, но его спектр не непрерывный. На карте Пуанкаре несколько точек демонстрируют замкнутый виток. Фазовый портрет состоит из изменяющихся траекторий.

4. Хаотический режим феррорезонанса. Сигнал колебаний имеет непредсказуемый, нерегулярный характер. Спектр сигнала непрерывный. Фазовый портрет системы является странным аттрактором. На карте Пуанкаре точки расположены хаотично.

Отметим некоторые условия возникновения феррорезонанса. В колебательном контуре с нелинейной индуктивностью при высоком значении напряжения источника питания  $E_2$  (рисунок 2) возможен только режим феррорезонанса (точка 5), так как сердечник дросселя или трансформатора достигает насыщения. Для некоторого значения частоты и индуктивности в колебательном контуре феррорезонанс может возникнуть при широком диапазоне значений емкости. Если магнитная цепь дросселя или трансформатора обладает малыми потерями, то вероятность возникновения режима феррорезонанса увеличивается [5].

**Схемно-режимные условия возникновения ФП и мероприятия по их предотвращению.** Рассмотрим схемно-режимные условия возникновения ФП. Для возникновения ФП в СЭ должны существовать колебательный контур, содержащий емкость и нелинейную индуктивность, а также возмущение режима работы сети, достаточное для насыщения магнитопровода этой индуктивности.

В СЭ нелинейной индуктивностью, которая может участвовать в формировании колебательного контура, являются трансформаторы напряжения, силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы. В качестве емкости колебательного контура может выступать линия электропередачи, система шин, батареи конденсаторов (установки продольной и поперечной компенсации), шунтирующие конденсаторы выключателей.

К нормативным или аварийным возмущениям режима работы СЭ, которые могут привести к формированию колеба-

тельного контура с нелинейной индуктивностью с насыщенным сердечником, относятся грозовые перенапряжения, оперативные переключения на подстанциях, короткие замыкания на линии электропередачи, возникновение неполнофазных включений участков сети, колебания величины нагрузки потребителя.

Перейдем к рассмотрению мероприятий по предотвращению ФП. ФП является аварийным режимом работы, который следует выявлять и устранять. На практике для выявления ФП в СЭ можно использовать следующие признаки: перенапряжение или сверхток в прилегающей сети; устойчивый уровень искажений синусоидальности кривой напряжения; акустический шум от магнитоstrictionных деформаций магнитопровода трансформатора или дросселя; перегрев трансформатора или дросселя; фликер; пробой изоляции обмотки трансформатора или дросселя; ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики [6–9].

Мероприятия по предотвращению ФП разделяют на аппаратные и оперативные. Мероприятия по предотвращению ФП в электроустановках 6–220 кВ подробно описаны в СТО 56947007-29.240.10.191-2014. На основании данного СТО в виде таблиц сопоставлены феррорезонансные колебательные контуры, причины возникновения ФП и мероприятия по защите от ФП (таблицы 1, 2).

Обозначения в таблице 1: ФП — феррорезонансный процесс; ТН — трансформатор напряжения; ОЗЗ — однофазное замыкание на землю; Тр — силовой трансформатор; ВЛ — воздушная линия электропередачи; КЛ — кабельная линия электропередачи.

Из таблицы 1 следует, что неизменным индуктивным элементом феррорезонансного колебательного контура в электроустановках 6–35 кВ является ТН и основным методом борьбы с ФП является

**Таблица 1.** Феррорезонансные перенапряжения в электроустановках 6–35 кВ**Table 1.** Ferroresonant overvoltages in electrical installations 6–35 kV

Вид ФП	Феррорезонансный колебательный контур	Причина ФП	Мероприятия по защите от ФП
Самопроизвольное смещение нейтрали («ложная земля»)	Индуктивность ТН, емкость сети (элементы сети не повреждаются)	Разновременность включения фаз выключателей при коммутации сети	1. Антирезонансные ТН. 2. Установка резистора во вторичную обмотку ТН. 3. Установка резистора в разомкнутый треугольник дополнительной обмотки ТН.
Субгармонический	Индуктивность ТН, емкость короткой линии (повреждение ТН)	Соответствие субгармоники резонансной частоте контура	Антирезонансные ТН.
ОЗЗ через перемежающуюся дугу	Индуктивность ТН, емкость сети	Перемежающаяся дуга приводит к насыщению магнитопровода ТН	1. Антирезонансные ТН. 2. Установка резистора в разомкнутый треугольник дополнительной обмотки ТН.
Несимметричная схема сети	Индуктивность Тр, емкость сети (повреждение ТН и ОПН)	Неполнофазный режим (обрыв проводов ВЛ, неполнофазные коммутации выключателей, перегорание предохранителей)	1. Антирезонансные ТН. 2. Запрещаются пофазные включения/отключения ВЛ и КЛ. 3. Нежелательны подключения Тр через плавкие вставки.

**Таблица 2.** Феррорезонансные перенапряжения в электроустановках 110–220 кВ**Table 2.** Ferroresonant overvoltages in electrical installations 110–220 kV

Феррорезонансный колебательный контур	Причина ФП	Мероприятия по защите от ФП
ВЛ, слабо нагруженный Тр с разземленной нейтралью и замкнутой в треугольник обмоткой	Неполнофазная коммутация ВЛ или обрыв проводов (оборванный провод не касается земли)	1. Если Тр подключены без выключателей, заземлять нейтраль хотя бы одного из них. 2. Если Тр подключен к магистральной ВЛ через выключатель с уставкой по току, то его нейтраль может быть заземлена. 3. На ПС с Тр с выключателем и разземленной нейтралью использовать РЗА, действующую на отключение выключателя.
ВЛ, ШР	ОАПВ ВЛ после погасания тока подпитки и компенсации реактивной мощности около 100 %	1. Установка КР в нейтралях ШР (компенсация межфазных емкостей). 2. Отключение группы ШР или одной фазы ШР на время бестоковой паузы ОАПВ. 3. Использование адаптивного ОАПВ.
ВЛ, ШР	Отключение ВЛ и её взаимоиנדукция с соседними подключенными ВЛ	Установка КР в нейтралях ШР.
ТН РУ 220 кВ, шины, ВЛ	Оперативные переключения на шинах ПС	1. Антирезонансный ТН. 2. Тр, присоединяемый к отключаемым шинам, должен иметь заземленную нейтраль. 3. Запрет на отключение Тр или АТ, у которого отключено напряжение со стороны обмоток смежного напряжения. 4. Запрет на отключение ВЛ, отходящей от шин РУ или КРУЭ и отключенной с противоположной стороны. 5. Использование конденсаторов связи для изменения емкости системы шин.

использование ТН с антирезонансной конструкцией. Исключение составляет случай формирования несимметричной схемы сети, когда в ФП участвует силовой ТР. При этом для защиты от возникновения ФП запрещаются пофазные оперативные переключения на ВЛ и КЛ, а для исключения вероятности обрыва фазы силовые ТР не должны подключаться через плавкие вставки. В виде емкостного элемента феррорезонансного колебательного контура в электроустановках 6–35 кВ выступает емкость прилегающей сети. Причинами возникновения ФП в электроустановках 6–35 кВ являются неполнофазный режим работы сети, разновременность включения фаз выключателей при коммутации сети, соответствие субгармоники резонансной частоте контура. Аппаратными мероприятиями, позволяющими предотвратить возникновение любых видов ФП в электроустановках 6–35 кВ, являются заземление нейтрали сети через высокоомный резистор с сопротивлением больше емкостного сопротивления сети и заземление нейтрали сети через ДГР, если емкостной ток замыкания на землю 10 А и больше.

Обозначения в таблице 2: ФП — феррорезонансный процесс; ТН — трансформатор напряжения; Тр — силовой трансформатор; ВЛ — воздушная линия электропередачи; ШР — шунтирующий реактор; РУ — распределительное устройство; ОАПВ — однофазное автоматическое повторное включение; ПС — подстанция электрическая; РЗА — релейная защита и автоматика; АТ — автотрансформатор; КРУЭ — комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией; КР — компенсационный реактор.

Из таблицы 2 следует, что в электроустановках 110–220 кВ индуктивным элементом феррорезонансного колебательного контура является ШР, измерительный или силовой трансформатор. В каче-

стве емкостного элемента феррорезонансного колебательного контура выступает ВЛ, система шин, шунтирующие конденсаторы многоразрывных выключателей. Причинами возникновения ФП в электроустановках 110–220 кВ являются неполнофазный режим работы сети, взаимоиндукция отключенной и подключенной ВЛ, оперативные переключения на шинах ПС. Аппаратные мероприятия по защите от ФП в электроустановках 110–220 кВ направлены на изменение емкости или индуктивности элементов сети, которые могут участвовать в формировании феррорезонансного колебательного контура. Например, к таким мероприятиям относится использование конденсаторов связи для изменения емкости системы шин. Для предотвращения участия в ФП силового трансформатора рекомендуется заземлять его нейтраль или предусматривать отключение трансформатора устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА).

**Результаты экспериментальных исследований ФП в СЭ.** Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, отражающих основные случаи возникновения ФП.

Согласно [10] в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью нелинейным индуктивным элементом, входящим в состав феррорезонансного колебательного контура, выступают силовые трансформаторы 6(10)/0,4 кВ. Разветвленная распределительная сеть внешней электросистемы соответствует емкостному элементу такого контура (0,5–5 мкФ). Экспериментальные результаты показали, что при обрыве одной из фаз со стороны внешней электросистемы ЭС и малой величине нагрузки потребителя возможен устойчивый ФП с прямым или обратным чередованием фаз силового трансформатора. При этом силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ функционирует в режиме феррорезонансного преоб-

разователя. Также отмечено, что при ФП величина напряжения на поврежденной фазе может превышать номинальное значение в 2,2 раза или в 3,8 раза.

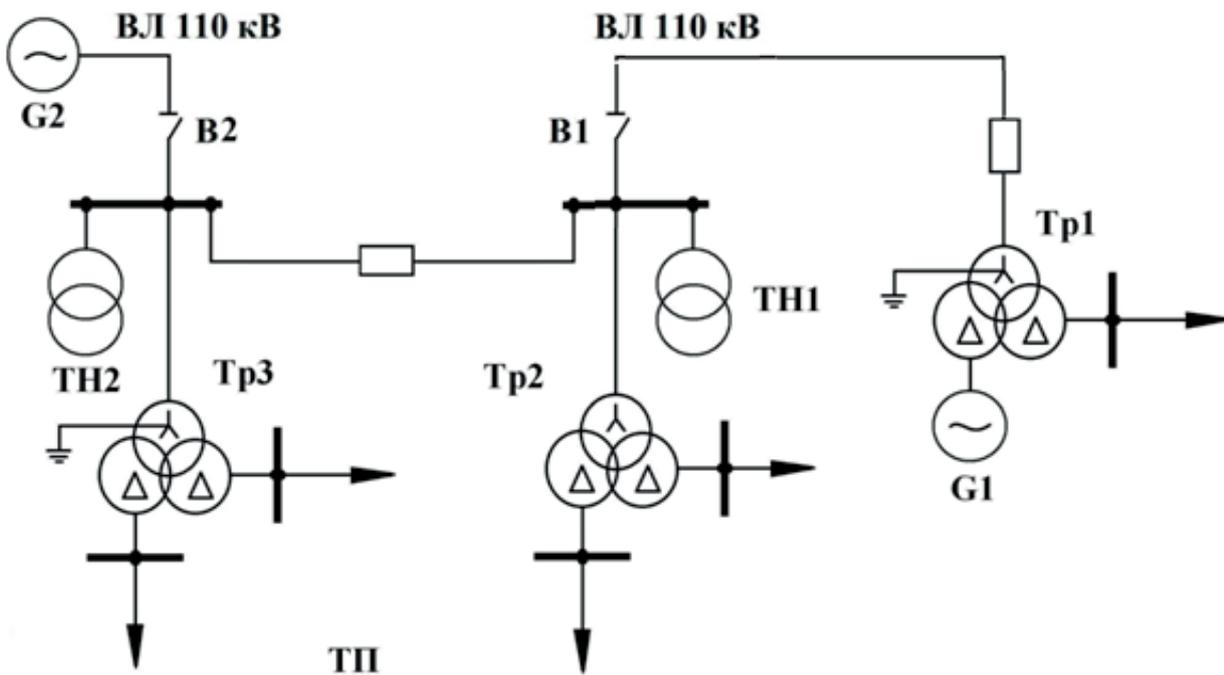
В [11] описан ФП в сети 110 кВ с заземленной нейтралью. Феррорезонансный колебательный контур образован трансформатором напряжения ТН1 и эквивалентной емкостью воздушной линии ВЛ (рисунок 3).

Причиной ФП послужило неполнофазное включение участка ВЛ 110 кВ между силовыми трансформаторами Тр1 и Тр2 выключателем В1. Также в исследовании теоретически и экспериментально доказывается возможность ФП с участием силового трансформатора Тр2 трансформаторной подстанции ТП. Условием такого ФП является преобладание емкост-

ного сопротивления прилегающей сети над индуктивным сопротивлением обмотки высокого напряжения Тр2, что возможно при насыщении магнитной системы силового трансформатора.

Возникновение ФП в сетях с заземленной нейтралью также возможно при оперативных переключениях на шинах распределительных устройств. В [12] описан ФП с участием трансформатора напряжения.

ФП инициировал вывод в ремонт одной из систем шин путем отключения воздушных выключателей В1–В3. Феррорезонансный колебательный контур образуют шунтирующие конденсаторы С1–С3 воздушных выключателей и первичная обмотка трансформатора напряжения ТН (рисунок 4).

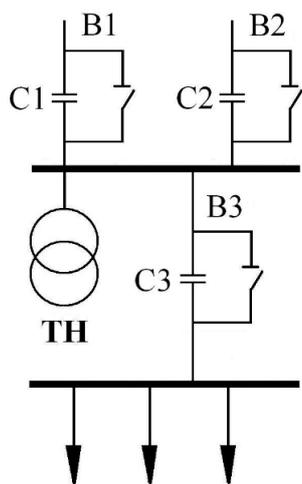


ВЛ — воздушная линия электропередачи; G1, G2 — электростанции;  
 В1, В2 — высоковольтные выключатели; ТН1, ТН2 — трансформаторы напряжения;  
 Тр1–Тр3 — силовые трансформаторы; ТП — трансформаторная подстанция

ВЛ — overhead power line; G1, G2 — power stations; В1, В2 — high voltage circuit breaker;  
 ТН1, ТН2 — voltage transformers; Тр1–Тр3 — power transformers;  
 ТП — transformer substation

**Рисунок 3.** Схема участка сети с феррорезонансным колебательным контуром

**Figure 3.** Scheme of a network section with a ferroresonant oscillatory circuit



B1–B3 — высоковольтные выключатели;  
 TH — трансформатор напряжения;  
 C1–C3 — шунтирующие конденсаторы

B1–B3 — high voltage circuit breakers;  
 TH — voltage transformer;  
 C1–C3 — shunt capacitors

**Рисунок 4.** Схема распределительного устройства 220 кВ подстанции при возникновении ФП

**Figure 4.** Switchgear diagram of a 220 kV substation in the event of ferroresonance

Также в работе отмечено, что устойчивому ФП на основной гармонике предшествовал субгармонический резонанс.

### Выводы

1. ФП заключается в компенсации индуктивного и емкостного сопротивления

### Список источников

1. Бык Ф.Л., Илюшин П.В., Мышкина Л.С. Особенности и перспективы развития распределенной энергетики в России // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 6. С. 78–87.
2. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Пелевин П.С. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации // Электричество. 2019. № 7. С. 22–35.
3. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с.
4. Valverde V., Mazon A.J., Zamora I., Buiques G. Ferroresonance in Voltage Transformers:

ний в колебательном контуре при насыщенном сердечнике индуктивности. Существуют различные режимы ФП, которые определяются начальными условиями: основной, субгармонический, аperiodический и хаотический. Обязательным условием возникновения ФП является достаточная для насыщения сердечника индуктивности мощность источника питания.

2. В СЭ нелинейной индуктивностью, которая может участвовать в формировании колебательного контура, являются измерительные и силовые трансформаторы, шунтирующие реакторы. В качестве емкости контура могут выступать линия электропередачи, система шин, батарея конденсаторов, шунтирующие конденсаторы выключателей. Аппаратные и оперативные мероприятия по защите от ФП в СЭ направлены на изменение емкости или индуктивности элементов сети, которые могут участвовать в формировании феррорезонансного колебательного контура, предотвращение формирования такого контура или уменьшение его добротности [13].

3. Результаты экспериментальных исследований ФП не противоречат методическим указаниям по защите от резонансных повышений напряжения.

Analysis and Simulations // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2011. Vol. 1. P. 465–471.

5. Drapela J., Toman P., Orsagova J., Kratky M. Simulation of Ferroresonance Phenomena in Power Systems // Proc. of the 5th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, December 16–18, 2005. Tenerife, Spain, 2005. P. 373–377.

6. Dugan R.C. Examples of Ferroresonance in Distribution System // IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003. P. 1213–1215.

7. Iravani M., Chaudhary A. e.a. Slow Transient Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs. Modeling and Analysis

Guidelines for Slowtransients — Part III: The Study of Ferroresonance // *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2000. Vol. 15. No. 1, Jan., pp. 255–265.

8. Jacobson D.A. Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. July, 2003. P. 1206–1212.

9. Tanggawelu B., Mukerjee R.N., Ariffin A.E. Ferroresonance Studies in Malaysian Utility's Distribution Network // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. July, 2003. Vol. 2. P. 1216–1219.

10. Алексеев В.Г., Зихерман М.Х. Феррорезонанс в сетях 6–10 кВ // *Электрические станции*. 1979. № 1. С. 63–65.

11. Айзстраутс Э.В. Феррорезонанс в сети 110 кВ с заземленной нейтралью // *Электрические станции*. 1983. № 12. С. 64–65.

12. Павлов В.И., Максимов В.М. Феррорезонанс на шинах в электрических сетях с заземленной нейтралью // *Электрические станции*. 1975. № 1. С. 78–80.

13. Зихерман М.Х. Три способа подавления феррорезонанса в трансформаторах напряжения // *Энергоэксперт*. 2021. № 1 (77). С. 36–39.

### References

1. Byk F.L., Ilyushin P.V., Myshkina L.S. Osobennosti i perspektivy razvitiya raspredelennoi energetiki v Rossii [Features and Prospects for the Development of Distributed Energy in Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika — Izvestia of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2021, Vol. 64, No. 6, pp. 78–87. [in Russian].

2. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Pelevin P.S. Primenenie diskriminatornykh metodov dlya otsenki parametrov rezhima energoiaionov s ob'ektami raspredelennoi generatsii [Application of Discriminator Methods for Estimating the Regime Parameters of Power Districts with Distributed Generation Facilities]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2019, No. 7, pp. 22–35. [in Russian].

3. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. Osobennosti raschetov rezhimov v energoiaionakh s raspredelennoi generatsiei [Peculiarities of Mode Calculations in Power Regions with Distributed Generation]. *Nizhniy Novgorod, NIU RANKhiGS*, 2018. 280 p. [in Russian].

4. Valverde V., Mazon A.J., Zamora I., Buiques G. Ferroresonance in Voltage Transformers:

Analysis and Simulations. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2011, Vol. 1, pp. 465–471.

5. Drapela J., Toman P., Orsagova J., Kratky M. Simulation of Ferroresonance Phenomena in Power Systems. *Proc. of the 5th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, December 16–18, 2005*. Tenerife, Spain, 2005, pp. 373–377.

6. Dugan R.C. Examples of Ferroresonance in Distribution System. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, Canada, 2003, pp. 1213–1215.

7. Irvani M., Chaudhary A. e.a. Slow Transient Task Force of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs. Modeling and Analysis Guidelines for Slowtransients — Part III: The Study of Ferroresonance. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2000, Vol. 15, No. 1, Jan, pp. 255–265.

8. Jacobson D.A. Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, July, 2003, pp. 1206–1212.

9. Tanggawelu B., Mukerjee R.N., Ariffin A.E. Ferroresonance Studies in Malaysian Utility's Distribution Network. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, July, 2003, Vol. 2, pp. 1216–1219.

10. Alekseev V.G., Zikherman M.Kh. Ferrorезонанс в setyakh 6–10 kV [Ferroresonance in 6–10 kV Networks]. *Elektricheskiye stantsii — Electric Stations*, 1979, No. 1, pp. 63–65. [in Russian].

11. Aizstrauts E.V. Ferrorезонанс в seti 110 kV s zazemlennoi neutral'yu [Ferroresonance in a 110 kV Network with a Grounded Neutral]. *Elektricheskiye stantsii — Electric Stations*, 1983, No. 12, pp. 64–65. [in Russian].

12. Pavlov V.I., Maksimov V.M. Ferrorезонанс na shinakh v elektricheskikh setyakh s zazemlennoi neutral'yu [Ferroresonance on Tires in Electrical Networks with Grounded Neutral]. *Elektricheskiye stantsii — Electric Stations*, 1975, No. 1, pp. 78–80. [in Russian].

13. Zikherman M.Kh. Tri sposoba podavleniya ferrorезонанса v transformatorakh napryazheniya [Three Ways to Suppress Ferroresonance in Voltage Transformers]. *Energoekspert — Energoekspert*, 2021, No. 1 (77), pp. 36–39. [in Russian].



**Борис Андреевич Косарев**

**Boris A. Kosarev**

*кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры «Электрическая техника»,  
Омский государственный технический университет,  
Омск, Россия*

УДК 621.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-56-64

## **ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

### **Актуальность**

Статья посвящена исследованию возможности возникновения феррорезонансных процессов в системах электроснабжения с распределенной генерацией. Феррорезонансные процессы вызывают перенапряжения в электроустановках и приводят к их выходу из строя. В системообразующих и распределительных сетях без объектов распределенной генерации явление феррорезонанса изучено достаточно глубоко, разработаны эффективные аппаратные и оперативные мероприятия для предотвращения возникновения в электроустановках феррорезонансных перенапряжений. Однако вопрос возникновения феррорезонансных процессов в системах электроснабжения с распределенной генерацией, являющихся перспективным направлением развития энергетики, представляется мало изученным.

### **Цель исследования**

Исследовать схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных процессов в системах электроснабжения с распределенной генерацией.

### **Методы исследования**

Для исследования схемно-режимных условий возникновения феррорезонансных процессов в системах электроснабжения с распределенной генерацией были использованы основные положения теории электротехнических комплексов и систем, теории нелинейных электрических цепей, принципов управления объектами электротехнических комплексов и систем промышленного назначения.

### **Результаты**

Исследованы схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных процессов в системах электроснабжения с распределенной генерацией. В качестве объекта исследования выбрана система электроснабжения КВ-радиоцентра, содержащая электростанцию с меньшей или соответствующей максимальному электропотреблению нагрузки установленной мощностью.

Особенности схемно-режимных условий возникновения феррорезонансных процессов в условиях распределенной генерации следующие. В связи с незначительной удаленностью объектов распределенной генерации и потребителей возникают дополнительные возможности для субгармонических феррорезонансных процессов. При подключении генерирующей установки к шинам низкого напряжения создаются условия для возникновения феррорезонансного процесса с участием обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов. Низкая динамическая устойчивость генерирующих установок объектов распределенной генерации на основе синхронных генераторов уменьшает вероятность возникновения и продолжительность феррорезонансных процессов при обрыве фазных проводов и коротких замыканиях на линии электропередачи. Подключаемые через сетевые инверторы генерирующие установки имеют ограничение по выходному току и могут быть отключены противоаварийной автоматикой при возникновении аварийного режима работы сети, кото-

рый, как правило, предшествует появлению феррорезонансных перенапряжений в электроустановках.

Таким образом, в энергорайонах с объектами распределенной генерации известные в системе централизованного электроснабжения схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных процессов претерпевают изменения, а также возможно формирование новых феррорезонансных колебательных контуров.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, феррорезонансный процесс, система электроснабжения, колебательный контур, генерирующая установка, устройства релейной защиты и автоматики

**Благодарности:** Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

## FERRORESONANT PROCESSES IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION

### Relevance

The article is devoted to the study of the possibility of occurrence of ferroresonant processes in power supply systems with distributed generation. Ferroresonant processes cause overvoltages in electrical installations and lead to their failure. In backbone and distribution networks without distributed generation facilities, the phenomenon of ferroresonance has been studied quite deeply, effective hardware and operational measures have been developed to prevent the occurrence of ferroresonance surges in electrical installations.

However, the issue of the occurrence of ferroresonant processes in power supply systems with distributed generation, which is a promising direction in the development of the energy sector, seems to be little studied.

### Aim of research

The main aim of the research is to investigate circuit-mode conditions for the occurrence of ferroresonant processes in power supply systems with distributed generation.

### Research methods

To study the circuit-mode conditions for the occurrence of ferroresonant processes in power supply systems with distributed generation, the main provisions of the theory of electrical complexes and systems, the theory of nonlinear electrical circuits, and the principles of controlling objects of electrical complexes and industrial systems were used.

### Results

The circuit-mode conditions for the occurrence of ferroresonant processes in power supply systems with distributed generation are studied. The power supply system of a HF radio center, containing a power plant with a lower installed power or corresponding to the maximum power consumption of the load, was chosen as the object of study.

The features of the scheme-mode conditions for the occurrence of ferroresonant processes under conditions of distributed generation are as follows. Due to the insignificant remoteness of distributed generation facilities and consumers, additional opportunities arise for subharmonic ferroresonant processes. When a generating plant is connected to low-voltage busbars, conditions are created for the occurrence of a ferroresonant process involving low-voltage windings of power transformers.

The low dynamic stability of generating installations of distributed generation facilities based on synchronous generators reduces the likelihood and duration of ferroresonant processes in the event of phase wire breaks and short circuits on the power line. Generating plants connected via grid inverters have a limited output current and can be turned off by emergency automatics in the event of an emergency operation of the grid, which, as a rule, precedes the appearance of ferroresonant overvoltages in electrical installations.

Thus, in power districts with distributed generation facilities, the circuit-mode conditions for the occurrence of ferroresonant processes, known in the centralized power supply system, undergo changes, and it is also possible to form new ferroresonant oscillatory circuits.

**Keywords:** distributed generation, ferroresonant process, power supply system, oscillatory circuit, generating plant, relay protection and automation devices

**Acknowledgements:** The work was carried out under the state order of the Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project state registration number 122011200349-3).

## Введение

Современные электроэнергетические системы динамично развиваются и условно могут быть разделены по установленной мощности на суперсистемы, мини-системы и микросистемы [1]. К суперсистемам относятся крупные электростанции и системообразующие сети, которые ориентированы на энергоемкие производства и отличаются высоким качеством электроэнергии по частоте и напряжению. Распределенная генерация (РГ) относится к мини-системам и микросистемам и является клиентоориентированной энергетикой, позволяющей использовать любые доступные энергоресурсы, в том числе возобновляемые источники энергии [2, 3], и способствующей в совокупности с суперсистемами увеличению надежности электроснабжения потребителей [4, 5]. Понятие РГ включает генерирующие установки малой и средней мощности (не более 25 МВт), которые, как правило, размещаются в узлах электропотребления [6]. Активное развитие и внедрение систем электроснабжения (СЭ) с РГ требует пересмотра известных при централизованном электроснабжении технических решений. К таким решениям относятся оперативные и аппаратные мероприятия, направленные на предотвращение возникновения феррорезонансных процессов (ФП) в электроустановках, описанные в стандартах ЕЭС и в результатах экспериментальных исследований ФП [7,

8]. ФП негативно сказываются на состоянии электроустановок, вызывая перенапряжения, перегрев и их выход из строя [9]. В условиях РГ вопрос возникновения схемно-режимных условий ФП представляется мало изученным. Цель работы заключается в исследовании схемно-режимных условий возникновения ФП в системах электроснабжения с распределенной генерацией. В качестве объекта исследования выбрана система электроснабжения КВ-радиоцентра, содержащая собственную генерирующую установку (ГУ).

## Схемно-режимные условия возникновения ФП в СЭ с РГ

Рассмотрим схемно-режимные условия возникновения ФП в СЭ с РГ на примере КВ-радиоцентра.

КВ-радиоцентр является потребителем первой категории, электроснабжение которого должно осуществляться от двух независимых источников питания. В зависимости от мощности ГУ, используемой на объекте РГ (ГУ объекта РГ), возможны два варианта схемы выдачи мощности.

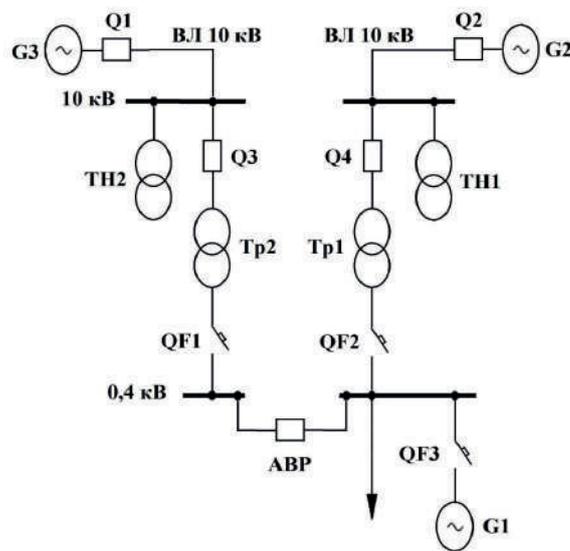
Если установленная мощность ГУ объекта РГ соответствует пиковой нагрузке КВ-радиоцентра, то ГУ объекта РГ выполняет функцию основного источника питания и подключается к шинам с уровнем напряжения прилегающей внешней электросистемы (ЭС). При этом возможен островной режим работы СЭ

КВ-радиоцентра или режим работы параллельно прилегающей внешней ЭС для выдачи излишков электроэнергии или в случае выхода ГУ объекта РГ из строя.

Если установленная мощность ГУ объекта РГ меньше пиковой нагрузки КВ-радиоцентра, то островной режим работы системы электроснабжения предприятия невозможен, а ГУ объекта РГ подключается к шинам, непосредственно питающим нагрузку предприятия, и используется в функции дополнительного источника питания для сглаживания профиля мощности.

При использовании ГУ объекта РГ в функции дополнительного источника питания (рисунок 1) существуют различные схемно-режимные условия возникновения ФП.

Несимметричная схема сети при обрыве провода со стороны высокого напряжения (ВН) переводит Тр1 в режим феррорезонансного преобразователя. Образуется феррорезонансный колебательный контур: обмотка ВН Тр1 (индуктивность), участок сети между Тр1 и G2 (емкость), внешняя ЭС G2 (источник ЭДС). В зависимости от вида ГУ объекта РГ может быть различная реакция ее противоаварийной автоматики на возникновение ФП. При синхронной генерации ГУ объекта РГ будет отключена защитой от несимметричных нагрузок. Если в качестве ГУ используется возобновляемый источник энергии (ВИЭ), подключенный через сетевой инвертор, то отключение установки может произойти при превышении уставки выходного тока инвер-



G1 — ГУ объекта РГ; G2 и G3 — электростанции внешней ЭС; ВЛ — воздушная линия электропередачи; ТН1 и ТН2 — трансформаторы напряжения; Тр1 и Тр2 — силовые трансформаторы; АВР — установка автоматического ввода резерва; Q1–Q4 — высоковольтные выключатели; QF1–QF3 — быстродействующие автоматические выключатели

G1 — generating plant of the distributed generation facility; G2, G3 — power plants of the external electrical system; ВЛ — overhead power line; ТН1, ТН2 — voltage transformers; Тр1, Тр2 — power transformers; АВР — installation of automatic input of the reserve; Q1–Q4 — high-voltage circuit breakers; QF1–QF3 — high speed circuit breakers

**Рисунок 1.** Схема СЭ КВ-радиоцентра с ГУ объекта РГ в функции дополнительного источника питания

**Figure 1.** Scheme of the power supply system of a HF radio center with a generating plant of a distributed generation facility as an additional power source

тора. Мощность силового трансформатора  $Tr1$  в режиме феррорезонансного преобразователя составляет несколько десятков процентов от его номинальной мощности. Поэтому превышение нагрузкой радицентра некоторой величины может привести к отключению  $G1$ , понижению напряжения на шине  $0,4$  кВ ниже критического значения, отключению выключателей  $Q4$  и  $QF2$  и восстановлению питания нагрузки по резервной линии при помощи автоматического ввода резерва (АВР). Уставки релейной защиты и автоматики (РЗА) могут быть заданы таким образом, чтобы при понижении напряжения на шине  $0,4$  кВ сначала отключалась аварийная линия с  $Tr1$  и питание по резервной линии восстанавливалось раньше отключения ГУ  $G1$ .

Прерывание питания нагрузки радицентра от внешней ЭС при отключении выключателя  $Q2$  при коротком замыкании (КЗ) на воздушной линии (ВЛ)  $10$  кВ приводит к возникновению ФП в контуре: индуктивность обмотки  $TН1$ , источник ЭДС  $G2$  и эквивалентная емкость прилегающей сети, включая (при наличии) шунтирующие конденсаторы  $Q2$ . Следует отметить, что при антирезонансной конструкции  $TН1$  ФП в указанном контуре невозможен. Питание нагрузки предприятия связи восстанавливается по резервной линии посредством АВР. Возмущение режима работы сети приводит к отключению ГУ  $G1$  или нормальному переходному процессу без отключения в зависимости от уставок РЗА сети и противоаварийной автоматики установки.

Разновременность включения фаз выключателя  $Q2$  приводит к кратковременному возникновению ФП «ложная земля» в контуре: индуктивность обмотки  $TН1$ , источник ЭДС  $G2$  и эквивалентная емкость ВЛ  $10$  кВ. Однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) через перемежающуюся дугу на ВЛ  $10$  кВ приводит к насыщению сердечника измерительного

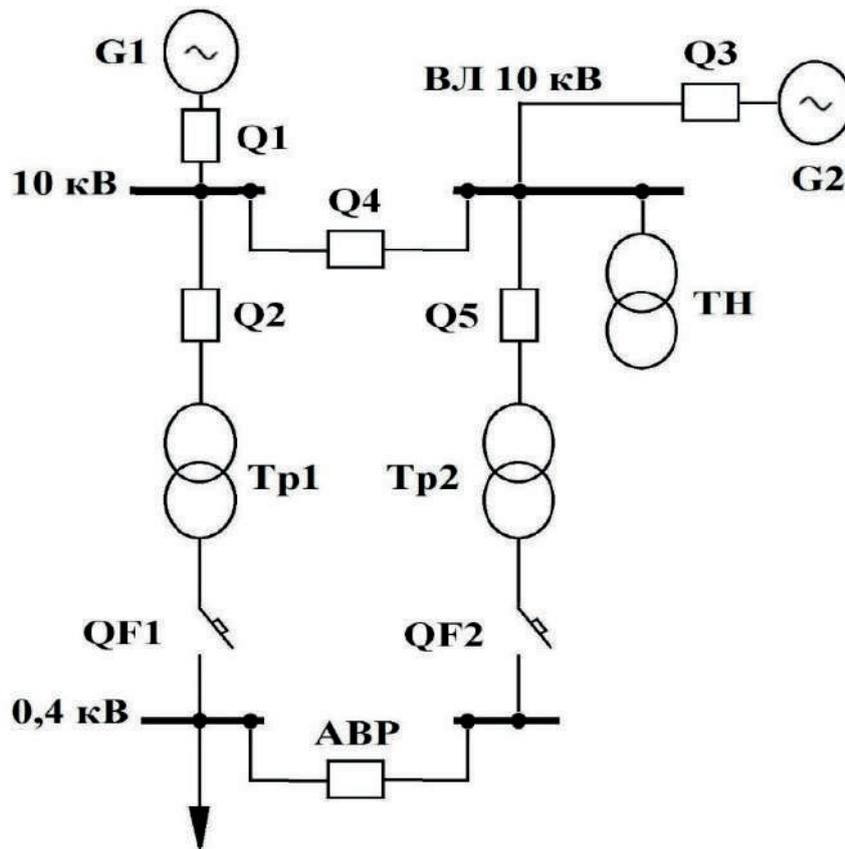
трансформатора  $TН1$  и возникновению феррорезонансного колебательного контура аналогичного ФП «ложная земля». Следует отметить, что при антирезонансной конструкции  $TН1$  ФП «ложная земля» и ФП при ОЗЗ через перемежающуюся дугу невозможны. Ответ на степень влияния ОЗЗ на ВЛ  $10$  кВ на режим работы ГУ  $G1$  может быть получен через расчет переходных процессов или величины тока  $K3$  (ударный электромагнитный момент) для конкретных схемно-режимных условий и параметров ГУ.

Одностороннее отключение  $Tr1$  из-за КЗ со стороны ВН при условии отказа отключения выключателя  $QF2$  и отказа устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ) приводит к образованию ФП с контуром: обмотка НН  $Tr1$  (индуктивность), участок сети между  $Tr1$  и  $G1$  (емкость), источник ЭДС  $G1$ . ФП срывается при отключении  $G1$ . ГУ  $G1$  отключается при превышении величины нагрузки КВ-радицентра некоторого предельного значения, в частности при включении мощных радиопередатчиков.

Одностороннее отключение  $Tr1$  из-за КЗ со стороны низкого напряжения (НН) при условии отказа отключения выключателя  $Q4$  и отказа УРОВ приводит к образованию ФП с контуром: обмотка НН  $Tr1$  (индуктивность), участок сети между  $Tr1$  и  $G2$  (емкость), источник ЭДС  $G2$ .

При использовании ГУ объекта РГ в функции основного источника питания нагрузки КВ-радицентра (рисунок 2) имеют место следующие схемно-режимные условия ФП.

Пусть существует несимметричная схема сети при обрыве одной из фаз со стороны ГУ объекта РГ  $G1$ . Если питание нагрузки КВ-радицентра обеспечивается  $G1$  и выключатель  $Q4$  отключен (островной режим работы), то ФП невозможен из-за малой величины емкости сети со стороны обмотки высокого напря-



G1 — ГУ объекта РГ; G2 — электростанция внешней ЭС; ВЛ — воздушная линия электропередачи; ТН — трансформатор напряжения; Тр1 и Тр2 — силовые трансформаторы; АВР — установка автоматического ввода резерва; Q1–Q5 — высоковольтные выключатели; QF1, QF2 — быстродействующие автоматические выключатели

G1 — generating plant of the distributed generation facility; G2 — power plant of the external electrical system; ВЛ — overhead power line; ТН — voltage transformer; Тр1, Тр2 — power transformers; АВР — installation of automatic input of the reserve; Q1–Q5 — high-voltage circuit breakers; QF1, QF2 — high speed circuit breakers

**Рисунок 2.** Схема СЭ КВ-радиоцентра с ГУ объекта РГ в функции основного источника питания

**Figure 2.** Scheme of the power supply system of a HF radio center with a generating plant of a distributed generation facility as the main power source

жения (ВН) Тр1. Следует отметить возможность возникновения субгармонического ФП, так как РГ подразумевает короткие линии электропередачи. Также следует учитывать, что эквивалентная емкость кабельной линии значительно превышает эквивалентную емкость воздушной линии (приблизительно в 35 раз). Если ГУ объекта РГ работает параллельно внешней электросистеме (выключатель Q4 включен), то ФП возможен, так как величина емкости прилегающей сети ЭС будет соответствовать величине индуктивности Тр1 в режиме насыщения.

Разновременность включения фаз выключателя Q4 при выходе системы электроснабжения КВ-радиоцентра из островного режима работы для генерации во внешнюю ЭС может быть причиной самопроизвольного смещения нейтрали

(«ложная земля»), возникновения ФП в контуре: индуктивность ТН, емкость прилегающей сети ЭС, ГУ объекта РГ. ФП «ложная земля» неустойчивый и не приводит к порче электросетевого оборудования.

Субгармонический ФП может возникнуть за счет соответствия субгармоники резонансной частоте колебательного контура: емкость короткой линии электропередачи между ГУ объекта РГ G1 и ТН, индуктивность обмотки ТН.

Следует отметить, что при антирезонансной конструкции ТН ФП «ложная земля» и субгармонический ФП невозможны [10].

ФП с участием ТН из-за ОЗЗ через перемежающуюся дугу перед Tr1 невозможен в островном режиме в виду низкой динамической устойчивости ГУ объекта РГ G1. При малой протяженности сети такое короткое замыкание будет близким к G1 и вызовет сильное возмущение режима работы. С большой долей вероятности ГУ объекта РГ будет отключена противоаварийной автоматикой, так как в качестве ГУ систем электроснабжения с РГ используются ГПУ, многовальные ТГУ или ВИЭ с имеющим уставку по выходному току сетевым инвертором. При параллельной работе ГУ объекта РГ внешней ЭС возмущение режима работы установки при ОЗЗ может оказаться незначительным из-за перетока мощности из ЭС. В таких схемно-режимных условиях может возникнуть ФП в контуре: источники ЭДС ГУ объекта РГ и ЭС, индуктивность ТН, емкость прилегающей распределительной сети ЭС. Следует отметить, что при антирезонансной конструкции ТН описанный ФП невозможен.

### **Выводы**

Исследованы схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных

процессов в системах электроснабжения с распределенной генерацией. В качестве объекта исследования выбрана система электроснабжения КВ-радиоцентра, содержащая электростанцию с меньшей или соответствующей максимальному электропотреблению нагрузки установленной мощностью.

Особенности схемно-режимных условий возникновения феррорезонансных процессов в условиях распределенной генерации следующие. В связи с незначительной удаленностью объектов распределенной генерации и потребителей возникают дополнительные возможности для субгармонических феррорезонансных процессов. При подключении генерирующей установки к шинам низкого напряжения создаются условия для возникновения феррорезонансного процесса с участием обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов. Низкая динамическая устойчивость генерирующих установок объектов распределенной генерации на основе синхронных генераторов уменьшает вероятность возникновения и продолжительность феррорезонансных процессов при обрыве фазных проводов и коротких замыканиях на линии электропередачи. Подключаемые через сетевые инверторы генерирующие установки имеют ограничение по выходному току и могут быть отключены противоаварийной автоматикой при возникновении аварийного режима работы сети, который, как правило, предшествует появлению феррорезонансных перенапряжений в электроустановках.

Таким образом, в энергорайонах с объектами распределенной генерации известные в системе централизованного электроснабжения схемно-режимные условия возникновения феррорезонансных процессов претерпевают изменения, а также возможно формирование новых феррорезонансных колебательных контуров.

## Список источников

1. Воропай Н.И., Подковальников С.В. Наука и технологии в электроэнергетических системах XXI века: тенденции и перспективы // Наука и технологии XXI века: тренды и перспективы: сб. ст. по итогам IV Профессорского форума: В 2 т. Москва, 27–30 сентября 2021 года. М.: Общероссийская общественная организация «Российское профессорское собрание», 2021. С. 95–100.

2. Статкевич А.В., Тимофеев С.С., Шишлаков В.Ф. Современные ветроэнергетические установки: обзор и тенденции развития // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: матер. XXV Междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 30 мая — 03 июня 2022 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. С. 257–261.

3. Гильманов Э.А., Яшин А.Н., Хакимьянов М.И. Разработка моделей элементов ветро-солнечной электростанции в среде MATLAB Simulink // Завалишинские чтения — 2022: сб. докл. XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2022 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. С. 120–125.

4. Sun H., Wang Y., Nikovski D., Zhang J. Flex-Grid: A dynamic and Adaptive Configurable Power Distribution System // IEEE Power Tech (Eindhoven, Netherlands, 29 June 20–2 July 2015). 2015. P. 1–6.

5. Islam Sk.R., Sutanto D., Muttaqi K.M. Coordinated Decentralized Emergency Voltage and Reactive Power Control to Prevent Long-Term Voltage Instability in a Power System // IEEE Transactions on Power Systems. 2015. Vol. 30. Issue 5. P. 2591–2603.

6. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Пелевин П.С. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации // Электричество. 2019. № 7. С. 22–35.

7. Arroyo A., Martinez R., Manana M., Piga-zo A., Minguez R. Detection of Ferroresonance Occurrence in Inductive Voltage Transformers through Vibration Analysis // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 106. P. 294–300.

8. Ahmed M., Ali A., Mohammed S., Kar-rar A., Hay R.W., Johnson R.C. Investigation of Ferroresonance Incidents in the EPB Distribution Network // IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. P. 1–5.

9. Еремич Я.Э., Пашичева С.А., Халилов Ф.Х. Характеристики сетей 6–35 кВ, необходимые для решения проблем ЭМС электроэнергетики, техносферы и биосферы // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 5–13(39). С. 84–96.

10. Зихерман М.Х. Три способа подавления феррорезонанса в трансформаторах напряжения // Энергоэксперт. 2021. № 1 (77). С. 36–39.

## References

1. Voropai N.I., Podkoval'nikov S.V. Nauka i tekhnologii v elektroenergeticheskikh sistemakh KhKhI veka: tendentsii i perspektivy [Science and Technology in Electric Power Systems of the 21st Century: Trends and Prospects]. *Sbornik statei po itogam IV Professorskogo foruma «Nauka i tekhnologii XXI veka: trendy i perspektivy»: V 2 t. Moskva, 27–30 sentyabrya 2021 goda.* [Collection of Articles on the Results of the IV Professors' Forum «Science and Technologies of the 21st Century: Trends and Prospects». In 2 vol. Moscow, September 27–30, 2021]. Moscow, Obshcherossiiskaya obshchestvennaya organizatsiya «Rossiiskoe professorskoe sobranie», 2021, pp. 95–100. [in Russian].

2. Statkevich A.V., Timofeev S.S., Shishla-kov V.F. Sovremennye vetroenergeticheskie ustanovki: obzor i tendentsii razvitiya [Modern Wind Power Plants: Review and Development Trends]. *Materialy XXV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Volnovaya elektronika i infokom-muni-katsionnye sistemy», Sankt-Peterburg, 30 maya — 03 iyunya 2022 goda.* [Proceedings of the XXV International Scientific Conference «Wave Electronics and Infocommunication Systems», St. Petersburg, May 30 — June 03, 2022. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation]. Sankt-Peterburg, Sankt-Peter-burgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmi-cheskogo priborostroeniya, 2022, pp. 257–261. [in Russian].

3. Gil'manov E.A., Yashin A.N., Khakim'ya-nov M.I. Razrabotka modelei elementov vetro-solnechnoi elektrostantsii v srede MATLAB Simulink [Development of Models of Elements of a Wind Solar Power Plant in the MATLAB

Simulink Envi-ronment]. *Sbornik dokladov XVII Mezhdunarodnoi konferentsii po elektromekhanike i robototekhnike «Zavalishinskie chteniya — 2022»*, Sankt-Peterburg, 12–14 aprelya 2022 goda. [Collection of Reports of the XVII International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin’s Readings — 2022», Saint-Petersburg, April 12–14, 2022]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2022, pp. 120–125. [in Russian].

4. Sun H., Wang Y., Nikovski D., Zhang J. Flex-Grid: A Dynamic and Adaptive Configurable Power Distribution System. *IEEE Power Tech (Eindhoven, Netherlands, 29 June 20–2 July 2015)*, 2015, pp. 1–6.

5. Islam Sk.R., Sutanto D., Muttaqi K.M. Coordinated Decentralized Emergency Voltage and Reactive Power Control to Prevent Long-Term Voltage Instability in a Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, Vol. 30, Issue 5, pp. 2591–2603.

6. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Pelevin P.S. Primenenie diskriminatornykh metodov dlya otsenki parametrov rezhima energoraionov s ob’ektami raspredelennoi generatsii [Application of Discriminator Methods for Estimating the Regime Parameters of Power Districts with Distributed Generation Facilities]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2019, No. 7, pp. 22–35. [in Russian].

7. Arroyo A., Martinez R., Manana M., Pigozo A., Minguez R. Detection of Ferroresonance Occurrence in Inductive Voltage Transformers through Vibration Analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, Vol. 106, pp. 294–300.

8. Ahmed M., Ali A., Mohammed S., Karar A., Hay R.W., Johnson R.C. Investigation of Ferroresonance Incidents in the EPB Distribution Network. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018, pp. 1–5.

9. Eremich Ya.E., Pashicheva S.A., Khalilov F.Kh. Kharakteristiki setei 6–35 kV, neobkholdimye dlya resheniya problem EMS elektroenergetiki, tekhnosfery i biosfery [Characteristics of 6–35 kV Networks Necessary for Solving the Problems of EMC in the Electric Power Industry, Technosphere and Biosphere]. *Trudy Kol’skogo nauchnogo tsentra RAN — Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, No. 5–13(39), pp. 84–96. [in Russian].

10. Zikherman M.Kh. Tri sposoba podavleniya ferrezonansa v transformatorakh napryazheniya [Three Ways to Suppress Ferroresonance in Voltage Transformers]. *Energoekspert — Energoekspert*, 2021, No. 1 (77), pp. 36–39. [in Russian].



**Александр Сергеевич Маклаков**

**Alexander S. Maklakov**

кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник, Управление научной и инновационной  
деятельности, Южно-Уральский государственный университет,  
Челябинск, Россия



**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



**Татьяна Александровна Лисовская**

**Tatiana A. Lisovskaya**

старший преподаватель кафедры «Электротехника»,  
Московский политехнический университет,  
Москва, Россия



**Сергей Александрович Линьков**

**Sergey A. Linkov**

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

УДК 621.372.632

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-65-74

## ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ ПОСРЕДСТВОМ ВЫСОКОМОЩНОГО РЕКУПЕРАТИВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Актуальность

В настоящее время нет полного понимания возможностей и всех последствий при компенсации реактивной мощности посредством высокомоощного регулируемого электропривода переменного тока с активным выпрямителем напряжения (РЭПТ с АВН) с учётом возможных ограничений и сопутствующих проблем, но данные режимы используются и показывают свою эффективность.

### Цель исследования

Статья посвящена вопросам компенсации реактивной мощности и улучшению качества напряжения в сети посредством высокомоощного РЭПТ с АВН.

### Методы исследования

В работе применены методы теоретических и экспериментальных исследований.

### Результаты

Было отмечено, что гладкая составляющая первой гармоники выходного напряжения АВН ограничена напряжением в DC звене и предельно-допустимым током АВН, что влияет на диапазон передаваемой реактивной мощности в системе «РЭПТ с

АВН – питающая сеть». Таким образом, существуют ограничения для генерации реактивной мощности в системе «РЭПТ с АВН – питающая сеть», которые должны быть учтены при синтезе системы управления АВН. Повышение качества напряжения в сети с помощью мощных РЭПТ с АВН возможно при правильном выборе схемы подключения к питающей сети, частоте переключений полупроводниковых модулей, анализу резонансных явлений, настройке системы управления АВН и тепловом контроле силовых компонентов. Представленный в работе пример экспериментальных кривых потребляемого тока из сети при двух различных алгоритмах широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник для АВН демонстрирует улучшение показателя суммарного коэффициента гармонических искажений тока сети в два раза.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель напряжения, предварительно запрограммированная ШИМ, удаление выделенных гармоник, электромагнитная совместимость, качество напряжения

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых — кандидатов наук МК-3803.2022.4.

## REACTIVE POWER COMPENSATION USING A HIGH-POWER REGENERATIVE AC DRIVE

### Relevance

At present, there is no complete understanding of the possibilities of reactive power compensation by means of high-power regenerative AC drives (RACD) with active front-end rectifiers (AFE), given the limitations and associated problems with electromagnetic compatibility.

### Aim of research

The article is devoted to the issues of reactive power compensation and improvement of the voltage quality in the grid by high-power RACD with AFE.

### Research methods

Methods of theoretical and experimental researches are applied in the work.

### Results

It was noted that the smooth component of the first harmonic of the AFE output voltage is limited by the voltage in the DC link and the maximum allowable AFE current, and this affects the range of transmitted reactive power in the system «RACD with AFE – grid». Thus, there are restrictions for the generation of reactive power in the system «RACD with AFE – grid», which requires their special calculation in the synthesis of the control system. Power quality improving by powerful RACD with AFE is possible only with the correct choice of the grid connection, the switching frequency of semiconductor modules, resonance analysis, AFE control system parameters and thermal control of the power modules. The experimental curves of current consumption from the grid presented in the paper with two different PWM algorithms for the AFE demonstrates a decreasing of current total harmonic distortion.

**Keywords:** active front-end rectifier, pre-programmed PWM, selective harmonic elimination, electromagnetic compatibility, power quality

**Acknowledgments:** The work was supported by the Grant of the President of the Russian Federation for young scientists — candidates of sciences МК-3803.2022.4.

## Введение

Увеличение мирового спроса на энергоресурсы повлекло за собой появление новых технических систем на основе устройств силовой преобразовательной техники, способных управлять большими потоками активной и реактивной мощности с минимальным негативным влиянием на окружающую среду и высоким коэффициентом полезного действия. Среди наиболее крупных потребителей являются рекуперативные электроприводы переменного тока (РЭПТ) среднего напряжения на базе трехуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями напряжения (АВН) и автономными инверторами напряжения (АИН). Масштабное внедрение такие системы получили в нефтяной, газовой, металлургической, горной, морской, химической, цементной, бумажной, транспортной и других областях промышленности [1–5]. В таблице 1 приведен перечень преобразователей частоты для РЭПТ, которые серийно выпускаются для рассматриваемых приложений.

Современные РЭПТ на основе данных преобразователей имеют ряд преимуществ перед электроприводами предыдущего поколения, имеющих тиристорные

выпрямительные модули, а именно: 1) возможность рекуперации энергии в сеть в тормозных режимах работы электропривода с минимальным искажением; 2) возможность регулирования коэффициента мощности; 3) улучшенный гармонический состав потребляемого из сети тока за счет применения специализированных алгоритмов широтно-импульсной модуляции АВН [6–8]. На рисунке 1 показана типовая схема подключения РЭПТ с АВН, где основными компонентами подключения к питающей сети являются: трансформатор, реактор, полупроводниковый модулятор, DC звено, устройство фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и система управления.

## Перспективы компенсации реактивной мощности

В работах Gonzalo Alonso Orcajo и др. [9–11] показана возможность компенсации реактивной мощности в питающей сети за счёт модернизации нескольких главных электроприводов прокатных клетей стана горячей прокатки. Новые электроприводы выполнены на основе трёхуровневых преобразователей среднего напряжения с АВН, позволяющие обеспечить потребление электродвигателями

**Таблица 1.** Преобразователи частоты для РЭПТ с АВН

**Table 1.** High-power frequency converters for AFE drives

Производитель	Тип	Мощность, МВт	Напряжение, кВ	Модули
Alstom (Франция)	VDM 5000	1,4–7,2	2,3; 3,3; 4,2	IGBT
	VDM 6000	0,3–8	2,3; 3,3; 4,2	IGBT
ABB (Швейцария)	ACS 6000	3–36	3,1; 3,3	IGCT
	PCS 6000	4–9	3,3; 4,16	IGCT
Siemens (Германия)	SINAMICS SM120 CM	5–7,2	4,16	LV-IGBT / HV-IGBT
	SINAMICS SM150	3,4–31,5	3,3; 4,16	HV-IGBT / IGCT
General Electric (США)	MV6 Series	0,16–3,15	4,16; 6,6	IGBT
	MV 7000	4,3–101	3,3; 5,2; 6,6; 8,2; 10	IGBT
Delta Group (Тайвань)	MVD 3000	0,315–5,3	3,3–11	HV-IGBT

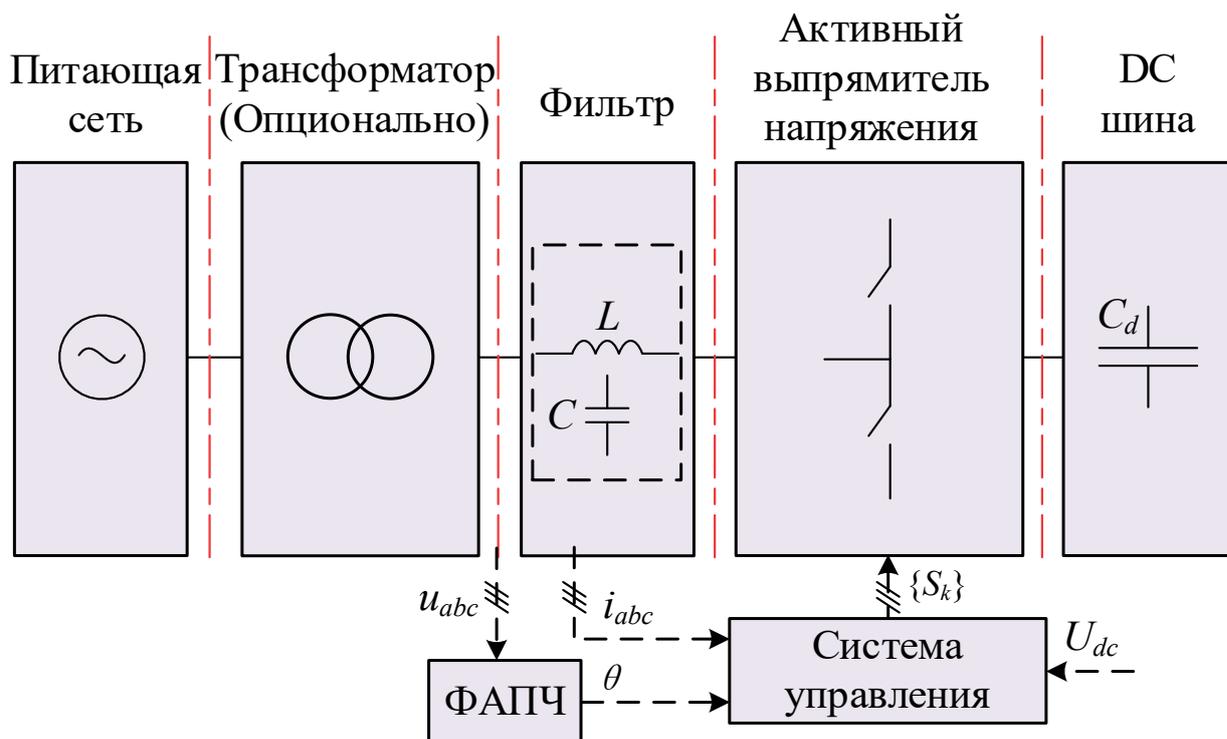


Рисунок 1. Система силовой электроники для РЭПТ с АВН

Figure 1. Power electronic system based on AFE drives

активной мощности для поддержания требуемого процесса прокатки и компенсировать часть реактивной мощности, потребляемой соседними потребителями. С точки зрения практической значимости представленные в статьях решения понятны и, несомненно, могут быть рекомендованы для любых других подобных систем. Однако в работах не рассмотрены подробно вопросы определения возможных ограничений по компенсации реактивной мощности в условиях максимального тока и напряжения в шине постоянного тока преобразователя частоты. Эти вопросы требуют более глубокого теоретического анализа, чтобы распространить предложенные решения на более широкий класс объектов.

В статье [12] авторами Р. Pandit и др. была рассмотрена энергосистема экскаватора, где коэффициент мощности в точке балансовой принадлежности выбирался таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное снижение флуктуации напряжения на высоковольтном вводе

экскаватора. Для достижения желаемого коэффициента мощности система высокомощного РЭПТ с помощью АВН компенсировала потребление реактивной мощности от нагрузок собственных нужд экскаватора. Следует отметить, что этого удалось достичь при уровне напряжения в звене постоянного тока, в два раза превышающем напряжение на вторичной обмотке трансформатора. Такое решение вызывает вопросы по условиям работы двигателя переменного тока, так как высокое напряжение в DC звене неблагоприятно скажется на электромагнитных процессах со стороны АИН (низкий коэффициент модуляции, высшие гармоники, синфазные токи/напряжения и т.п.).

В работах С.С. Брованова и др. [13] подробно проанализированы электромагнитные процессы, происходящие в силовой цепи трёхуровневого преобразователя NPC топологии в автономных системах генерирования электрической энергии. Было доказано, что при работе в режимах генерирования или потребления

реактивной мощности ухудшается неравномерная нагрузка на полупроводниковые модули трёхуровневого преобразователя, увеличивается разбалансировка напряжений в звене постоянного тока и снижается качество преобразованной электроэнергии. Однако данные проблемы могут не оказывать существенное влияние на эффективность работы преобразователя при достаточном охлаждении и использовании быстродействующих алгоритмов выравнивания напряжений в звене постоянного тока трёхуровневого NPC преобразователя, а также правильно подобранных параметров синус-фильтров.

Другим интересным примером проблемы с компенсацией реактивной мощности посредством РЭПТ является перегрев АВН. Опыт эксплуатации данных технических систем на металлургическом предприятии показал, что настройка АВН для компенсации неактивной мощности, потребляемой мощными пассивными фильтрами в точке общего подключения, вызывает их перегрев при длительной работе. В этом случае специалистами предприятия было принято решение не использовать режимы компенсации реактивной мощности АВН из-за отсутствия дополнительной возможности снизить их температуру.

Таким образом, в настоящее время нет полного понимания возможностей и всех последствий при компенсации реактивной мощности посредством высокоомного РЭПТ с АВН с учётом возможных ограничений и сопутствующих проблем, но данные режимы используются и показывают свою эффективность.

### **Особенности работы АВН при компенсации реактивной мощности**

Возможности компенсации реактивной мощности в системе «РЭПТ с АВН — питающая сеть» удобно рассмотреть с

помощью однофазной схемы замещения, показанной на рисунке 2, *a*. Система представлена в виде внутренней электродвижущей силы (ЭДС) АВН  $E_{ABH}$ , подключенной через приведенное индуктивное сопротивление  $X_L$  в точке подключения к ЭДС вторичной обмотки трансформатора или сети  $E_c$ . Разность  $E_{ABH}$  и  $E_c$  приходится на  $X_L$ , падение напряжения на котором  $U_L$ . Далее рассмотрим работу АВН с помощью векторных диаграмм на рисунке 2, *b–d*, на которых отмечены ограничения по максимальному току  $I_{cmax}$  и внутренней ЭДС АВН  $E_{ABHmax}$ . Учёт данных ограничений позволил найти допустимую область работы АВН, которая на рисунке 2 заштрихована черными линиями.

Рисунок 2, *b* демонстрирует положение векторов при работе АВН в режиме генерации реактивной мощности (подобно статическому компенсатору реактивной мощности). Такой режим возможен при работе РЭПТ на холостом ходу. Следует отметить, что в этом режиме величина максимального реактивного тока сильно ограничена, так как пределы повышения  $E_{ABH}$  также ограничены  $E_{ABHmax}$ . Добиться увеличения генерируемой реактивной мощности можно с помощью дополнительного заряда конденсаторов в звене постоянного тока.

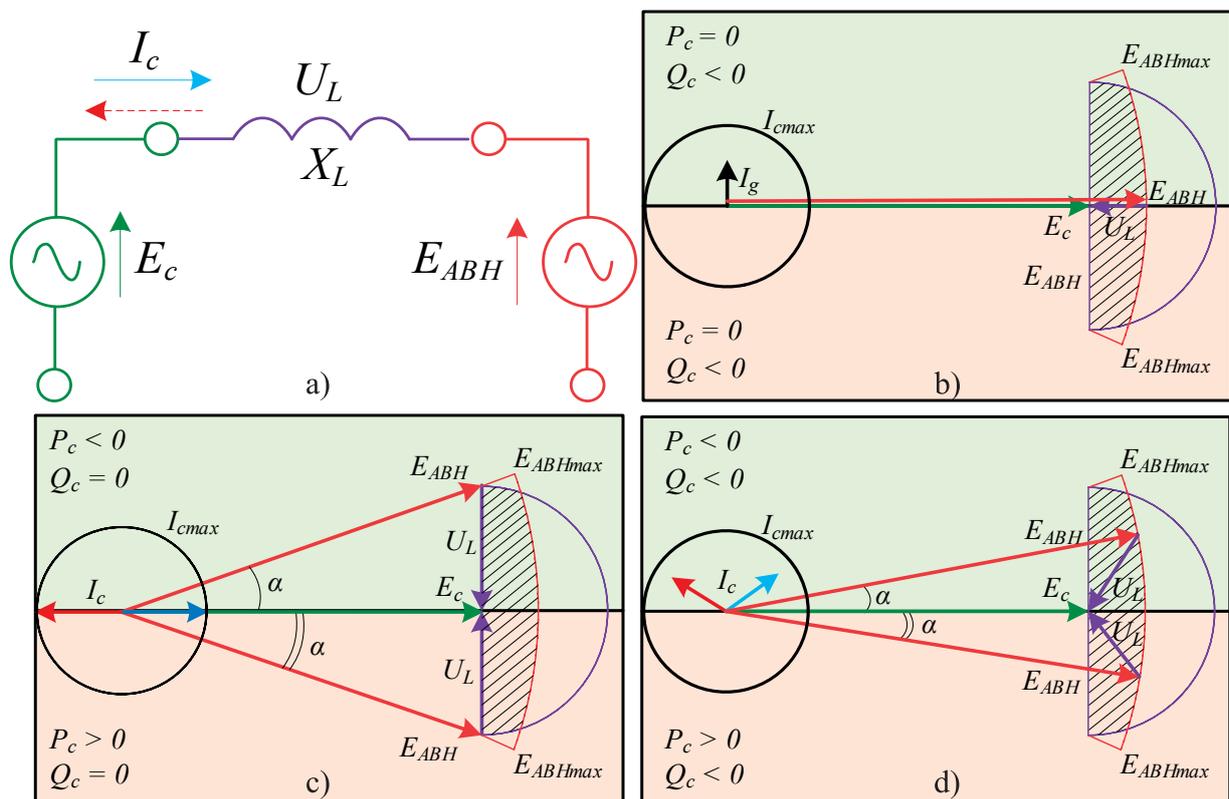
В нижней зоне рисунка 2, *c* АВН работает в режиме выпрямления. Потребляемый из сети ток  $I_c$  находится в фазе напряжения сети  $E_c$ , что обеспечивает единичный коэффициент мощности на входе преобразователя. Для данного режима необходимо регулировать амплитуду и фазу напряжения преобразователя  $E_{ABH}$  относительно  $E_c$  таким образом, чтобы вектор падения напряжения на приведенной индуктивности  $U_L$  был перпендикулярен  $E_c$ . На верхней части рисунка 2, *c* АВН работает в режиме инвертирования. Вектор  $I_c$  находится в противофазе вектору  $E_c$ , что также обеспечивает единич-

ный коэффициент мощности на входе преобразователя. Для этого режима фаза напряжения  $E_{ABH}$  должна опережать напряжение  $E_c$  на угол  $\alpha$ . В рассмотренных режимах работы АВН может работать с максимальным током  $I_{cmax}$ . Их можно использовать для определения возможной области генерации реактивной мощности.

В нижней части рисунка 2,  $d$  АВН работает в выпрямительном режиме, а в верхней зоне — в инверторном режиме с одновременной генерацией реактивной мощности. Для них вектор падения напряжения  $U_L$  не перпендикулярен  $E_c$ , вследствие этого ток  $I_c$  либо опережает, либо отстает от  $E_c$ . Анализ диаграммы позволяет сделать вывод, что увеличения

генерируемой реактивной мощности можно также добиться с помощью дополнительного заряда конденсаторов в звене постоянного тока, но следует учитывать и величину потребляемой активной мощности, чтобы не превысить максимальный допустимый ток АВН.

Анализ векторных диаграмм работы АВН на рисунке 2 показывает, что компенсация реактивной мощности возможна как в двигательном, так и инверторном режимах работы РЭПТ. Учитывая возможные ограничения в рассматриваемой системе и эквивалентное активное сопротивление  $R$  в точке общего подключения, можно записать уравнения для определения активной, реактивной и полной мощностей:



**Рисунок 2.** Особенности работы АВН при компенсации реактивной мощности: однофазная схема замещения АВН (а); режим генерации реактивной мощности без потребления активной мощности (б); режим генерации реактивной мощности и потребление активной мощности (с); режим генерации реактивной мощности и генерации активной мощности (д)

**Figure 2.** The specifics of the AFE operation during reactive power compensation: single-phase equivalent circuit of AFE (a); reactive power generation mode without active power consumption (b); reactive power generation mode with active power consumption (c); reactive power generation mode with active power generation (d)

$$P_c = \frac{E_c \cdot E_{ABH} \cdot (R \cdot \cos(\alpha) + X_L \cdot \sin(\alpha)) - E_c^2 \cdot R}{R^2 + X_L^2}, \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{E_c \cdot E_{ABH} \cdot (X_L \cdot \cos(\alpha) + R \cdot \sin(\alpha)) - E_c^2 \cdot X_L}{R^2 + X_L^2}, \quad (2)$$

$$S_c = \sqrt{\frac{E_c^2 \cdot (E_{ABH}^2 - 2 \cdot E_c E_{ABH} \cdot \cos(\alpha) + E_c^2)}{R^2 + X_L^2}}, \quad (3)$$

где  $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ ,  $Q_g = f(E_{ABH}, \alpha)$ ,  $S_g = f(E_{ABH}, \alpha)$  — зависимости активной, реактивной и полной мощностей в системе «РЭПТ — питающая сеть»;  $\alpha$  — угол сдвига между  $E_c$  и  $E_{ABH}$ .

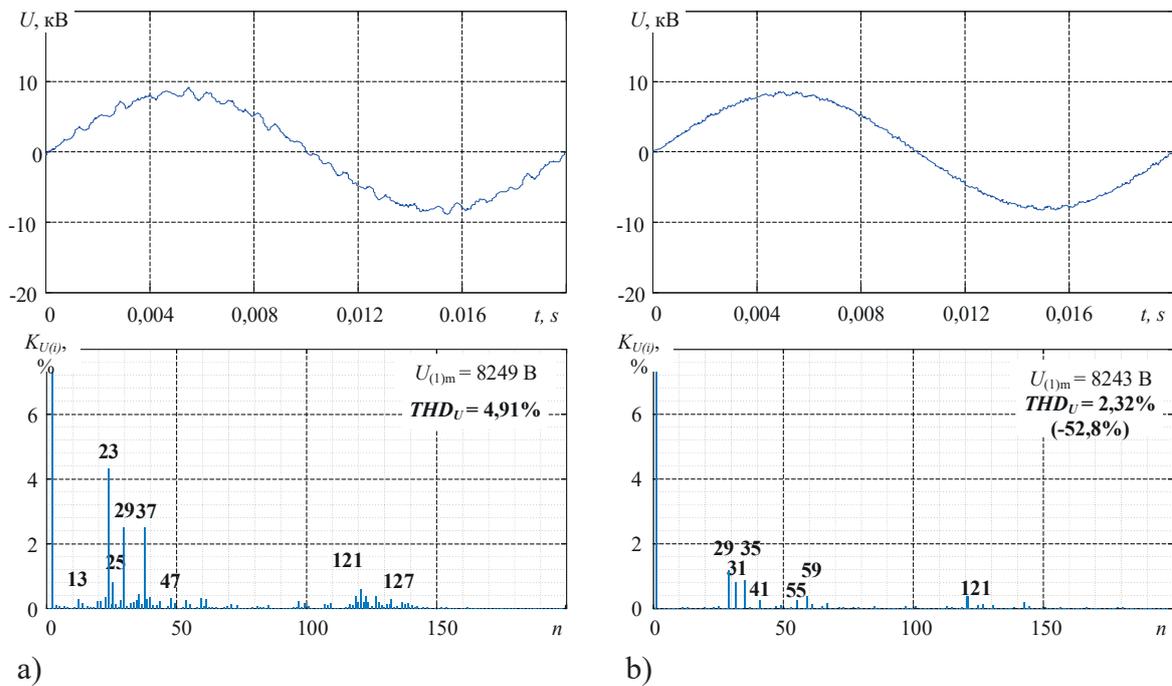
Следует отметить, что выходное напряжение  $E_{ABH}$  будет зависеть от напряжения в шине DC и алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Кроме того, угол  $\alpha$  ограничен максимальным потребляемым током. Следовательно, можно сделать вывод, что при повышении уровня напряжения в DC диапазон передаваемой реактивной мощности в системе «РЭПТ — питающая сеть» может быть увеличен при условии постоянства требуемой активной мощности в рассматриваемой системе. Однако на практике в большинстве случаев у АВН в составе РЭПТ максимальное значение гладкой составляющей первой гармоники выходного напряжения  $E_{ABH}$  превышает напряжение сети  $E_c$  только на 15–20 % (дальнейшее увеличение может привести к перегрузке по полному току). Таким образом, данная особенность накладывает существенные ограничения на величину реактивной мощности и требует дальнейшего учёта при синтезе системы управления.

### Необходимость повышения качества напряжения мощных РЭПТ с АВН

Результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности работы мощных РЭПТ с АВН в условиях действующего производства при наличии проблем с электромагнитной совместимостью с питающей сетью в научной литературе отражены крайне слабо. Производители силовых полупро-

водникового преобразователей, на базе которых выполняются АВН и АИН в составе РЭПТ, гарантируют обеспечение электромагнитной совместимости своих устройств, но опираясь только на показатели коэффициентов отдельных гармонических составляющих и суммарного индекса гармонических искажений не выше 50-й гармоники. В настоящее время международные стандарты электромагнитной совместимости не регламентируют гармонические искажения в диапазоне между 50-й и 150-й гармониками. В подтверждение сказанному, опубликованные исследования в ведущем мировом научно-рецензируемом журнале IEEE Industry Applications Magazine в 2020 г. авторами А. Hoevenaars, М. Farbis и М. McGraw [14] призывают к необходимости разработки рекомендаций для проектирования и эксплуатации систем электроснабжения с учётом проблем электромагнитной совместимости с высокомоощными РЭПТ с АВН.

Алгоритмы ШИМ с удалением выделенных гармоник в тандеме с применяемыми классическими фильтрокомпенсирующими устройствами не всегда обеспечивают достижение необходимого технического эффекта по поддержанию заданного качества напряжения в сети из-за наличия сложных резонансных явлений в частотных характеристиках [15–17]. На рисунке 3 показаны результаты экспериментальных исследований на реальном производственном объекте РЭПТ с АВН, где видно, что качество питающего напряжения в точке общего подключения потребителей отличается в два раза по показателю коэффициента суммарных гармонических искажений напряжения ( $THD_U$ ). Было выявлено, что заданы неоптимальные настройки применяемого алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник для АВН. Были предложены новые настройки алгоритма ШИМ с учётом удаления высокочастот-



**Рисунок 3.** Экспериментальные исследования на реальном производственном объекте РЭПТ с АВН при различных алгоритмах ШИМ: алгоритм ШИМ с удалением 5, 7, 11, 13, 17 и 19 (а); алгоритм ШИМ с удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 и 25 (б)

**Figure 3.** Experimental research at the operating production facility featuring AC RED with AFE using different PWM algorithms: PWM with 5, 7, 11, 13, 17 and 19 (a); PWM with 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 and 25 (b)

ных гармоник потребляемого тока, попадающих в резонансную область частотной характеристики питающей сети относительно секций главной понизительной подстанции.

Результаты, опубликованные в статьях Цзин Тао [18, 19], также показывают возможности повышения качества напряжения на входе АВН при правильном выборе предварительно запрограммированных ШИМ последовательностей переключений полупроводниковых модулей.

### Выводы

В статье рассмотрены возможности компенсации реактивной мощности и улучшение качества напряжения в питающей сети посредством высокомоощного РЭПТ на базе трёхуровневых АВН.

### Список источников

1. Abu-Rub H., Bayhan S., Moinoddin S., Malinowski M., Guzinski J. Medium-Voltage Drives: Challenges and Existing Technology // IEEE Power Electron. Mag. 2016. No. 3. P. 29–41.

Предложены рекомендации по определению величины генерируемой реактивной мощности с помощью анализа векторных диаграмм при учёте уровня напряжения в DC звене и потребляемого тока АВН.

Для повышения качества напряжения в сети следует рассматривать сразу несколько факторов, связанных с выбором топологии преобразователей, методов ШИМ и параметров питающей энергосистемы.

Исследования в данной области перспективны в настоящее время и в будущем из-за повсеместного использования мощных РЭПТ с АВН, а также ужесточения требований к энергосбережению, энергоэффективности и качеству напряжения.

2. Wu B., Narimani M. High-Power Converters and AC Drives. 2 ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2017. 480 p.
3. Rodriguez J., Jih-Sheng Lai, Peng F.Z. Multilevel+ Inverters: a Survey of Topologies,

Controls, and Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. No. 4. P. 724–738.

4. Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A., Hasanin B. A Review of the State-of-the-Art of Power Electronics for Power System Applications // International Journal of Electronics and Communication Engineering. 2013. Vol. 1. No. 1. P. 43–52.

5. Rajesh D., Ravikumar D., Bharadwaj S.K., Vastav B.K.S. Design and Control of Digital DC Drives in Steel Rolling Mills // Proceedings of the 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), India. 2016.

6. Moeini A., Dabbaghjamanesh M., Kimball J.W., Zhang J. Artificial Neural Networks for Asymmetric Selective Harmonic Current Mitigation-PWM in Active Power Filters to Meet Power Quality Standards // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020.

7. Patil S.D., Kadu A., Dhabe P. Improved Control Strategy for Harmonic Mitigation in Multilevel Inverter // Proc. 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems. 2021. P. 727–732.

8. Cheng J., Xu T., Chen D., Chen G. Dynamic and Steady State Response Analysis of Selective Harmonic Elimination in High Power Inverters. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 75588–75598.

9. Orcajo G.A., Diez J.R., Cano J.M., Norniella J.G., Pedrayes González J.F., Rojas C.H. Coordinated Management of Electrical Energy in a Steelworks and a Wind Farm // IEEE Transactions on Industry Applications. 2022. Vol. 58. No. 4. P. 5488–5502.

10. Alonso Orcajo G., Rodríguez D.J., Cano J.M., Norniella J.G., Ardura G.P., Llera T.R., Cifrián R.D. Retrofit of a Hot Rolling Mill Plant with Three-Level Active Front End Drives // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. No. 3. P. 2964–2974.

11. Orcajo Gonzalo Alonso, Rodríguez D. Josué, Ardura G. Pablo, Cano José M., Norniella Joaquín G., Llera T. Rocio, Cifrián R. Diego. Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52. No. 3. P. 2714–2723.

12. Pandit P., Mazumdar J., May T., Koelner W.G. Real-Time Power Quality Measurements from a Conventional AC Dragline // IEEE Trans-

actions on Industry Applications. 2010. Vol. 46. No. 5. P. 1755–1763.

13. Dybko M.A., Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Mathematical Simulation Technique for Power Systems Based on Diode-Clamped Multilevel VSC // Eurocon. 2013. P. 941–948.

14. Hoevenaars A., Farbis M., McGraw M. Active Harmonic Mitigation: What the Manufacturers Don't Tell You // IEEE Industry Applications Magazine. 2020. Vol. 62. P. 41–51.

15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. The Dynamic Operation Investigation of an Active Rectifier Control System with IGCT-Thyristor Switching Angle Table Selection Function // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 492–497.

16. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill // Proceedings of the International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, Ekaterinburg, Russia. 2021.

17. Maklakov A.S., Jing T., Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Lisovskaya T.A. Finding the Best Programmable PWM Pattern for Three-Level Active Front-Ends at 18-Pulse Connection // Machines. 2021. No. 9. P. 127.

18. Jing T., Maklakov A., Radionov A., Gasiyarov V., Liang Y. Formulations, Solving Algorithms, Existing Problems and Future Challenges of Pre-Programmed PWM Techniques for High-Power AFE Converters: a Comprehensive Review // Energies. 2022. No. 15. P. 1696.

19. Jing T., Radionov A., Maklakov A., Gasiyarov V. Research of a Flexible Space-Vector-Based Hybrid PWM Transition Algorithm between SHEPWM and SHMPWM for Three-Level NPC Inverters // Machines. 2020. No. 8. P. 57.

## References

1. Abu-Rub H., Bayhan S., Moinoddin S., Malinowski M., Guzinski J. Medium-Voltage Drives: Challenges and Existing Technology. *IEEE Power Electron. Mag.*, 2016, No. 3, pp. 29–41.

2. Wu B., Narimani M. *High-Power Converters and AC Drives*. 2 ed. New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2017. 480 p.

3. Rodriguez J., Jih-Sheng Lai, Peng F.Z. Multilevel Inverters: a Survey of Topologies, Controls, and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, Vol. 49, No. 4, pp. 724–738.
4. Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A., Hasanin B. A Review of the State-of-the-Art of Power Electronics for Power System Applications. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 43–52.
5. Rajesh D., Ravikumar D., Bharadwaj S.K., Vastav B.K.S. Design and Control of Digital DC Drives in Steel Rolling Mills. *Proceedings of the 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), India*. 2016.
6. Moeini A., Dabbaghjamanesh M., Kimball J.W., Zhang J. Artificial Neural Networks for Asymmetric Selective Harmonic Current Mitigation-PWM in Active Power Filters to Meet Power Quality Standards. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020.
7. Patil S.D., Kadu A., Dhabe P. Improved Control Strategy for Harmonic Mitigation in Multilevel Inverter. *Proc. 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*, 2021, pp. 727–732.
8. Cheng J., Xu T., Chen D., Chen G. Dynamic and Steady State Response Analysis of Selective Harmonic Elimination in High Power Inverters. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 75588–75598.
9. Orcajo G.A., Diez J.R., Cano J.M., Norriella J.G., Pedrayes González J.F., Rojas C.H. Coordinated Management of Electrical Energy in a Steelworks and a Wind Farm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, Vol. 58, No. 4, pp. 5488–5502.
10. Alonso Orcajo G., Rodríguez D.J., Cano J.M., Norriella J.G., Ardura G.P., Llera T.R., Cifrián R.D. Retrofit of a Hot Rolling Mill Plant with Three-Level Active Front End Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, Vol. 54, No. 3, pp. 2964–2974.
11. Orcajo Gonzalo Alonso, Rodríguez D. Josué, Ardura G. Pablo, Cano José M., Norriella Joaquín G., Llera T. Rocio, Cifrián R. Diego. Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, Vol. 52, No. 3, pp. 2714–2723.
12. Pandit P., Mazumdar J., May T., Koellner W.G. Real-Time Power Quality Measurements from a Conventional AC Dragline. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, Vol. 46, No. 5, pp. 1755–1763.
13. Dybko M.A., Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Mathematical Simulation Technique for Power Systems Based on Diode-Clamped Multilevel VSC. *Eurocon*, 2013, pp. 941–948.
14. Hoevenaars A., Farbis M., Mc-Graw M. Active Harmonic Mitigation: What the Manufacturers Don't Tell You. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2020, Vol. 62, pp. 41–51.
15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. The Dynamic Operation Investigation of an Active Rectifier Control System with IGCT-Thyristor Switching Angle Table Selection Function. *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2022, pp. 492–497.
16. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill. *Proceedings of the International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, Ekaterinburg, Russia*. 2021.
17. Maklakov A.S., Jing T., Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Lisovskaya T.A. Finding the Best Programmable PWM Pattern for Three-Level Active Front-Ends at 18-Pulse Connection. *Machines*, 2021, No. 9, pp. 127.
18. Jing T., Maklakov A., Radionov A., Gasiyarov V., Liang Y. Formulations, Solving Algorithms, Existing Problems and Future Challenges of Pre-Programmed PWM Techniques for High-Power AFE Converters: a Comprehensive Review. *Energies*, 2022, No. 15, pp. 1696.
19. Jing T., Radionov A., Maklakov A., Gasiyarov V. Research of a Flexible Space-Vector-Based Hybrid PWM Transition Algorithm between SHEPWM and SHMPWM for Three-Level NPC Inverters. *Machines*, 2020, No. 8, pp. 57.



**Антон Андреевич Накатаев**  
**Anton A. Nakataev**  
 инженер кафедры «Электропривод  
 и автоматизация промышленных установок»,  
 Уральский Федеральный университет,  
 Екатеринбург, Россия



**Самуэль Исаак Текле**  
**Samuel I. Tekle**  
 аспирант кафедры «Электропривод  
 и автоматизация промышленных установок»,  
 Уральский Федеральный университет,  
 Екатеринбург, Россия



**Анатолий Михайлович Зюзев**  
**Anatoliy M. Ziuzev**  
 доктор технических наук, профессор кафедры  
 «Электропривод и автоматизация промышленных установок»,  
 Уральский Федеральный университет,  
 Екатеринбург, Россия



**Константин Евгеньевич Нестеров**  
**Konstantin Ye. Nesterov**  
 кандидат технических наук, доцент кафедры  
 «Электропривод и автоматизация промышленных установок»,  
 Уральский Федеральный университет,  
 Екатеринбург, Россия

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-75-88

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШТАНГОВОЙ ГЛУБИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

### Актуальность

В практике проектирования и разработки высокотехнологичных видов оборудования электротехнических комплексов зачастую возникает необходимость проведения испытаний в отсутствии доступа к действующему оборудованию, например из-за специфики объектов нефтедобычи. Для оценки энергоэффективности, исследования проблем диагностирования, отработки функций станций управления штанговых глубинных насосных установок целесообразно использовать лабораторные испытательные стенды, позволяющие выполнить указанные работы в стационарных условиях и значительно сократить затраты на их проведение.

### Цель исследования

Разработка испытательного стенда для исследования динамических процессов в электроприводах штанговых глубинных насосных установок, предназначенных для добычи нефти.

### Методы исследования

Использованы следующие методы: математическое и компьютерное моделирование, в том числе, моделирование в реальном времени; физическое моделирование на базе испытательного стенда.

## Результаты

Разработан испытательный стенд, с заданным масштабом реализующий электро-механические процессы, происходящие в электроприводе штанговой глубинной насосной установки; предложено использование экспериментальных диаграмм мощности в качестве обучающих наборов для задач диагностики методом машинного обучения; продемонстрирована возможность создания и отладки систем управления технологическим процессом добычи нефти на испытательном стенде.

**Ключевые слова:** испытательный стенд, штанговая глубинная насосная установка, моделирование нагрузки, электропривод, нефтедобыча

## TEST BENCH FOR SIMULATING OPERATION MODES OF SUCKER ROD PUMP ELECTRIC DRIVE

### Relevance

In the practice of designing and developing high-tech types of equipment for electrical complexes, it often becomes necessary to conduct tests in the absence of access to existing equipment, for example, due to the specifics of oil production facilities. To assess energy efficiency, study diagnostic problems, and develop the functions of control stations for sucker-rod pumping units, it is advisable to use laboratory test benches allowing to perform these works in stationary conditions and significantly reduce the cost of their implementation.

### Aim of Research

Development of a test bench for the study of dynamic processes in electric drives of sucker-rod pumping units for oil production.

### Research methods

The following methods were used: mathematical and computer modeling, including real-time modeling; physical modeling based on a test bench.

### Results

A test bench has been developed that, with a given scale, implements the electro-mechanical processes occurring in the electric drive of a sucker-rod pumping unit; the use of experimental power diagrams as training sets for diagnostic problems by machine learning is proposed; the possibility of creating and debugging control systems for the technological process of oil production on a test bench was demonstrated.

**Keywords:** test bench, sucker rod pumping unit, load simulation, electric drive, oil production

## Введение

Испытание и отладка электрооборудования являются трудоёмкими и дорогостоящими процессами, особенно для сложных электротехнических комплексов и систем. Очень часто такие факторы, как удалённость от населённых пунктов, отсутствие возможности длительного останова технологического процесса, высокая взрывоопасность объекта затрудняют проведение некоторых этапов исследования. Одним из методов исследований является компьютерное моделирование. Для этих целей существует мно-

жество пакетов программного обеспечения (ПО) (например Matlab [1], PSCAD [2]). Однако для испытания реального оборудования требуется проверка каждого из режимов при различных внешних условиях. В этом случае используются испытательные стенды, Hardware-In-Loop (HIL) [3], Power Hardware-In-Loop (PHIL) [4] — симуляторы и их комбинации.

Испытательные стенды, состоящие из двух электрических машин с механически связанными роторами, позволяют реализовывать множество типов нагрузок, например, нагрузки электромобилей

[5, 6], ветряных турбин [7], экскаваторов [8] и др.

В настоящее время существует большое количество установок, технологический процесс которых обеспечивается электроприводами, работающими с периодически меняющейся нагрузкой. Например, существуют системы водоснабжения, состоящие из последовательности насосных станций [9, 10]. В нефтяной отрасли для добычи нефти используются штанговые глубинные насосные установки (ШГНУ). Так называемые кусты, в состав которых входит несколько ШГНУ, расположены на отдаленных территориях. Технологический процесс предполагает редкое присутствие человека-оператора. Кроме того, такая отдаленность от населенных пунктов накладывает ограничения на электроснабжение. ШГНУ являются довольно мощными потребителями с периодической нагрузкой, они могут оказать значительное влияние на электрическую сеть, а, соответственно, и друг на друга. Выход из строя установок и остановка технологического процесса способны принести значительные финансовые убытки. Это обуславливает важность изучения режимов их работы [11–13] и улучшения энергетических характеристик [14–16].

Основной целью данной работы является демонстрация возможностей предлагаемого испытательного стенда для моделирования режимов работы электропривода штанговой глубинной насосной установки и результатов его применения в текущих исследовательских и инженерных задачах, связанных с процессами оптимизации работы ШГНУ.

### Архитектура испытательного стенда

На рисунке 1 представлена блок-схема испытательного стенда. Здесь  $I_{abc}$ ,  $V_{abc}$ ,  $\omega_{meas}$ ,  $T_{meas}$ ,  $\omega_{ref}$ ,  $T_{ref}$  — измеренные ток и напряжение на входе преобразователя

частоты и на обмотках статора электродвигателя, скорость и момент на валу электродвигателя, задания скорости и электромагнитного момента соответственно. Стенд реализует модульную структуру, позволяющую реализовывать различные как технические, так и программные решения. Например, компьютерная модель может быть включена в состав основной программы, либо подключена извне в виде стороннего кода. Далее будет рассматриваться применение динамической имитационной модели ШГНУ [17]. Схема включает модель привода, модель насосной штанги, модель насоса и модель резервуара.

### Моделирование работы ШГНУ

Соотношение между электромагнитным крутящим моментом и скоростью электропривода в общем случае может быть как линейным, так и нелинейным. При моделировании нагрузки цель состоит в том, чтобы разработать структуру модели нагрузки, которая в упрощенном виде равна передаточной функции разомкнутого контура исследуемой системы.

Полагается, что штанговый насос является механической нагрузкой для моделирования. Механическое уравнение может быть записано:

$$J_{em}(\varphi_{cr}) \frac{d\omega_{em}}{dt} = M_{e1} - M_s, \quad (1)$$

где  $J_{em}$ ,  $\omega_{em}$ ,  $M_{e1}$ ,  $M_s$ ,  $\omega_{cr}$ ,  $\varphi_{cr}$  — приведенный момент инерции, заданная механическая скорость, крутящий момент электродвигателя, момент сопротивления, угловая скорость кривошипа и угловое положение кривошипа соответственно.

С другой стороны, общую динамику испытательного стенда также можно описать:

$$M_m - M_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m; \quad (2)$$

$$J = J_m + J_L; B = B_m + B_L, \quad (3)$$

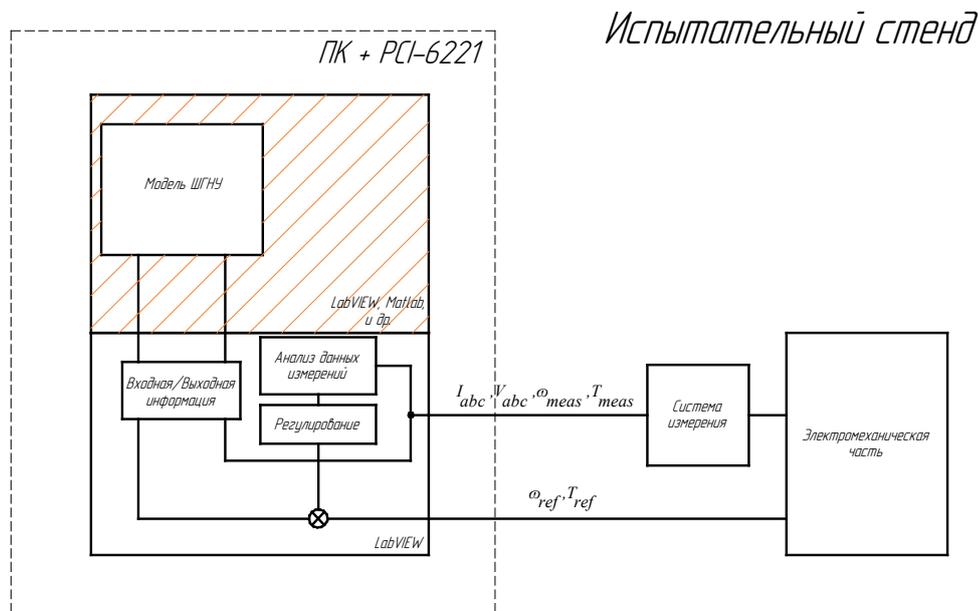


Рисунок 1. Блок-схема испытательного стенда

Figure 1. Block diagram of the test bench

где  $\omega_m$ ,  $M_m$ ,  $M_e$ ,  $J_m$ ,  $J_L$ ,  $B_m$ ,  $B_L$  — механическая скорость, момент на валу приводного двигателя испытательного стенда, момент, развиваемый нагрузочным двигателем, момент инерции приводного двигателя, момент инерции нагрузочного двигателя, коэффициент трения приводного двигателя, коэффициент трения нагрузочного двигателя соответственно.

Коэффициент масштабирования можно вывести из номинального крутящего момента приводного двигателя, приводящего в движение реальный механизм, и номинального крутящего момента приводного двигателя на испытательном стенде. Таким образом, коэффициент масштабирования  $f_c$  может быть определен как:

$$f_c = \frac{M_{n1}}{M_{n2}}, \quad (4)$$

где  $M_{n1}$  — номинальный крутящий момент приводного двигателя ШГНУ и  $M_{n2}$  — номинальный крутящий момент приводного двигателя на испытательном стенде.

Теперь (1) можно записать:

$$J_{em} \frac{d\omega_{em}}{dt} = f_c M_m - M_s. \quad (5)$$

Следующая проблема заключается в том, чтобы найти эталонный крутящий

момент для нагрузочной машины так, чтобы динамический отклик реальной и имитационной системы был одинаковым. Это возможно при следующих условиях:

$$\begin{cases} \omega_m = \omega_{em}; \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{d\omega_{em}}{dt}. \end{cases} \quad (6)$$

Используя (2), (4) и (5), задание на крутящий момент нагрузочного двигателя определяется выражением:

$$M_e = \left(1 - \frac{Jf_c}{J_{em}}\right) M_m + \frac{J}{J_{em}} M_s - B\omega_m. \quad (7)$$

На рисунке 2 изображена схема управления, основанная на (7) без учета коэффициента трения.  $F_T$  и  $F_L$  — контуры управления крутящим моментом приводного и нагрузочного двигателей соответственно. Контуры крутящего момента реальной экспериментальной системы имеют полосу пропускания намного выше, чем контуры скорости, и, следовательно, эквивалентные передаточные функции можно рассматривать как усилительное звено [18].

Описанная методика опирается на оценочные параметры испытательного стенда и полосу пропускания контура управления крутящим моментом. Влияние изменения параметров и выбор спо-

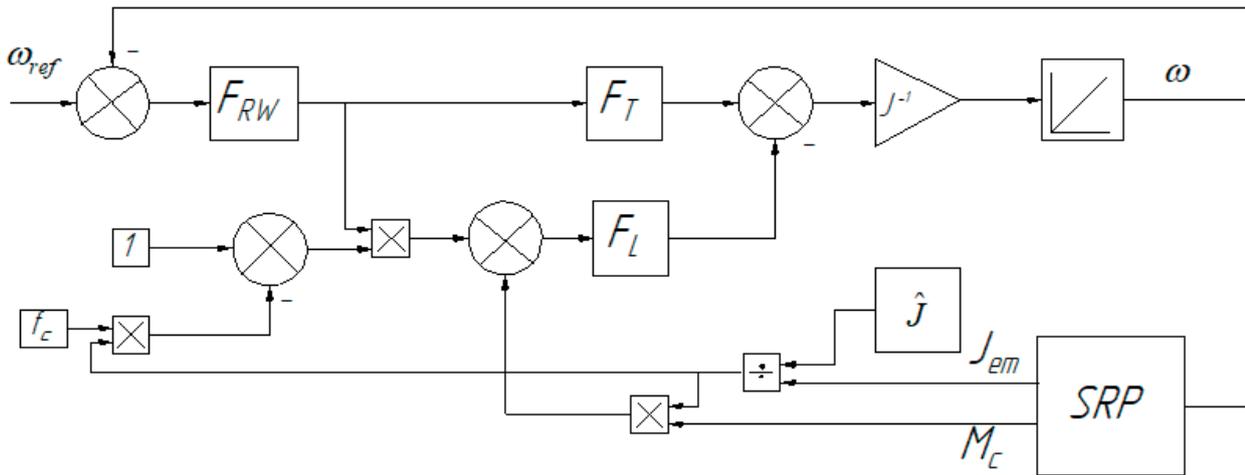


Рисунок 2. Схема управления заданием на момент нагрузочной машины

Figure 2. Load machine torque reference control strategy

совов управления можно провести на основе схемы, показанной на рисунке 3. Если параметры регуляторов обратной связи выбираются такими, что контуры крутящего момента можно считать усиленным звеном, то соотношение между фактической и требуемой скоростями определяется следующим выражением:

$$\omega_m = \left(\frac{\hat{J}}{J}\right) \frac{1}{J_{em}s} (f_c M_m - M_s), \quad (8)$$

где  $\hat{J}$  — предполагаемая инерция;  $s$  — оператор Лапласа.

Таким образом, моделирование не зависит от методов управления моментом и током. Однако ошибка в оценке момента инерции существенно влияет на результаты. Точно так же, в случае когда рассматривается влияние контуров управления моментом, следующее уравнение может быть использовано при анализе:

$$\omega_m = \left[ \left( \frac{F_T}{F_L} - \left( 1 - \frac{\hat{J}f_c}{J_{em}} \right) \right) M_m + \frac{\hat{J}}{J_{em}} M_s \right] \frac{1}{J_s} \quad (9)$$

Очевидно, функционирование системы ограничено определенной полосой пропускания. Таким образом, возможность отслеживания желаемой скорости зависит от контура управления крутящего момента.

### Описание испытательного стенда

Испытательный стенд состоит из двух асинхронных двигателей 4АМА80В4У3 мощностью 1,5 кВт, преобразователей частоты Altivar 630 производства фирмы Schneider Electric и ACS580 производства фирмы ABB, тормозного резистора, измерительных устройств (датчики напряжения, тока, скорости и крутящего момента) и ПК с установленной картой сбора данных NI PCI-6221, работающей под управлением программного обеспечения LabVIEW.

Каждая машина выполняет свою функцию в соответствии со схемой, показанной на рисунке 3. Нагрузочная машина создаёт на валу испытуемого двигателя момент, зависящий от входного управляющего воздействия питающего его преобразователя. В данном случае управляющее воздействие соответствует приведенному к валу двигателя моменту сопротивления штанговой глубинной насосной установки.

Преобразователь ACS580, подключенный к нагрузочному двигателю, имеет несколько макросов, содержащих настройки системы управления для различных конфигураций [19]. Например, принцип управления может быть пере-

ключен со скалярного на векторный, или наоборот, путем выбора подходящего макроса. При выборе векторного управления ACS580 допускается внешнее задание крутящего момента в качестве альтернативы заданию скорости. ACS580 имеет более быстрый контур крутящего момента, так как система управления основана на прямом управлении крутящим моментом (DTC) [20].

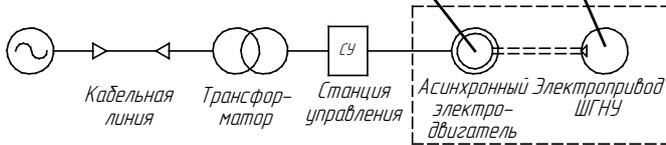
Основные элементы стенда представлены на рисунке 4. Две асинхронные машины соединены механически. Altivar 630 (ПЧ 1) регулирует скорость исследуемой машины, ACS580 (ПЧ 2) управляет крутящим моментом нагрузочной машины. Сигнал задания момента  $T_{зад}$  рассчитывается моделью реального времени ШГНУ. Импульсный энкодер E40S6-1000-3-24 (ДС) с точностью 1000 импульсов на оборот измеряет угловое положение ротора испытуемого двигателя с дальнейшим пересчетом в угловую скорость. Датчик момента ZMDN (ДМ) устанавливается на общий вал для измерения крутящего момента. На ПК с установленным пакетом LabVIEW работает модель реального времени ШГНУ. Плата NI PCI-6221 обеспечивает ввод / вывод аналоговых и цифровых сигналов. Используя цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи (АЦП) на плате NI PCI-6221, ПК посылает аналоговые сигналы задания скорости  $\omega_{зад}$  и момента  $T_{зад}$  на преобразователи частоты и получает цифровой сигнал об измеренном угловом положении ротора и аналоговый сигнал о крутящем моменте на валу, формируемые энкодером и датчиком крутящего момента соответственно. В течение большей части цикла качания нагрузочная машина работает в генераторном режиме, но есть интервалы времени, когда происходит переход в двигательный режим. Для обеспечения режима торможения в нагрузочном приводе используется тормозной резистор. Также присутствуют датчики

напряжения и тока, установленные на входах и выходах преобразователей частоты для расчёта и дальнейшего контроля мощности.

Структура ПО стенда изображена на рисунке 5. Следует отметить, что расчет математической модели ШГНУ, выдача задающих воздействий и доступ к данным АЦП проводится с различной дискретизацией по времени. Для обеспечения синхронизации потоков данных в условиях разности времени расчёта модели и реального времени используется система, состоящая из двух вложенных циклов. Расчет модели проводится во внутреннем цикле, а доступ к АЦП, установка новых переменных для модели и выдача задающих воздействий — во внешнем. Исполнение программы проводится последовательно, начиная с расчета модели во внутреннем цикле. При этом условие выхода из внутреннего цикла определяется временем расчета модели. После расчета модели все переменные становятся доступными для внешнего цикла, где они преобразуются в сигнал задания момента для нагрузочного электродвигателя. Далее данные от датчиков об угле поворота вала и моменте на валу считываются АЦП и задаются в качестве новых начальных условий для модели во внутреннем цикле. После этого процесс расчета повторяется.

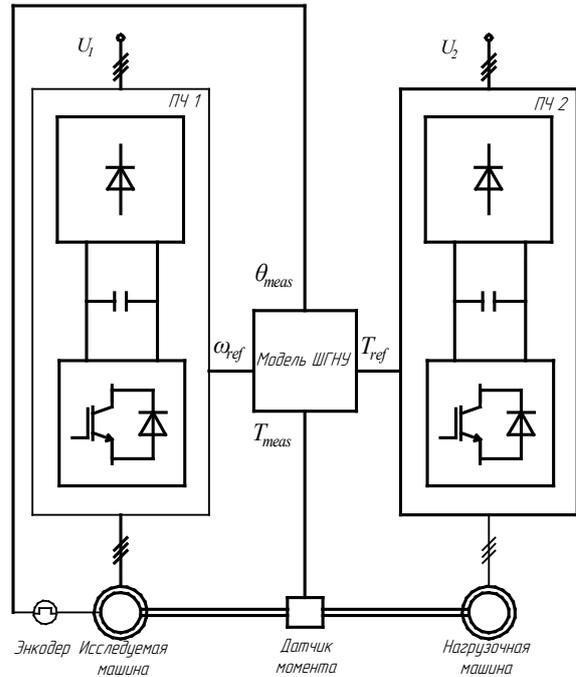
### **Использование испытательного стенда для моделирования работы ШГНУ**

Для оценки адекватности испытательного стенда во время работы установки проводились измерения тока, напряжения, скорости и крутящего момента. На основе этих измерений рассчитана механическая мощность и входная активная мощность на клеммах Altivar 630. На рисунке 6 показаны кривые заданной и измеренной скоростей. Колебания скорости двигателя обусловлены использова-



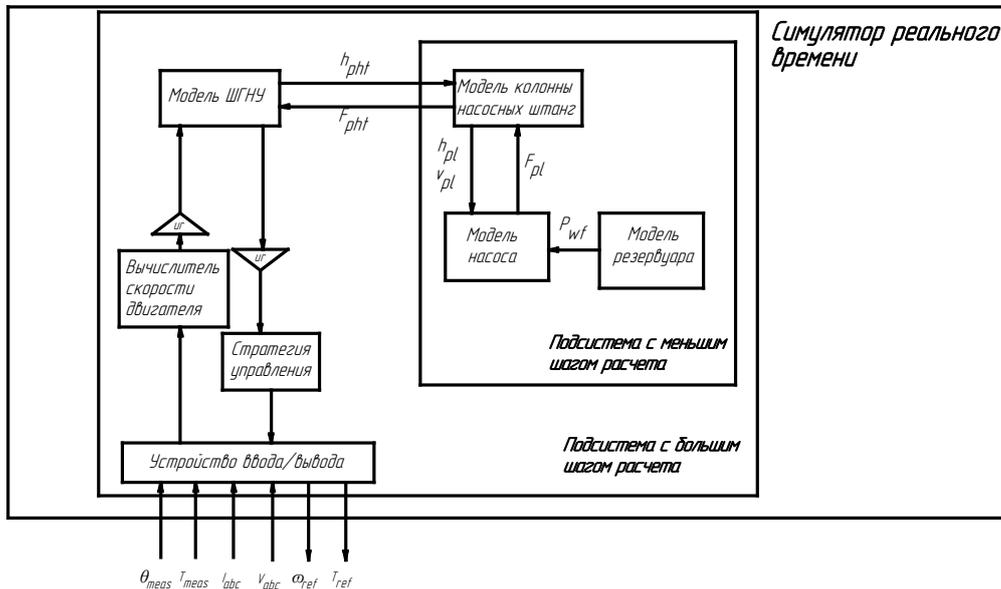
**Рисунок 3.** Схема соответствия агрегатов испытательного стенда реальному оборудованию нефтяного месторождения

**Figure 3.** Correspondence diagram of the test bench units to the real equipment of the oil field



**Рисунок 4.** Структура испытательного стенда

**Figure 4.** Schematic of test bench



**Рисунок 5.** Структура программы LabVIEW

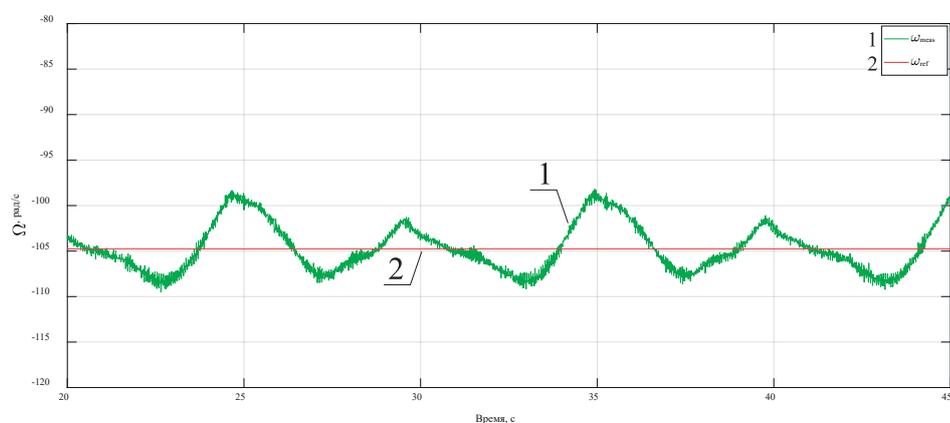
**Figure 5.** LabVIEW program structure

нием скалярной системы управления в настройках Altivar 630, а также периодическим характером нагрузки. На рисунке 7 приведены масштабированные сравнительные значения заданного и измерен-

ного крутящих моментов. Измеренный крутящий момент соответствует заданному с небольшим отклонением, обусловленным потерями в механической части, что подтверждает возможность использо-

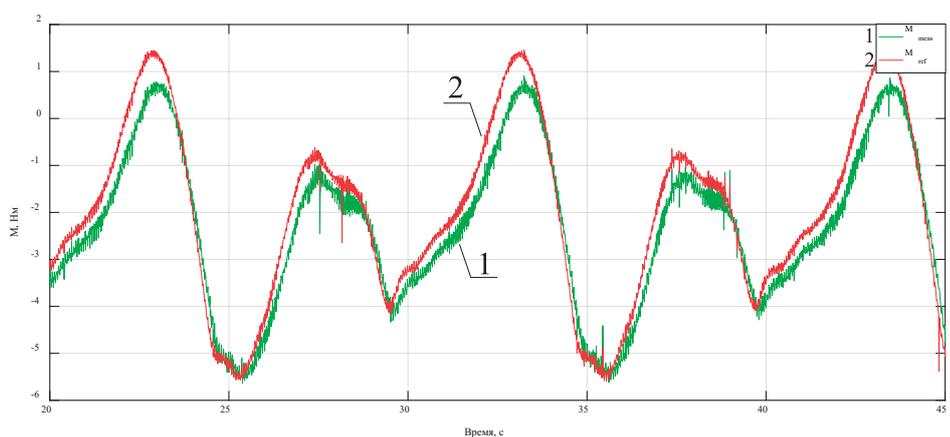
вания предложенной методики эмуляции режимов работы электропривода ШГНУ. На рисунке 8 показана активная мощность на входных клеммах Altivar 630 и

механическая мощность. Кривые имеют похожую форму, но активная входная мощность больше механической на величину КПД.



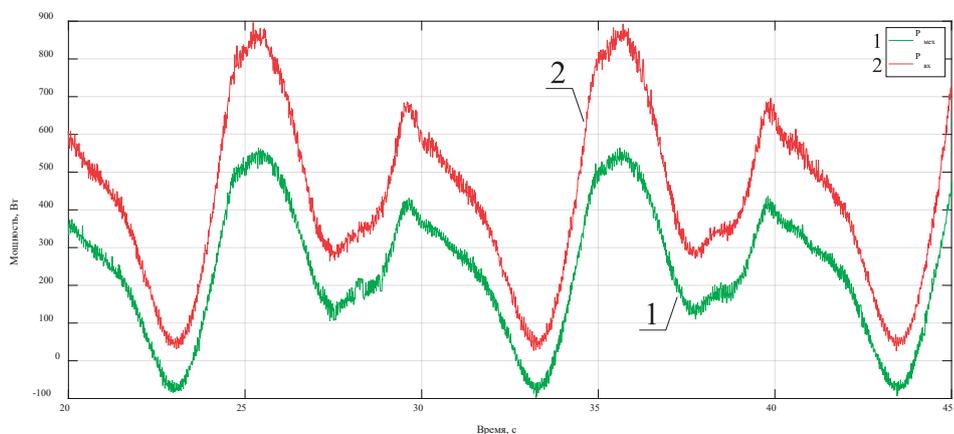
**Рисунок 6.** Сравнение заданной (2) и измеренной (1) скоростей

**Figure 6.** Reference speed (2) and measured speed (1) comparison



**Рисунок 7.** Сравнение заданного (2) и измеренного (1) моментов

**Figure 7.** Reference torque (2) and measured torque (1) comparison



**Рисунок 8.** Активная мощность на входе инвертора (2) и механическая мощность на валу двигателя (1)

**Figure 8.** Active power at the input of converter (2) and mechanical power (1)

### **Создание обучающего набора для диагностики штанговых глубинных насосных установок на экспериментальном стенде**

Из-за сложности устройства и условий окружающей среды ШГНУ могут работать как в нормальных условиях, так и в условиях, характеризующихся различными неисправностями. Существует более 20 различных рабочих состояний, которые могут быть визуально идентифицированы экспертами в предметной области [18]. Эксплуатация ШГНУ в некоторых неисправных состояниях может привести к снижению производительности или повреждению оборудования. Все это приводит к уменьшению экономической эффективности ШГНУ. Следовательно, контроль работы ШГНУ является важной задачей. Динамометрическая карта и кривая мощности двигателя могут быть использованы для контроля рабочего состояния штангового насоса. Различные условия работы ШГНУ определяются по форме динамометрической карты [21]. Опытный технический персонал диагностирует рабочее состояние установки именно таким образом. Однако этот метод не всегда эффективен, поскольку на него легко может повлиять субъективный опыт технического персонала, также он не позволяет проводить мониторинг в реальном времени. Поэтому необходима высокоточная методика диагностики ШГНУ в реальном времени. В развитии этой технологии основными являются компьютерные методы диагностики.

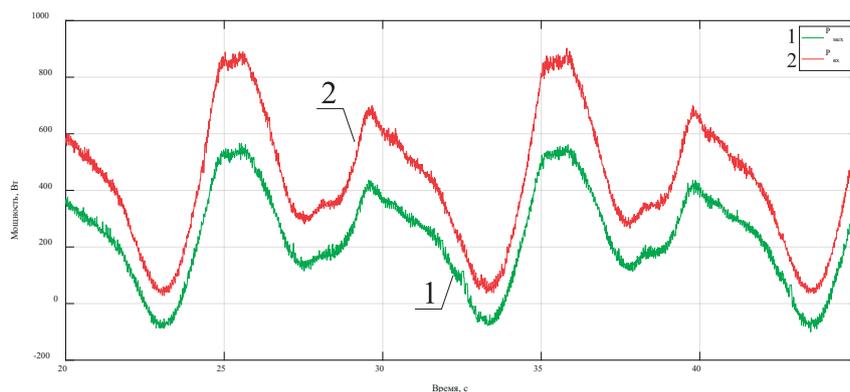
Однако компьютерные методы диагностики требуют большого количества размеченных образцов разного рода неисправностей. Тем не менее, сбор различных типов неисправностей является сложной задачей, поскольку исследуемая скважина, маловероятно, имеет все виды условий работы. Типичным решением этой проблемы является построение обучающей выборки, содержащей образцы,

отобранные из разных скважин. Однако при таком подходе на точность диагностики влияют различия в свойствах скважин [22]. Чтобы решить эту проблему, предлагается генерировать образцы неисправностей с использованием экспериментального испытательного стенда, который имитирует динамику ШГНУ.

Несколько факторов могут способствовать неправильной работе ШГНУ. Основные причины можно сгруппировать в механические, эксплуатационные и электрические отказы. Механическое трение между плунжером и корпусом насоса, шаром клапана и седлом приводит к эрозии и износу. Из-за износа и эрозии клапан не может быть полностью закрыт. Кроме того, увеличивается зазор между корпусом насоса и плунжером. Все это может привести к серьезной течи. Операционные сбои могут быть вызваны повышением температуры, проблемами с газом, коррозией и наличием песка. Проблема газа является весьма серьезной, поскольку характеристики рабочего процесса насоса тесно связаны с его давлением. Характеристика рабочего процесса насоса относится к газовому политропному процессу [23]. В ходе технологического процесса масса и объем газа в насосе меняются из-за изменения давления, расхода и растворимости. Проблемы с газом могут серьезно повлиять на эффективность производства. Например, эффективность значительно снижается, если нагнетательный клапан открывается с опозданием из-за сжатия газа. Электрические неисправности могут возникнуть в первичном двигателе или различных датчиках. Однако последствия электрических сбоев менее ощутимы по сравнению с механическими и эксплуатационными. Воздействие различных отказов может быть учтено при анализе работы штангового насоса, и, следовательно, могут быть смоделированы различные типы рабочих состояний.

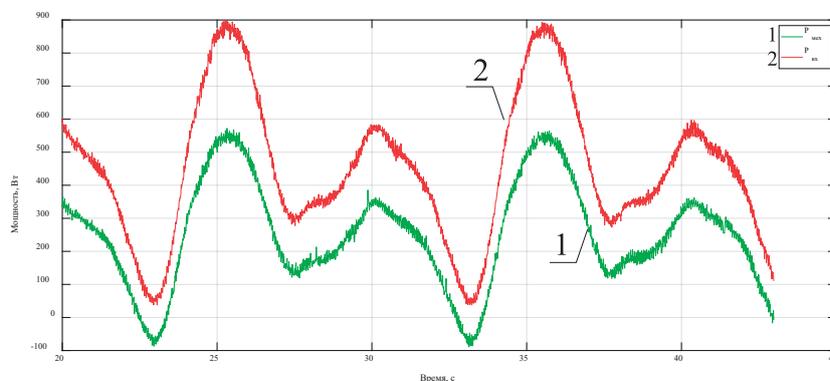
На основе анализа механизма ШГНУ может быть сгенерирован набор данных, включающий определенные виды рабочих состояний. С помощью испытательного стенда были воспроизведены кривые мощности двигателя для нормального рабочего состояния, при воздействии газа, утечке нагнетательного клапана, достижении плунжером верхней и нижней мертвых точек (рисунки 8–12). На рисунке 8 показана мощность на входе преобразователя и механическая мощность на валу для нормального рабочего режима. Минимальная мощность соответствует концу хода вверх. На периоде работы механизма кривая мощности двигателя имеет два пика. Первый пик возникает во время хода штока вверх, когда двигатель с помощью противовеса на кривошипе тянет полированный шток,

второй пик возникает во время хода вниз, когда двигатель с помощью полированного штока поднимает противовес на кривошипе. Разность мощностей на входе преобразователя и механической мощностью на валу обусловлена потерями в двигателе и преобразователе. Видно, что КПД меняется при изменении нагрузки и скорости. Примеры при утечке нагнетательного клапана, воздействии газа, условиях достижения плунжером верхней и нижней мертвых точек показаны на рисунках 9–12. Очевидно, сложно различить рабочие состояния путем визуального осмотра кривой мощности двигателя. Однако характеристики различных рабочих состояний можно было бы лучше объяснить, используя некоторые особенности, связанные с определенным физическим смыслом и мерами изменчивости.



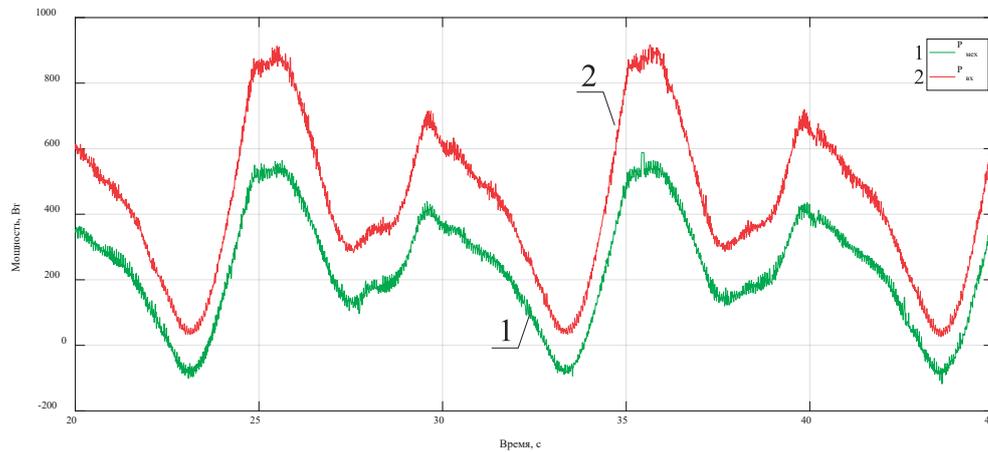
**Рисунок 9.** Активная мощность на входе инвертора (2) и механическая мощность на валу двигателя (1) при воздействии газа

**Figure 9.** Gas affected active power at the input of converter (2) and mechanical power (1)



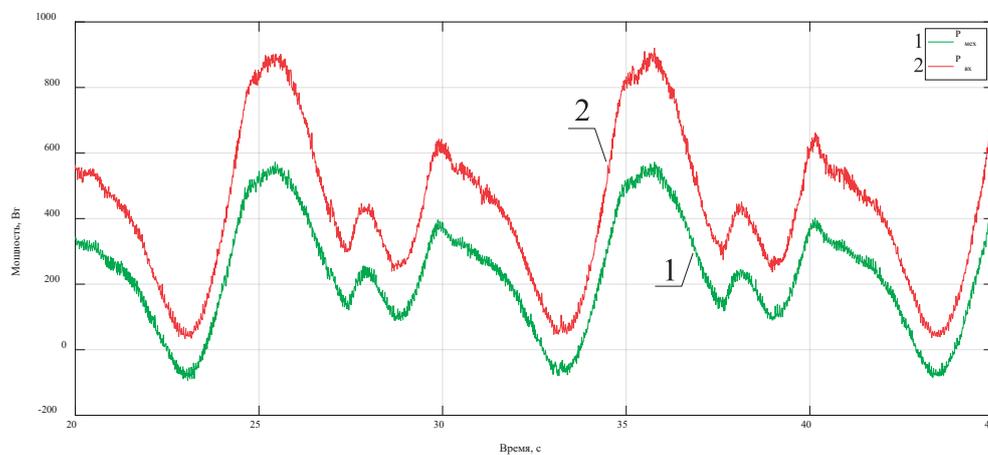
**Рисунок 10.** Активная мощность на входе инвертора (2) и механическая мощность на валу двигателя (1) при утечке нагнетательного клапана

**Figure 10.** Active power at inverter input (2) and mechanical power at motor shaft (1) traveling valve leakage



**Рисунок 11.** Активная мощность на входе инвертора (2) и механическая мощность на валу двигателя (1) при упоре плунжера в верхней мертвой точке

**Figure 11.** Active power at the inverter input (2) and mechanical power at the motor shaft (1) when the plunger hitting top dead center



**Рисунок 12.** Активная мощность на входе инвертора (2) и механическая мощность на валу двигателя (1) при упоре плунжера в нижней мертвой точке

**Figure 12.** Active power at the inverter input (2) and mechanical power at the motor shaft (1) when the plunger hitting bottom dead center

### Вывод

Представленная структура и программное обеспечение предлагаемого испытательного стенда, а также результаты эмуляции нагрузки демонстрируют возможность его применения в текущих исследовательских и инженерных задачах, связанных с процессами разработки

интеллектуальных станций управления и оптимизации работы ШГНУ. В частности, рассмотрена возможность создания обучающего набора диаграмм мощности для диагностики штанговых глубинных насосных установок с помощью компьютерных методов диагностики.

### Список источников

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.
2. Elbelkasi M. S., Badran E. A., Abdel-Rahman M. H., Müller Z. Modelling of AC

Electric Railway System using PSCAD/EMTDC // 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague: Czech Technical University in Prague, 2020. P. 1–6.

3. Lauss G., Strunz K. Accurate and Stable Hardware-in-the-Loop (HIL) Real-Time Simu-

lation of Integrated Power Electronics and Power Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. Vol. 36. P. 10920–10932.

4. Mudrov M., Ziuzev A., Nesterov K., Valtchev S. Power Electrical Drive Power-Hardware-in-the-Loop System // 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk: Platov South-Russian State Polytechnic University, 2018. P. 1–6.

5. Rassolkin A., Vodovozov V. A Test Bench to Study Propulsion Drives of Electric Vehicles // 2013 International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics. Ljubljana: University of Ljubljana, 2013. P. 275–279.

6. Marignetti F., D'Aguzzo D., Volpe G. Design and Experiments of a Test Equipment for Hybrid and Electric Vehicle Drivetrains // 2017 12<sup>th</sup> International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monaco: Monaco Development Durable, 2017. P. 1–6.

7. Kouadria S., Belfedhal S., Meslem Y., Berkouk E.M. Development of Real Time Wind Turbine Emulator Based on DC Motor Controlled by Hysteresis Regulator // 2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). Morocco: Ouarzazate, 2013. P. 246–250.

8. Malafeev S.I., Novgorodov A.A., Konyashin V.I. Bench Tests of the Quarry Excavators Main Electric Drives // 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Saint-Petersburg: ITMO University, 2020. P. 1–5.

9. Elker I., Kara T. Modeling and Simulation of Water Supply Systems for Feedback Control // Rev. Energ. Ren.: Power Engineering (2001). 2001. Vol. 21. P. 49–55.

10. Rodic M., Jezernik K., Trlep M. Dynamic Emulation of Mechanical Loads - Approach Based on Nonlinear Control // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, 2005. P. 10.

11. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khussainov F.F. Control of Sucker Rod Pumps Energy Consumption // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2015. P. 1–4.

12. Teclé S.I., Ziuzev A. A Review on Sucker Rod Pump Monitoring and Diagnostic System // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry:

Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2019. P. 85–88.

13. Ziuzev A., Nakataev A., Shelyug S., Ippolitov V. Influence of an Electric Drive with Periodic Load on Voltage Quality // 2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 2021. P. 1–5.

14. Solodkiy E.M., Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Improving the Energy Efficiency of the Suckerrod Pump via Its Optimal Counterbalancing // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Adler, Russia, 2019. P. 1–5.

15. Ladygin A.N., Bogachenko D.D., Kholin V.V., Ladygin N.A. Method of Efficient Control of the Sucker-Rod Pump Electric Drive // 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED). Moscow, Russia, 2020. P. 1–5.

16. Ziuzev A., Nakataev A., Sesekin A., Sashchenko D., Nesterov K. Method of Power Optimization of a Group of Independent Electric Drives with Periodic Load // 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Yekaterinburg, Russia, 2021. P. 1–4.

17. Зюзов А.М., Текле С.И. Динамические симуляторы в задачах диагностики штанговых глубинно-насосных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 1. С. 168–177.

18. Takács G. Sucker Rod Pumping Handbook. Oxford, United Kingdom: Gulf Professional Publishing, 2015. 585 p.

19. ABB General Purpose Drives, Acs580 Drive Standard Control Program: Firmware Manual, October 30, 2020. URL: <https://new.abb.com/products/3AUA0000130331/acs580-01> (дата обращения 12.02.2022).

20. ABB, DTC: A Motor Control Technique for All Seasons, ABB White Paper. URL: <https://new.abb.com/drives/dtc> (дата обращения 12.02.2022).

21. Boyuan Z., Xianwen G. Fault Diagnosis of Sucker Rod Pumping Systems Based on Curvelet Transform and Sparse Multi-Graph Regularized Extreme Learning Machine // International Journal of Computational Intelligence Systems. 2018. Vol. 11. No. 1. P. 428–437.

22. Boyuan Z., Xianwen G., Xiangyu L. Diagnosis of Sucker Rod Pump Based on Generating Dynamometer Cards // *Journal of Process Control*. 2019. Vol. 77. P. 76–88.

23. Boyuan Z., Xianwen G., Xiangyu L. Fault Detection for Sucker Rod Pump Based on Motor Power // *Control Engineering Practice*. 2019. Vol. 86. P. 37–47.

### References

1. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPower-Systems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. [in Russian].

2. Elbelkasi M. S., Badran E. A., Abdel-Rahman M. H., Müller Z. Modelling of AC Electric Railway System using PSCAD/EMTDC. *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague, Czech Technical University in Prague, 2020, pp. 1–6.

3. Lauss G., Strunz K. Accurate and Stable Hardware-in-the-Loop (HIL) Real-Time Simulation of Integrated Power Electronics and Power Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, Vol. 36, pp. 10920–10932.

4. Mudrov M., Ziuzev A., Nesterov K., Valtchev S. Power Electrical Drive Power-Hardware-in-the-Loop System. *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University, 2018, pp. 1-6.

5. Rassolkin A., Vodovozov V. A Test Bench to Study Propulsion Drives of Electric Vehicles. *2013 International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics*. Ljubljana, University of Ljubljana, 2013, pp. 275–279.

6. Marignetti F., D’Aguanno D., Volpe G. Design and Experiments of a Test Equipment for Hybrid and Electric Vehicle Drivetrains. *2017 12th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. Monaco, Monaco Development Durable, 2017, pp. 1–6.

7. Kouadria S., Belfedhal S., Meslem Y., Berkouk E.M. Development of Real Time Wind Turbine Emulator Based on DC Motor Controlled by Hysteresis Regulator. *2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. Morocco, Ouarzazate, 2013, pp. 246–250.

8. Malafeev S.I., Novgorodov A.A., Konyashin V.I. Bench Tests of the Quarry Excavators Main Electric Drives. *2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. Saint-Petersburg, ITMO University, 2020, pp. 1–5.

9. Elker I., Kara T. Modeling and Simulation of Water Supply Systems for Feedback Control. *Rev. Energ. Ren.: Power Engineering (2001)*, 2001, Vol. 21, pp. 49–55.

10. Rodic M., Jezernik K., Trlep M. Dynamic Emulation of Mechanical Loads - Approach Based on Nonlinear Control. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*. Dresden, 2005, pp. 10.

11. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F. Control of Sucker Rod Pumps Energy Consumption. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Omsk, National Research Tomsk Polytechnic University, 2015, pp. 1–4.

12. Teclé S.I., Ziuzev A. A Review on Sucker Rod Pump Monitoring and Diagnostic System. *2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russia, 2019*. 2019, pp. 85–88.

13. Ziuzev A., Nakataev A., Shelyug S., Ippolitov V. Influence of an Electric Drive with Periodic Load on Voltage Quality. *2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 2021*. 2021, pp. 1–5.

14. Solodkiy E.M., Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Improving the Energy Efficiency of the Suckerrod Pump via Its Optimal Counterbalancing. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Adler, Russia, 2019*. 2019, pp. 1–5.

15. Ladygin A.N., Bogachenko D.D., Kholin V.V., Ladygin N.A. Method of Efficient Control of the Sucker-Rod Pump Electric Drive. *2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), Moscow, Russia, 2020*. 2020, pp. 1–5.

16. Ziuzev A., Nakataev A., Sesekin A., Sashchenko D., Nesterov K. Method of Power Optimization of a Group of Independent Electric Drives with Periodic Load. *2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Yekaterinburg, Russia, 2021*. 2021, pp. 1–4.

17. Zyuzev A.M., Tekle S.I. Dinamicheskie simulyatory v zadachakh diagnostiki shtangovykh glubinno-nasosnykh ustanovok [Sucker Rod Pumping System: Challenges to Develop Diagnostic System and Role of Dynamic Simulator]. *Engineering Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets*, 2022, Vol. 333, No. 1, pp. 168–177. [in Russian].
18. Takács G. *Sucker Rod Pumping Handbook*. Oxford, United Kingdom, Gulf Professional Publishing, 2015. 585 p.
19. ABB *General Purpose Drives, Acs580 Drive Standard Control Program: Firmware Manual*, October 30, 2020. URL: <https://new.ab7477874Multi-Graph Regularized Extreme Learning Machine>. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2018, Vol. 11, No. 1, pp. 428–437.
22. Boyuan Z., Xianwen G., Xiangyu L. Diagnosis of Sucker Rod Pump Based on Generating Dynamometer Cards. *Journal of Process Control*, 2019, Vol. 77, pp. 76–88.
23. Boyuan Z., Xianwen G., Xiangyu L. Fault Detection for Sucker Rod Pump Based on Motor Power. *Control Engineering Practice*, 2019, Vol. 86, pp. 37–47.



**Виталий Алексеевич Шабанов**

**Vitaly A. Shabanov**

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



**Александр Владимирович Сорокин**

**Alexander V. Sorokin**

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

УДК 621.316.925.1

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89-100

## ПРИЗНАКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

### Актуальность

Устройства определения места повреждения на линиях электропередачи предполагают известными вид замыкания и поврежденные фазы. Однако их алгоритмы, как правило, не обладают способностью различать поврежденную фазу. Поэтому определение поврежденных фаз при замыканиях на линиях электропередачи выполняется отдельными устройствами — избирателями поврежденных фаз. Сильное влияние на работу избирателей оказывает переходное сопротивление в месте замыкания. Особенно сильно влияние переходного сопротивления при однофазных замыканиях на землю. Поэтому исследование влияния переходного сопротивления на работу избирателей при однофазных замыканиях на землю является актуальной задачей.

### Цель исследований

Цель статьи – исследовать и разработать признаки поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю через переходное сопротивление в сетях с изолированной нейтралью.

### Метод исследований

Для исследования признаков поврежденной фазы в статье используется построение векторных диаграмм и графиков изменения фазных напряжений при изменении переходного сопротивления в месте повреждения. При замыкании через переходное сопротивление принимается, что вершины треугольника линейных напряжений на векторной диаграмме и потенциал нейтрали при увеличении переходного сопротивления перемещаются по окружностям, а потенциал земли остается неизменным.

Для исследования изменения величины фазных напряжений при замыканиях через переходное сопротивление введена новая переменная – угол, на который вектор напряжения нейтрали, взятый с обратным знаком, отстает от вектора напряжения поврежденной фазы в предаварийном режиме. Введение такой переменной упрощает уравнения для напряжений и делает анализ влияния переходного сопротивления более общим и наглядным.

### Результаты

Показано, что в зависимости от величины переходного сопротивления наименьшим из фазных напряжений при однофазных замыканиях на землю может быть либо напряжение поврежденной фазы, либо напряжение неповрежденной фазы, отстающей по отношению к поврежденной. При этом наименьшее значение фазного напря-

жения может быть признаком поврежденной фазы только в диапазоне переходных сопротивлений от нуля до граничного значения.

Сформулированы признаки поврежденной фазы при замыканиях через переходное сопротивление. Показано, что признаки поврежденной фазы, использующие угловые соотношения между напряжениями, справедливы при любой величине переходного сопротивления. В то время как признаки, основанные на определении фазы с наименьшим фазным напряжением, действуют только в ограниченном диапазоне значений переходного сопротивления.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание на землю, сеть с изолированной нейтралью, поврежденная фаза, переходное сопротивление

## FEATURES OF A FAULTY PHASE AT SINGLE PHASE-TO-GROUND FAULTS

### Relevance

Devices for determining the location of fault on power lines assume a known type of short circuit and faulty phases. However, their algorithms, as a rule, can not distinguish the faulty phase. Therefore, the determination of faulty phases during short circuits on power lines is performed by separate devices – faulty phase selectors. The transient resistance at the point of closure has a strong influence on the work of selectors. The influence of transient resistance is especially strong at single phase-to-ground faults. Therefore, the study of the effect of transient resistance on the work of selectors at single phase-to-ground faults is an urgent task.

### Aim of research

The aim of the article is to investigate and develop features of a faulty phase at single phase-to-ground faults via transient resistance in networks with an isolated neutral.

### Research method

To study the features of a faulty phase, the article uses vector diagrams and graphs of changes in phase voltages when the transient resistance changes at fault location. When closing through a transient resistance, it is assumed that the vertices of the linear voltage triangle on the vector diagram and the neutral potential move around the circles with increasing transient resistance, and the ground potential remains unchanged.

To study the change in the magnitude of phase voltages during short circuits through the transient resistance, a new variable was introduced — the angle by which the neutral voltage vector, taken with the reverse sign, lags behind the voltage vector of the faulty phase in the pre-emergency mode. The introduction of such a variable simplifies the equations for stresses and makes the analysis of the effect of transient resistance more general and visual.

### Results

It is shown that, depending on the magnitude of the transient resistance, the lowest of the phase voltages in single phase-to-ground faults can be either the voltage of the faulty phase or the voltage of the unfaulted phase lagging in relation to the faulty one. At the same time, the lowest value of the phase voltage can be a sign of a faulty phase only in the range of transient resistances from zero to the boundary value.

The features of a faulty phase during short circuits through the transient resistance are formulated. It is shown that the features of a faulty phase using angular relations between stresses are valid for any value of the transient resistance. While the features based on the determination of the phase with the lowest phase voltage act only in a limited range of transient resistance values.

**Keywords:** single phase-to-ground fault, network with isolated neutral, faulty phase, transient resistance

## Введение

Основные виды релейной защиты линий электропередачи и устройства определения места повреждения предполагают известными вид короткого замыкания (КЗ) и поврежденные фазы. В то же время их алгоритмы, как правило, не обладают способностью различать поврежденную фазу [1, 2]. Поэтому определение поврежденных фаз при КЗ на линиях электропередачи выполняется отдельными устройствами — избирателями поврежденных фаз (ИПФ), которые являются составной частью схем релейной защиты и автоматики и способов определения места повреждения [3–6].

По используемым признакам и критериям выбора поврежденной фазы ИПФ можно разделить на несколько групп [7]. К первой группе относятся ИПФ, в которых выполняется сравнение фазных токов. Признаком поврежденной фазы является повышенное значение тока. Например, при однофазных КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью поврежденной является фаза, ток в которой больше заданного значения или больше, чем токи в неповрежденных фазах. Избиратели первой группы просты по устройству, но имеют ограниченное применение, так как при удаленных КЗ через переходное сопротивление на нагруженных линиях ток поврежденной фазы может быть соизмерим с токами в неповрежденных фазах.

Измерительным элементом ИПФ второй группы являются реле сопротивления. Признаком поврежденной фазы является модуль или комплекс (вектор) отношения напряжения к току. Например, при однофазных КЗ для выбора поврежденной фазы используются три реле сопротивления, каждое из которых включено на фазное напряжение  $U_\phi$  и компенсированный фазный ток  $I_\phi + kI_0$  [8]. Поврежденной является фаза, для которой модуль входного сопротивления, равный отношению фазного напряжения к

компенсированному фазному току, меньше заданного значения, либо для которой комплексное входное сопротивление находится в заданной области комплексной плоскости. Недостаток таких ИПФ — сильное влияние переходного сопротивления в месте короткого замыкания, и при значительных сопротивлениях такой способ не всегда оказывается работоспособным. Такие ИПФ нашли применение в дистанционных защитах и в устройствах однофазного автоматического повторного включения [9].

Наибольшее распространение в сетях напряжением 110 кВ и выше нашли ИПФ третьей группы. Устройства третьей группы основаны на сравнении угловых соотношений между векторами симметричных составляющих фазных токов между собой или с фазными токами [10–14.]. Например, при однофазных КЗ векторы симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей в поврежденной фазе совпадают по направлению, и без учета искажающих факторов углы между их векторами равны нулю. Главным достоинством использования условий, связывающих симметричные составляющие токов в месте повреждения, является независимость условий срабатывания ИПФ от переходных сопротивлений в месте повреждения, а также возможность избежать влияние токов нагрузки

В последние годы активно разрабатываются способы и устройства для дистанционного определения места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в электрических сетях напряжением 6–35 кВ [15–17], а также методы определения места повреждения с использованием синхронизированных измерений [18–21]. Такие устройства также предполагают известной поврежденную фазу и должны применяться совместно с ИПФ. Поэтому исследование признаков поврежденной фазы при ОЗЗ является актуальной задачей.

### Особенности сетей 6–35 кВ с точки зрения признаков поврежденной фазы

Для дистанционного определения места ОЗЗ в сетях 6–35 кВ необходимы ИПФ, учитывающие свойства таких сетей, обусловленные режимом заземления нейтрали. Сети 6–35 кВ — это сети с малыми токами замыкания на землю. В таких сетях ОЗЗ практически не изменяет величину фазных токов, и ИПФ первой группы по признаку наибольшего фазного тока не применимы. По этой же причине неприменимы и ИПФ второй группы. Токи обратной и нулевой последовательностей при ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью также малы и значительно меньше токов нагрузки [22]. Это затрудняет использование ИПФ третьей группы. Кроме того, для ИПФ третьей группы необходимо определять токи обратной последовательностей в каждой из фаз. Для этого требуются трехфазные фильтры токов обратной последовательности, которые требуют установки трансформаторов тока во всех трех фазах. Однако в сетях 6–35 кВ трансформаторы тока часто устанавливаются только в двух фазах (обычно в фазах  $A$  и  $C$ ). Это делает затруднительным, а во многих случаях невозможным использование граничных условий, связывающих симметричные составляющие токов обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения. Поэтому в сетях напряжением 6–35 кВ определение поврежденной фазы при ОЗЗ основано на выявлении фазы с наименьшим значением фазного напряжения [23, 24]. Другой особенностью сетей с изолированной нейтралью является возможность появления значительных переходных сопротивлений в месте замыкания. Однако выбор поврежденной фазы по наименьшему значению фазного напряжения при больших переходных сопротивлениях в месте повреждения может работать не корректно [25]. Цель

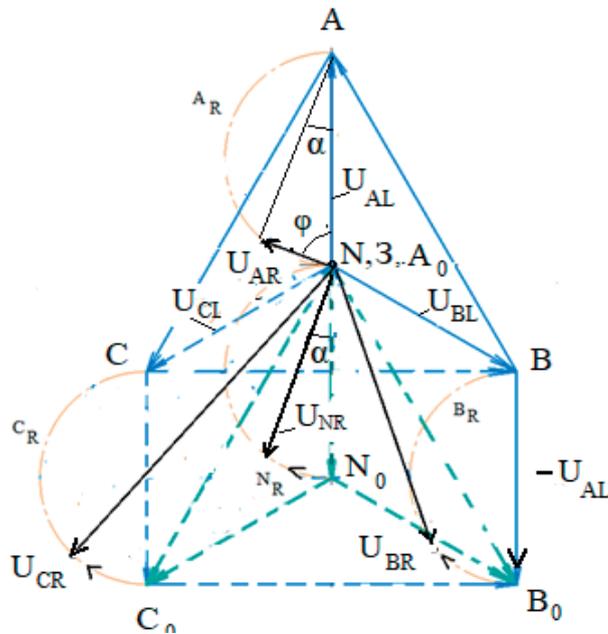
статьи — исследовать и разработать признаки поврежденной фазы в сетях с изолированной нейтралью при ОЗЗ через переходное сопротивление.

### Метод исследования

Для исследования признаков поврежденной фазы в статье используется построение векторных диаграмм и графиков изменения фазных напряжений при изменении переходного сопротивления в месте повреждения.

В режиме нагрузки фазные напряжения трехфазной системы напряжений  $U_{AL}$ ,  $U_{BL}$  и  $U_{CL}$  образуют треугольник напряжений  $A$ ,  $B$ ,  $C$  (индекс  $L$  означает режим нагрузки «load»). Потенциалы земли  $Z$  и нейтрали  $N$  находятся в центре треугольника  $ABC$  (рисунок 1). При металлическом замыкании на землю фазы « $A$ » вершины треугольника линейных напряжений  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и потенциал нейтрали  $N$  относительно земли смещаются на величину предаварийного напряжения поврежденной фазы  $U_{AL}$ , взятого с обратным знаком. Вершины треугольника линейных напряжений и положение нейтрали при металлическом замыкании обозначены  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$  и  $N_0$ . Треугольник линейных напряжений при замыкании на землю не изменяется. Напряжение поврежденной фазы относительно земли снижается до нуля, при этом точки  $Z$  (земля) и  $A_0$  на рисунке 1,  $a$  совпадают. Напряжения неповрежденных фаз относительно земли увеличиваются в корень из трех раз.

При замыкании через переходное сопротивление вершины треугольника линейных напряжений и потенциал нейтрали располагаются на окружностях  $A_R$ ,  $B_R$ ,  $C_R$ ,  $N_R$  и при увеличении переходного сопротивления перемещаются от точек  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$  и  $N_0$  по окружностям  $A_R$ ,  $B_R$ ,  $C_R$ ,  $N_R$  в направлении, указанном стрелками. Потенциал земли (точка  $Z$ ) при таком построении векторных диаграмм напряжений остается неизменным.



**Рисунок 1.** Векторные диаграммы напряжений в нормальном режиме ( $U_{AL} = U_{BL} = U_{CL}$ ) и при замыкании через переходное сопротивление ( $U_{AR}$ ,  $U_{BR}$ ,  $U_{CR}$  и  $U_{NR}$ )

**Figure 1.** Vector diagrams of voltages in normal mode ( $U_{AL} = U_{BL} = U_{CL}$ ) and when closed through a transient resistance ( $U_{AR}$ ,  $U_{BR}$ ,  $U_{CR}$  and  $U_{NR}$ )

Уравнения фазных напряжений в функции переходного сопротивления содержат параметры электрической сети, что усложняет анализ [22]. Поэтому введем новую переменную — угол  $\alpha$ , на который вектор напряжения нейтрали  $U_{NR}$  при замыкании, взятый с обратным знаком, отстает от вектора напряжения поврежденной фазы  $U_{AL}$  в предаварийном режиме (индекс  $R$  означает замыкание через переходное сопротивление). Использование угла  $\alpha$  упрощает исследование влияния переходного сопротивления и делает анализ более общим и наглядным.

При симметрии фазных напряжений в предаварийном режиме для фазных напряжений  $U_{AR}$ ,  $U_{BR}$  и  $U_{CR}$  и напряжения нейтрали  $U_{NR}$  из векторной диаграммы на рисунке 1 могут быть получены следующие уравнения в функции угла  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} U_{AR} &= U_{\phi L} \cdot \sin \alpha; \\ U_{BR} &= U_{\phi L} \cdot \sqrt{(\cos \alpha)^2 + 1 - 2 \cos \alpha \cdot \cos(120^\circ - \alpha)}; \\ U_{CR} &= U_{\phi L} \cdot \sqrt{(\cos \alpha)^2 + 1 - 2 \cos \alpha \cdot \cos(120^\circ + \alpha)}; \\ U_{NR} &= U_{\phi L} \cdot \cos \alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_{\phi L}$  — модуль фазного напряжения в предаварийном режиме.

Уравнения (1) содержат только одну переменную — угол  $\alpha$ . Для конкретной электрической сети каждому значению угла  $\alpha$  может быть поставлено в соответствие переходное сопротивление. При изменении переходного сопротивления от нуля до бесконечно большого значения угол  $\alpha$  изменяется от нуля до  $90^\circ$ . Графики изменения фазных напряжений  $U_{AR}$ ,  $U_{BR}$ ,  $U_{CR}$  и  $U_{NR}$  в относительных единицах в функции угла  $\alpha$ , построенные по выражениям (1), приведены на рисунке 2.

### Анализ графиков напряжений

Напряжение поврежденной фазы  $U_{AR}$  при увеличении переходного сопротивления (при увеличении угла  $\alpha$ ) непрерывно увеличивается и при угле  $\alpha = 60^\circ$  кривая напряжения  $U_{AR}$  пересекается с кривой напряжения неповрежденной фазы  $U_{BR}$ . В точке пересечения  $U_{AR} = 0,87 U_{\phi L}$ . Режим ОЗЗ при  $\alpha = 60^\circ$  является граничным режимом, отделяющим режимы, в которых напряжение поврежденной фазы «А»

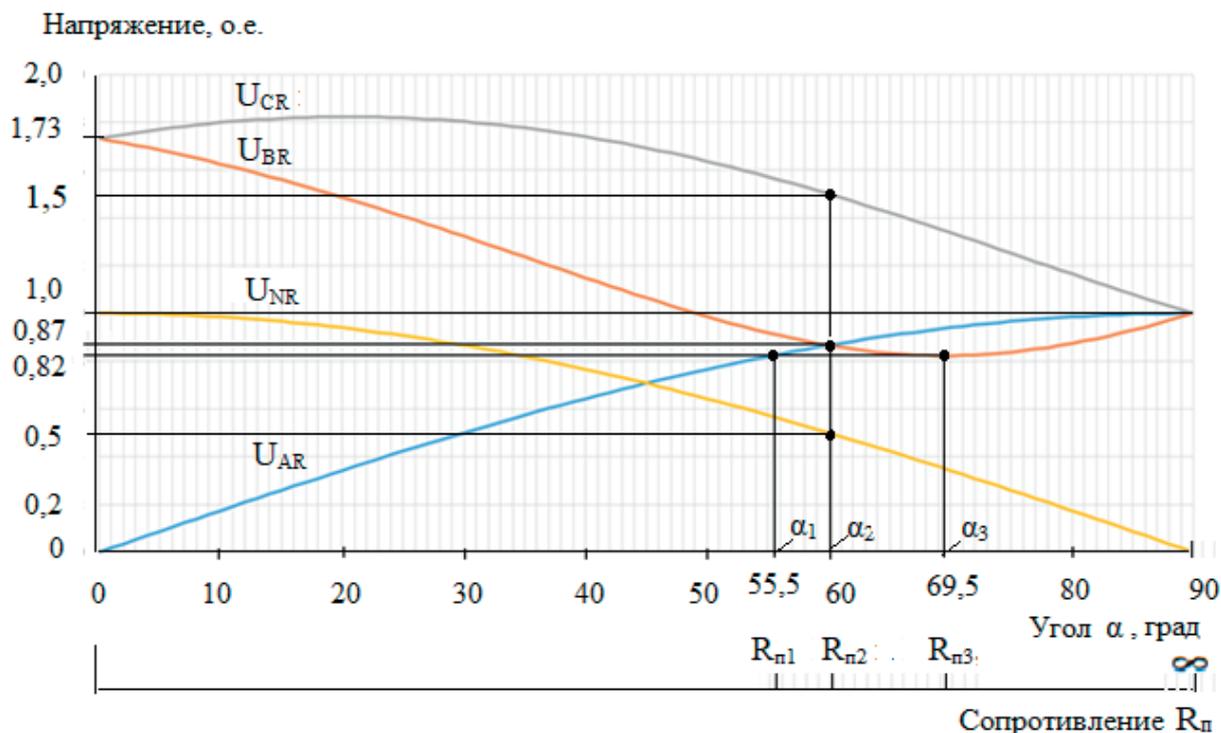


Рисунок 2. Графики изменения напряжений в функции переходного сопротивления

Figure 2. Graphs of voltage changes in the transient resistance function

является наименьшим, от режимов, где наименьшим является напряжение неповрежденной фазы «В». При угле  $\alpha = 55,5^\circ$  напряжение поврежденной фазы равно  $0,82U_{\phi L}$  и равно минимально возможному значению напряжения  $U_{BR}$  неповрежденной фазы В.

Напряжение нейтрали при увеличении переходного сопротивления непрерывно снижается, и в граничном режиме  $U_{NR} = 0,5U_{\phi L}$

Фазное напряжение опережающей неповрежденной фазы  $U_{CR}$  сначала увеличивается, достигает наибольшего значения и затем снижается до напряжения в предаварийном режиме, оставаясь при любом значении переходного сопротивления наибольшим из трех фазных напряжений. В граничном режиме  $U_{CR} = 1,5U_{\phi L}$ .

Фазное напряжение отстающей неповрежденной фазы  $U_{BR}$  с ростом переходного сопротивления сначала снижается и в граничном режиме при угле  $\alpha = 60^\circ$  становится равным напряжению поврежденной фазы  $U_{AR}$ . При угле  $\alpha = 69,5^\circ$  напряжение  $U_{BR}$  достигает минимально воз-

можного значения, равного  $0,82U_{\phi L}$ , и затем увеличивается до предаварийного значения.

Значения углов  $\alpha_1 = 55,5^\circ$ ,  $\alpha_2 = 60^\circ$  и  $\alpha_3 = 69,5^\circ$  не зависят от схемы и параметров электрической сети. Это делает результаты анализа напряжений в относительных единицах в функции угла  $\alpha$  применимыми к любой сети. Каждому из значений углов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  может быть поставлено в соответствие переходное сопротивление  $R_{n1}$ ,  $R_{n2}$  и  $R_{n3}$  соответственно, величина которых зависит от параметров сети. Значение переходного сопротивления можно оценить по выражению:

$$R_{II} = \frac{U_{AR}}{I_3},$$

где  $I_3$  — ток в месте замыкания, найденный с учетом переходного сопротивления.

Для сети 10 кВ значения граничного сопротивления  $R_{n2}$  при  $U_{AR} = 0,87$  для токов замыкания до 20 А приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Значения переходных сопротивлений  $R_{n1}$  и  $R_{n2}$ **Table 1.** Values of transient resistances  $R_{n1}$  and  $R_{n2}$ 

Ток ОЗЗ, А	1	5	10	15	20
$R_{n2}$ при $\alpha_2 = 60^\circ$ , Ом	5220	1044	522	348	261

Чем меньше ток замыкания на землю, тем больше значение переходного сопротивления  $R_{n2}$  в граничном режиме.

### Результаты анализа графиков напряжений

Из графиков на рисунке 2 следует, что при переходных сопротивлениях от нуля до граничного значения  $R_{n2}$  наименьшим из трех фазных напряжений является напряжение поврежденной фазы, а при переходном сопротивлении больше значения  $R_{n2}$  наименьшим является напряжение отстающей неповрежденной фазы. При этом наименьшее значение фазного напряжения может быть признаком поврежденной фазы только в диапазоне переходных сопротивлений от нуля до  $R_{n2}$ . Из рисунка 2 видно, что признаком того, что переходное сопротивление меньше значения  $R_{n2}$ , может быть либо значение угла  $\alpha < 60^\circ$ , либо значение напряжения нейтрали  $U_{NR} > 0,5U_{\phi L}$ , либо значение наибольшего из фазных напряжений  $U_{CR} > 1,5U_{\phi L}$ .

При  $R_n > R_{n2}$  напряжение поврежденной фазы не является наименьшим и не может служить признаком поврежденной фазы.

Наименьшее значение фазного напряжения может быть признаком поврежденной фазы без оценки диапазона значений переходного сопротивления при условии, что наименьшее фазное напряжение меньше значения  $0,82U_{\phi L}$ . Это один из самых простых признаков поврежденной фазы. Недостаток такого признака — его нельзя использовать в случаях, когда переходное сопротивление превышает  $R_{n1}$ .

Фазное напряжение неповрежденной фазы, опережающей по отношению к поврежденной, при любом значении переходного сопротивления является наибольшим из трех фазных напряжений и может использоваться для формирования признаков поврежденной фазы. При этом поврежденной является фаза, отстающая от фазы с наибольшим фазным напряжением.

### Анализ векторных диаграмм

При анализе векторных диаграмм в качестве базовых векторов приняты вектор напряжения нейтрали и вектор наибольшего из фазных напряжений. При этом рассматриваются угловые соотношения между базовыми векторами и векторами фазных напряжений.

Из векторной диаграммы напряжений на рисунке 1 следует, что при любой величине переходного сопротивления напряжение поврежденной фазы  $U_{AR}$  отстает от напряжения смещения нейтрали  $U_{NR}$  на угол  $90^\circ$ :

$$\arg \frac{U_{NR}}{U_{AR}} = 90^\circ. \quad (2)$$

Напряжение отстающей неповрежденной фазы (фазы «В») опережает напряжение нейтрали на угол от  $30^\circ$  до  $150^\circ$ :

$$-150^\circ < \arg \frac{U_{NR}}{U_{BR}} < -30^\circ, \quad (3)$$

Напряжение опережающей неповрежденной фазы «С» может отставать от напряжения нейтрали или опережать его на угол не более  $30^\circ$ :

$$-30^\circ < \arg \frac{U_{NR}}{U_{CR}} < 30^\circ, \quad (4)$$

Из векторной диаграммы на рисунке 1 находим, что напряжение поврежденной

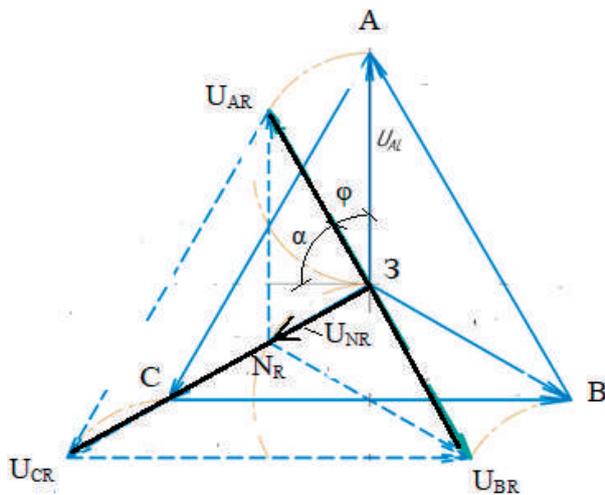
фазы всегда отстает от напряжения неповрежденной фазы с наибольшим из фазных напряжений (фаза «С») на угол от  $60^\circ$  до  $120^\circ$ . При этом при любой величине переходного сопротивлений для поврежденной фазы выполняется неравенство:

$$60^\circ < \arg \frac{U_{CR}}{U_{AR}} < 120^\circ, \quad (5)$$

в то время как вектор второй неповрежденной фазы (фаза «В») опережает вектор наибольшего фазного напряжения (фаза «С») на угол от  $60^\circ$  до  $120^\circ$ :

$$-120^\circ < \arg \frac{U_{CR}}{U_{BR}} < -60^\circ. \quad (6)$$

Важную роль при разработке признаков поврежденной фазы играет граничный режим. Векторная диаграмма напряжений в граничном режиме при переходном сопротивлении  $R_{n2}$  приведена на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Векторная диаграмма напряжений в граничном режиме

**Figure 3.** Vector diagram of voltages in the boundary mode

Из векторной диаграммы рисунка 3 следует, что в граничном режиме векторы напряжений  $U_{AR}$  и  $U_{BR}$  (поврежденной фазы «А» и отстающей неповрежденной фазы «В») противоположно направлены, а векторы наибольшего фазного напряже-

ния  $U_{CR}$  и напряжения смещения нейтрали  $U_{NR}$  совпадают по направлению. При этом выполняются равенства:

$$\arg \frac{U_{NR}}{U_{BR}} = -90^\circ; \arg \frac{U_{NR}}{U_{CR}} = 0. \quad (7)$$

Уравнения (7) совместно с уравнениями (3) и (4) могут использоваться для оценки значения переходного сопротивления. Так, если переходное сопротивление меньше граничного значения  $R_{n2}$ , то выполняются неравенства:

$$-90^\circ < \arg \frac{U_{NR}}{U_{BR}} < -30^\circ; 0 < \arg \frac{U_{NR}}{U_{CR}} < 30^\circ, \quad (8)$$

### Результаты анализа векторных диаграмм

Выражения (2)–(4) описывают границы угловых соотношений между вектором напряжения нейтрали и векторами фазных напряжений. Причем диапазоны углов в выражениях (2)–(4) не пересекаются. Значение  $90^\circ$ , входящее в выражение (2) для поврежденной фазы, не входит в диапазоны изменения аргументов в выражениях (3) и (4) для неповрежденных фаз. При этом можно сформулировать следующий признак поврежденной фазы: поврежденной является фаза, вектор напряжения которой отстает от вектора напряжения смещения нейтрали  $U_{NR}$  на угол  $90^\circ$ .

Если поврежденной является фаза «А», то признаком поврежденной фазы является выполнение равенства (2).

Выражения (5) и (6) описывают границы угловых соотношений между вектором напряжения с наибольшим фазным напряжением и векторами двух других фазных напряжений. Причем диапазоны углов в выражениях (5) и (6) не пересекаются. При этом можно сформулировать следующий признак поврежденной фазы: поврежденной является фаза, отстающая от фазы с наибольшим фазным напряжением.

Если поврежденной является фаза «А», то признаком поврежденной фазы является выполнение неравенства (5).

Оба признака поврежденной фазы, использующие угловые соотношения между напряжениями, справедливы при любой величине переходного сопротивления.

### Выводы

1. В зависимости от величины переходного сопротивления наименьшим из фазных напряжений при однофазных замыканиях на землю может быть либо напряжение поврежденной фазы, либо напряжение неповрежденной фазы, отстающей по отношению к поврежденной. При этом наименьшее значение фазного напряжения может быть признаком поврежденной фазы только в диапазоне

переходных сопротивлений от нуля до граничного значения  $R_{n2}$ .

2. Сформулированы признаки поврежденной фазы при ОЗЗ через переходное сопротивление, основанные на определении фазы с наименьшим фазным напряжением, и признаки поврежденной фазы, использующие угловые соотношения между напряжениями, без определения наименьшего из фазных напряжений.

3. Признаки поврежденной фазы, использующие угловые соотношения между напряжениями, справедливы при любой величине переходного сопротивления. В то время как признаки, основанные на определении фазы с наименьшим фазным напряжением, требуют косвенной оценки величины переходного сопротивления или действуют только в ограниченном диапазоне значений переходного сопротивления.

### Список источников

1. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.

2. Phadke A.G., Thorp J.S. Computer Relaying for Power Systems. 2nd ed. Research Studies Press Limited, 2009.

3. Фабрикант В.Л. Дистанционная защита. М.: Высшая школа, 1978. 215 с.

4. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer, 2010.

5. Izykowski J., Rosolowski E., Balcerek P., Fulczyk M., Saha M.M. Accurate Noniterative Fault Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. Vol. 25. No. 1. P. 72-80.

6. Abe M., Otsuzuki N., Emura T., Takeuchi M. Development of a New Fault Location System for Multi-Terminal Single Transmission Lines // IEEE Trans. Power Del. Jan., 1995. Vol. 10. No. 1. P. 159-168.

7. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при

замыканиях на землю. М.: Энергоатомиздат, 1985.

8. Фабрикант В.Л., Шабанов В.А., Шнейдер Я.А. Выбор уставок дистанционной защиты линий от коротких замыканий на землю // Электричество. 1978. № 2. С. 118-123.

9. Расковалов Ю.В., Федосов А.Н. О выборе уставок дистанционных реле-избирателей ОАПВ ВЛ // Электрические станции. 2004. № 4.

10. Пат. 1005237 СССР, Н 02 Н 3/34, 3/40, 3/24. Устройство для определения поврежденной фазы / Саухатас А.-С.С., Шабанов В.А., Шнейдер Я.А. 2901349, Заявл. 10.04.1980; Опубл. 15.03.1983. БИ № 10, 1983.

11. Лосев С.Б., Онучин В.А., Плотников В.Г. Фильтровый избирательный орган, реагирующий на соотношение аварийных значений симметричных составляющих // Известия вузов. Электромеханика. 1988. № 10. С. 57-64.

12. Любарский Д.Р., Мисриханов М.Ш., Саухатас А.С. Определение вида повреждения и поврежденных фаз // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 4. С. 1-3.

13. Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Маслов А.Н. Распознавание поврежденных фаз и определение места повреждения линии электропере-

дачи при одностороннем наблюдении // Электрические станции. 2022. № 4. С. 48–53. DOI: <http://dx/doi/org/10.34831/EP.2022.1089.4.008>.

14. Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н. Индивидуальная и групповая распознающая способность измерительных органов релейной защиты // Электрические станции. 2019. № 10. С. 30–35.

15. Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С. Особенности моделирования определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ // Промышленная энергетика. 2020. № 3. С. 33–40.

16. Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниятуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Вестник Чувашского университета. 2019. № 1. С. 39–46.

17. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1. Т. 17. С. 33–43.

18. Nuthalapati B., Sinha U.K. Location Detection of downed or Broken Power Line Fault Not Touching the Ground by Hybrid AD Method // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14 (2). P. 483–489.

19. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements // Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. May, 2006. P. 853–857.

20. Majid Dashtdar, Masoud Dashtda. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU) // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2019. Vol. 19 (2). P. 38–43. DOI: [10.1515/sbeef-2019-0019](https://doi.org/10.1515/sbeef-2019-0019).

21. Али Халеги, Махмуд Укати Садег, Махди Газизаде Ахсаи. Real Fault Location in a Distribution Network Using Smart Feeder Meter Data // IJECSE. 2018. No. 8(5). P. 2709–2720. DOI: [10.11591/ijecse.v8i5.pp2709-2720](https://doi.org/10.11591/ijecse.v8i5.pp2709-2720).

22. Шабанов В.А. Симметричные составляющие токов и напряжений при однофазных

замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью. Уфа: Изд-во УНИ, 2002. 60 с.

23. Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниятуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Вестник Чувашского университета. 2019. № 1. С. 39–46.

24. Алексеев Л.Л., Вуколов В.Ю., Кривоногов С.В., Пнев Е.Р. Определение вида повреждения распределительных электрических сетей 6–35 кВ сельскохозяйственного назначения на основе анализа осциллограмм аварийных событий // Вестник НГИЭИ. 2018. № 1(92). С. 30–49.

25. Сорокин А.В., Шабанов В.А. Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазных замыканиях в сети с изолированной нейтралью // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. № 2. Т. 21. С. 52–62.

## References

1. Arzhannikov E.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikhanov M.Sh. *Opređenje mesta korotkogo замыкания na vysokovol'tnykh liniyakh elektroperedachi* [Determining the Location of a Short Circuit on High-Voltage Power Transmission Lines]. Ed. by V.A. Shuin. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 272 p. [in Russian].

2. Phadke A.G., Thorp J.S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Research Studies. Press Limited, 2009.

3. Fabrikant V.L. *Dstantsionnaya zashchita* [Remote Protection]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 215 p. [in Russian].

4. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. *Fault Location on Power Networks*. London, Springer Publ., 2010.

5. Izykowski J., Rosolowski E., Balcerek P., Fulczyk M., Saha M.M. Accurate Noniterative Fault Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, Vol. 25, No. 1, pp. 72–80.

6. Abe M., Otsuzuki N., Emura T., Takeuchi M. Development of a New Fault Location System for Multi-Terminal Single Transmission Lines. *IEEE Trans. Power Del.*, Jan., 1995, Vol. 10, No. 1, pp. 159–168.

7. Arzhannikov E.A. *Dstantsionnyi printsip v releinoi zashchite i avtomatike linii pri замыкании*

*niyakh na zemlyu* [Remote Principle in Relay Protection and Automation of Lines with Earth Faults]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. [in Russian].

8. Fabrikant V.L., Shabanov V.A., Shneider Ya.A. Vybory ustavok distantsionnoi zashchity linii ot korotkikh замыканий na zemlyu [Selection of Settings for Remote Protection of Lines from Short Circuits to Earth]. *Elektrichestvo — Electricity*, 1978, No. 2. P. 118–123. [in Russian].

9. Raskovalov Yu.V., Fedosov A.N. O vybere ustavok distantsionnykh releizbiratelei OAPV VL [On the Choice of Settings of Remote Relay-Selectors of OAPV Overhead Lines]. *Elektricheskie stantsii — Electric Stations*, 2004, No. 4. [in Russian].

10. Saukhata A-S.S., Shabanov V.A., Shneider Ya.A. *Ustroistvo dlya opredeleniya povrezhdennoi fazy* [A Device for Determining the Damaged Phase]. Patent SSSR, No. 1005237, 1983. [in Russian].

11. Losev S.B., Onuchin V.A., Plotnikov V.G. Fil'trovyy izbiratel'nyi organ, reagiruyushchii na sootnoshenie avariinykh znachenii simmetrichnykh sostavlyayushchikh [Filter Electoral Body Reacting to the Ratio of Emergency Values of Symmetrical Components]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika — Izvestiya vuzov. Electromechanics*, 1988, No. 10, pp. 57–64. [in Russian].

12. Lyubarskii D.R., Misrikhanov M.Sh., Saukhata A.S. Opredelenie vida povrezhdeniya i povrezhdennykh faz [Determination of the Type of Damage and Damaged Phases]. *Vestnik IGEU — Bulletin of IGEU*, 2006, Issue 4, pp. 1–3. [in Russian].

13. Kochetov I.D., Lyamets Yu.Ya., Maslov A.N. Raspoznavanie povrezhdennykh faz i opredelenie mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi pri odnostoronnem nablyudenii [Recognition of Damaged Phases and Determination of the Location of Damage to the Power Line under Unilateral Observation]. *Elektricheskie stantsii — Power Technology and Engineering*, 2022, No. 4, pp. 48–53. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1089.4.008>. [in Russian].

14. Kochetov I.D., Lyamets Yu.Ya., Martynov M.V., Maslov A.N. Individual'naya i grupovaya raspoznavayushchaya sposobnost' izmeritel'nykh organov releinoi zashchity [Individual and Group Recognition Capability of Relay Protection Measurers]. *Elektricheskie stantsii —*

*Power Technology and Engineering*, 2019, No. 10, pp. 30–35. [in Russian].

15. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. Osobennosti modelirovaniya opredeleniya mest povrezhdeniya vozduzhnykh linii elektroperedachi napryazheniem 6(10) kV [Features of Modeling the Determination of Damage Sites of Overhead Power Transmission Lines with a Voltage of 6(10) kV]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Power Engineering*, 2020, No. 3, pp. 33–40. [in Russian].

16. Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R., Giniatul'in R.A. Issledovanie vliyaniya perekhodnogo soprotivleniya na opredelenie mesta odnofaznogo замыкания na zemlyu v raspredelitel'nykh setyakh s izolirovannoi neutral'yu [Investigation of the Effect of Transient Resistance on Determining the Location of a Single-Phase Earth Fault in Distribution Networks with an Isolated Neutral]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta — Bulletin of the Chuvash University*, 2019, No. 1, pp. 39–46. [in Russian].

17. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Algoritmy distantsionnogo opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo замыкания s ispol'zovaniem toka nulevoi posledovatel'nosti v kachestve opornogo toka [Algorithms for Remote Determination of the Distance to the Single-Phase Fault Location Using the Zero-Sequence Current as the Reference Current]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 1, Vol. 17, pp. 33–43. [in Russian].

18. Nuthalapati B., Sinha U.K. Location Detection of downed or Broken Power Line Fault Not Touching the Ground by Hybrid AD Method. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, Vol. 14 (2), pp. 483–489.

19. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. *Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. May, 2006, pp. 853–857.

20. Majid Dashtdar, Masoud Dashtda. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU). *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 2019, Vol. 19(2), pp. 38–43. DOI: 10.1515/sbeef-2019-0019.

21. Ali Khalegi, Makhmud Ukati Sadeg, Makhdi Gazizade Akhsai. Real Fault Location in a Distribution Network Using Smart Feeder Meter

Data. *IJECE*, 2018, No. 8(5), pp. 2709–2720. DOI: 10.11591/ijece.v8i5.pp2709-2720.

22. Shabanov V.A. *Simmetrichnye sostavlyayushchie tokov i napryazhenii pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu* [Symmetrical Components of Currents and Voltages at Single-Phase Earth Faults in Networks with an Isolated Neutral]. Ufa, Izd-vo UNI, 2002. 60 p. [in Russian].

23. Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R., Giniatullin R.A. Issledovanie vliyaniya perekhodnogo soprotivleniya na opredelenie mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'nykh setyakh s izolirovannoi neutral'yu [Investigation of the Influence of Transient Resistance on Determining the Location of a Single-Phase Earth Fault in Distribution Networks with an Isolated Neutral]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta — Bulletin of the Chuvash University*, 2019, No. 1, pp. 39–46. [in Russian].

24. Alekseev L.L., Vukolov V.Yu., Krivonogov S.V., Pnev E.R. Opredelenie vida povrezhdeniya raspredelitel'nykh elektricheskikh setei 6-35 kV sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya na osnove analiza ostsillogramm avariinykh sobytii [Determination of the Type of Damage to 6-35 kV Agricultural Distribution Networks Based on the Analysis of Emergency Event Waveforms]. *Vestnik NGIEI — Bulletin of the NGIEI*, 2018, No. 1(92), pp. 30–49. [in Russian].

25. Sorokin A.V., Shabanov V.A. Algoritm opredeleniya povrezhdennoi fazy pri odnofaznykh zamykaniyakh v seti s izolirovannoi neutral'yu [Algorithm for Determining the Damaged Phase during a Single-Phase Earth Fault in Networks with an Isolated Neutral]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2022, No. 2, Vol. 21, pp. 52–62. [in Russian].



**Ольга Николаевна Лопатеева**

**Olga N. Lopateeva**

кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия



**Ангелина Дмитриевна Юрова**

**Angelina D. Yurova**

магистрант кафедры информационно-управляющих систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

УДК 004.588

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-101-107

## РАЗРАБОТКА ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРИЕМУ И ПУСКУ ОЧИСТНЫХ УСТРОЙСТВ

### **Актуальность**

С активным развитием компьютерных технологий появилась возможность проектировать сложные технологические системы для подготовки и повышения квалификации специалистов в различных областях. В этих условиях во многих странах использование компьютерных тренажёров для обучения персонала в нефтегазовой отрасли фиксируется на законодательном уровне. В статье рассматриваются теоретические аспекты создания обучающей системы для подготовки работников, эффективность использования цифровых технологий обучения в нефтегазовой отрасли. Решается задача уменьшения риска возникновения аварийных ситуаций при освоении навыков работы с установкой пуска-приема очистных устройств за счет разработки обучающей системы.

### **Цель исследования**

Основной целью данной работы является уменьшение риска возникновения аварийных ситуаций при освоении навыков работы с установкой пуска-приема очистных устройств за счет разработки обучающей системы.

### **Методы исследования**

Методологической основой в данной статье являются методы математического моделирования.

### **Результаты**

Проанализированы обучающие системы для нефтегазовой отрасли. Спроектирована и разработана программная реализация обучающей системы. Была проанализирована возможность внедрения цифрового обучения в нефтегазовую отрасль, позволяющая работникам данной отрасли обучаться и практиковаться в своих навыках без риска для их здоровья.

**Ключевые слова:** обучающая система, 3D визуализация, обучение, тренажёры, устройство запуска и приема

# DEVELOPMENT OF A TRAINING SYSTEM FOR PERSONNEL IN THE LAUNCH AND RECEPTION OF CLEANING DEVICES

## Relevance

With the active development of computer technology, it became possible to design complex technological systems for training and advanced training of personnel in various fields. Under these conditions, in many countries, the use of computer simulators for training personnel in the oil and gas industry is fixed at the legislative level. The article discusses the theoretical aspects of creating a training system for personnel training, the effectiveness of using digital learning technologies in the oil and gas industry. The problem of reducing the risk of emergency situations when mastering work skills with the installation of launch and reception of cleaning devices is solved due to the development of a training system.

## Aim of research

The main aim of this work is to reduce the risk of accidents when mastering work skills with the installation of launch and reception of cleaning devices by development of a training system.

## Research methods

The methodological basis in this article are the methods of mathematical modeling.

## Results

The training systems for the oil and gas industry are analyzed. A software implementation of the training system has been designed and developed. The possibility of introducing digital learning into the oil and gas industry was analyzed, allowing personnel of this industry to learn and practice their skills without risk to their health.

**Keywords:** training system, 3D visualization, training, simulators, launch and reception device

## Введение

В настоящее время цифровая образовательная среда активно развивается. Цифровые технологии достигли статуса востребованных инструментов современного образовательного процесса. В сравнении со многими сферами, нефтегазовая отрасль выделяется сложными технологическими процессами, аварии на которых могут привести к необратимым финансовым и экологическим потерям. Для работы с подобными процессами требуются квалифицированные операторы, на которых ложится большая ответственность за последствия принятых решений.

Использование имитационных тренажёрных комплексов позволяет повысить профессиональный уровень персонала, получить необходимый практический опыт — отрабатывать базовые навыки работы с системой управления и навыки действий в аварийных ситуациях.

Таким образом, уменьшение риска возникновения аварийных ситуаций при освоении навыков работы с установкой пуска-приема очистных устройств с помощью обучающей системы является актуальной задачей на сегодняшний день.

В настоящее время за рубежом существует несколько современных тренажёрных платформ, разработанных и поддерживаемых основными мировыми производителями компьютерных тренажёрных комплексов.

Например, КСА DEUTAG является разработчиком тренажёра бурения DART компьютерной системы, позволяющей отрабатывать навыки бурения и различные инженерные сценарии в режиме реального времени с применением технологии внутрискважинного моделирования.

Тренажёр обеспечивает отработку практических навыков работы на буро-

вых установках, равно как и сценарии по оптимизации буровых работ.

В системе DART используется программное обеспечение, которое эффективно интегрирует и воспроизводит скважинные условия, таким образом практиковаться на тренажёре могут в безопасных условиях как новички, так и опытные специалисты, используя реальные проектные данные по скважинам.

Вторым существующим решением является учебный симулятор «Оператор котла ПТВМ-120». Он предназначен для формирования навыков безопасного, правильного и качественного выполнения технологического цикла нагрева воды котлом.

Однако большинство приведенных тренажеров имеют довольно загруженный интерфейс, из-за чего использование может вызвать неудобства, а также их стоимость довольно высока. К тому же у двух из трёх тренажёров большие габариты, и количество людей при использовании данных приложений ограничено. Вследствие этого можно сделать вывод о том, что программно-тренировочные системы имеют преимущество, так как локальны, занимают не много места и могут использоваться неограниченным количеством пользователей в одно и то же время.

## Методы разработки

Обучающие системы — это программные средства профессиональной подготовки, состоящие из электронных учебников и набора специализированных тренажёров [1]. Стандартный функционал обучающей системы, как правило, содержит два режима: обучение и экзамен.

Для реализации обучающей системы в нефтегазовой отрасли была выбрана установка «Устройство запуска и приема средств очистки и диагностики для нефтепровода». Устройство запуска состоит из шести элементов: камеры запуска, лотка, загрузочного устройства, комплекта площадок обслуживания, лебедки и поддона [2].

Модули тренировочного и экзаменационного режима содержат в себе одинаковые скрипты: поворот и перемещение объектов, перемещение пользователя, контроль времени и прохождения этапов, подсветка объектов [3, 4].

На рисунке 1 изображена схема модулей разрабатываемой системы.

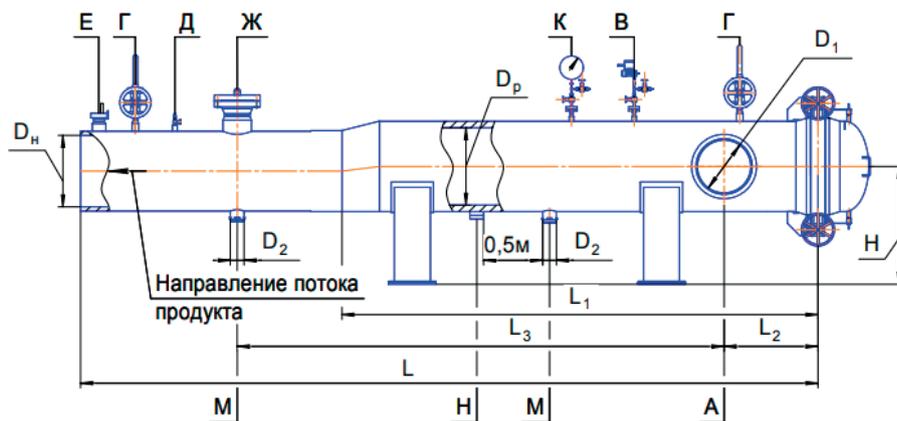
На рисунке 2 изображена камера запуска средств очистки.

Устройство приема состоит из четырех элементов: камеры приема, лотка, загрузочного устройства и поддона (рисунок 3).



Рисунок 1. Модули разрабатываемой системы

Figure 1. Modules of the system under development

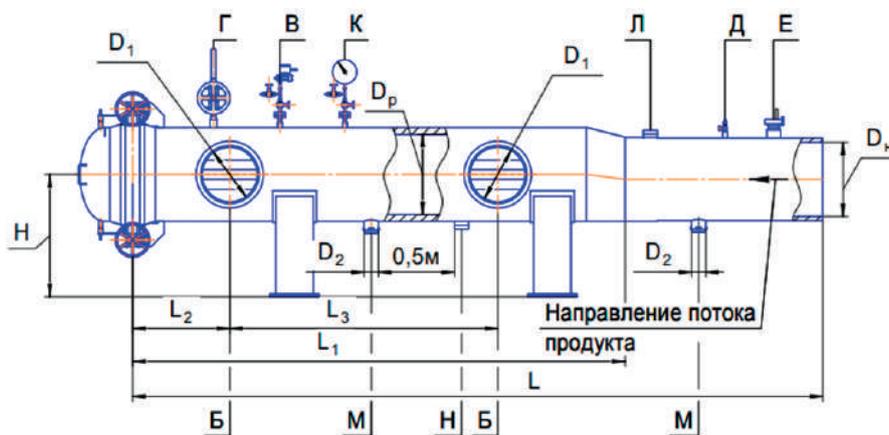


А — патрубок для подвода продукта; В — патрубок для датчика давления; Г — патрубки для присоединения трубопроводов газовой линии; Д — патрубок для подачи пара или инертного газа; Е — патрубок для установки сигнализатора рычажного; Ж — патрубок для установки запасочного устройства; К — патрубок для установки манометра; М — патрубки для присоединения дренажных трубопроводов; Н — датчик контроля герметичности

A — pipe for product supply; В — pipe for pressure sensor; Г — pipes for connecting pipelines of the gas-air line; Д — pipe for steam or inert gas supply; Е — pipe for installing a lever alarm; Ж — pipe for installing a storage device; К — pipe for installing a pressure gauge; М — pipes for connecting drainage pipelines; Н — leak control sensor

**Рисунок 2.** Камера запуска

**Figure 2.** Launch camera



Б — патрубки для отвода продукта; В — патрубок для установки датчика давления; Г — патрубок для присоединения трубопровода газовой линии; Д — патрубок для подачи пара или инертного газа; Е — патрубок для установки сигнализатора рычажного; К — патрубок для установки манометра; Л — сигнализатор прохождения средств очистки; М — патрубки для присоединения дренажных трубопроводов; Н — датчик контроля герметичности

Б — pipes for product discharge; В — pipe for installing a pressure sensor; Г — pipe for connecting a gas-airline pipeline; Д — pipe for supplying steam or inert gas; Е — pipe for installing a lever alarm; К — pipe for installing a pressure gauge; Л — signal for passing cleaning agents; М — pipes for connection of drainage pipelines; Н — leak control sensor

**Рисунок 3.** Устройство приема

**Figure 3.** Receiving device

Для разрабатываемого программного продукта было принято решение использовать межплатформенную среду для разработки компьютерных игр Unity, разработанную американской компанией Unity Technologies, которая соответствует требуемым критериям [5].

Редактор Unity имеет простой Drag&Drop интерфейс, который легко настраивать, состоит из различных окон, благодаря чему можно производить отладку игры прямо в редакторе. Движок используется для написания скриптов C#, Boo и модификации JavaScript, известной как UnityScript [6].

Для создания 3D моделей разрабатываемой обучающей системы было выбрано профессиональное программное обеспечение для 3D моделирования, анимации и визуализации при создании игр и проектировании — Autodesk 3ds Max [7].

Для разрабатываемой системы была выбрана диаграмма вариантов использования (рисунок 4). Унифицированный язык моделирования является графическим языком для визуализации, спецификации, конструирования и документирования систем [8, 9].



Рисунок 4. Модули разрабатываемой системы

Figure 4. Use case diagram

## Результаты

В ходе выполненной работы была спроектирована и разработана обучающая система для осуществления деятельности в нефтегазодобывающих предприятиях.

Система позволяет рассчитывать самую выгодную альтернативу, основываясь на определенной оценочной матрице альтернатив и критериев и определенных правилах выбора.

Программный продукт «SDIRC» служит для уменьшения риска возникновения аварийных ситуаций при освоении навыков работы с установкой пуска-приема очистных устройств. Продукт обладает простым и понятным интерфейсом, поэтому у пользователя не будет проблем в его освоении.

Запуск приложения возможен по щелчку на иконке самой программы, находящейся в специальном каталоге. После запуска приложения на экране отображается главное окно, с помощью которого можно управлять всеми функциями приложения (рисунок 5).

В окне «Инструкция» содержатся основные клавиши управления и алгоритм, состоящий из ста поочередных действий, которые необходимо строго соблюдать в двух режимах (тренировка, экзамен), чтобы пройти обучение и сдать экзамен.

Весь тренировочный процесс осуществляется от первого лица, что позволяет полностью погрузиться в выполняемую работу. Управление в обучающей системе осуществляется стандартными клавишами передвижения, как в играх.

В режиме тренировки пользователю будут представлены подсказки в виде текста с указанием действий и подсвечивания предметов, с которыми необходимо будет взаимодействовать на определенном этапе, что будет отсутствовать в режиме экзамена (рисунок 6).

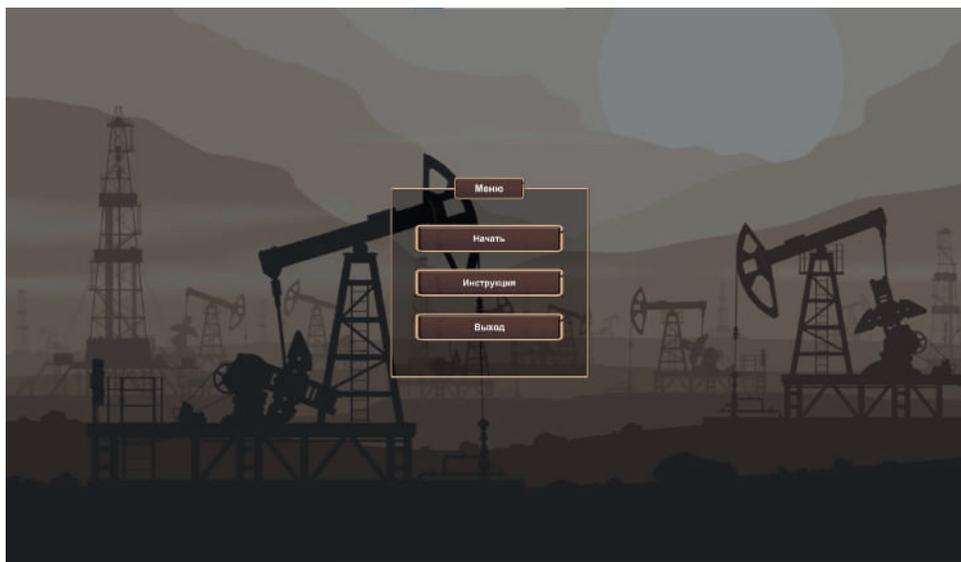


Рисунок 5. Главное меню обучающей системы

Figure 5. The main menu of the training system



Рисунок 6. Режим тренажера «Тренировка»

Figure 6. Simulator mode «Training»

В результате проведенной работы был разработан обучающий тренажер для уменьшения риска возникновения аварийных ситуаций при освоении навыков работы с установкой пуска-приема очистных устройств.

### Выводы

В результате выполнения данной работы была достигнута основная цель по разработке обучающей системы для уменьшения риска возникновения аварийных ситуаций при освоении навыков работы с установкой пуска-приема очист-

ных устройств при помощи использования программного средства по 3D визуализации платформы Unity, программного продукта Autodesk 3ds Max, редактора кода Visual Studio с использованием языка программирования C#.

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

- проанализированы обучающие системы для нефтегазовой отрасли;
- изучена установка «КПП СОД»;
- изучены чрезвычайные ситуации на установке «КПП СОД»;

- спроектирована обучающая система;
- разработана программная реализация обучающей системы.

Была проанализирована возможность внедрения цифрового обучения в нефтегазовую отрасль, позволяющая работни-

кам данной отрасли обучаться и практиковаться в своих навыках без риска для их здоровья.

В будущем планируется реализация данного продукта при помощи VR-технологий, а также добавление других установок нефтегазовой отрасли.

#### Список источников

1. Хачатурова С.С. Обучающие системы в образовании // Международный журнал экспериментального образования. 2017. № 3-2. С. 188–189.
2. Технологические процессы на камере пуска и приема средств очистки и диагностики. М., 2002. URL: <https://clck.ru/32BrEG> (дата обращения: 03.06.2022).
3. Мухаметгалиев Р.Д. Разработка программы-тренажера для наклонно-направленного бурения // Молодой ученый. 2020. № 27 (317). С. 4–7.
4. Осипова В.А. Повышение эффективности обучения операторов технологических процессов на базе компьютерных тренажеров // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 3 (11). С. 106–114.
5. Mike G. Unity Game Development in 24 Hours. Sams, 2018. 464 p.
6. Matt A.W. Object-Oriented Thought Process. Addison-Wesley, 2018. 347 p.
7. Все о программе 3Ds Max. М., 2022. URL: <https://clck.ru/rWT9A> (дата обращения: 07.06.2022).
8. Визуальное моделирование и UML. М., 2020. URL: <https://Studopedia.net> (дата обращения: 05.06.2022).
9. Stephen J.M., Marc J.B., Ivar Jacobson. Executable UML: A Foundation for Model-Driven Architecture. Addison-Wesley, 2022. 402 p.

#### References

1. Khachaturova S.S. Obuchayushchie sistemy v obrazovanii [Learning Systems in Education]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya — International*

*Journal of Experimental Education*, 2017, No. 3-2, pp. 188–189. [in Russian].

2. *Tekhnologicheskie protsessy na kamere puskа i priema sredstv ochistki i diagnostiki* [Technological Processes at The Start-Up and Reception Chamber of Cleaning and Diagnostic Tools]. М., 2002. URL: <https://clck.ru/32BrEG> (accessed 03.06.2022). [in Russian].

3. Mukhametgaliev R.D. Razrabotka programmytrenazhera dlya naklonno-napravlennoгo bureniya [Development of a Simulator Program for Directional Drilling]. *Molodoi uchenyi — Young Scientist*, 2020, No. 27 (317), pp. 4–7. [in Russian].

4. Osipova V.A. Povyshenie effektivnosti obucheniya operatorov tekhnologicheskikh protsessov na baze komp'yuternykh trenazherov [Improving the Efficiency of Training Process Operators Based on Computer Simulators]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii — Systems. Methods. Technologies*, 2011, No. 3 (11), pp. 106–114. [in Russian].

5. Mike G. *Unity Game Development in 24 Hours*. Sams, 2018. 464 p.

6. Matt A.W. *Object-Oriented Thought Process*. Addison-Wesley, 2018. 347 p.

7. *Vse o programme 3Ds Max* [All about the 3Ds Max Program]. Moscow, 2022. URL: <https://clck.ru/rWT9A> (accessed 07.06.2022). [in Russian].

8. *Vizual'noe modelirovanie i UML* [Visual Modeling and UML]. Moscow, 2020. URL: <https://Studopedia.net> (accessed 05.06.2022). [in Russian].

9. Stephen J.M., Marc J.B., Ivar Jacobson. *Executable UML: A Foundation for Model-Driven Architecture*. Addison-Wesley, 2022. 402 p.

**Богдан Алексеевич Соловьев****Bogdan A. Solov'ev***магистрант кафедры**«Электротехника и электрооборудование предприятий»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия***Гиорги Кахаберович Гамисония****Giorgi K. Gamisonia***магистрант Уфимской высшей школы экономики и управления,**Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия*

УДК 620.92, 620.93, 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-108-120

## МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ВЕТРА ДЛЯ ШЕЛЬФОВЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

### Актуальность

Прогноз энергии ветра позволяет оценить возможности производства ветряных электростанций в краткосрочной перспективе. Под производством часто понимается доступная мощность рассматриваемой ветряной электростанции. К примеру, на сегодняшний день установленная мощность ветра в России достигала 20 ГВт. Операторы, занимающиеся непосредственно передачей электроэнергии, пользуются существующими инструментами для прогнозирования производства ветра на срок до 48 ч. Инструменты прогнозирования помогают оптимизировать управление энергосистемой. В данной статье рассматриваются актуальные способы прогнозирования в области ветровой энергетики, оцениваются их эффективность и ценность для наиболее эффективного контроля ветровой энергетики. Особое внимание уделяется текущим разработкам моделей прогнозирования ветровой энергии для шельфовых ветроэлектростанций.

### Цель исследования

Провести сравнительный анализ существующих способов прогнозирования в области ветровой энергетики при общих заданных условиях, выбрать оптимальный для конкретного случая способ.

### Методы исследования

Для решения поставленной задачи авторы провели сравнительный анализ ныне существующих способов прогнозирования ветровых электростанций, сравнивая их применимость со спецификацией области использования.

### Результаты

В ходе исследования проанализированы современные инструменты прогнозирования энергии ветра, проведён сравнительный анализ, сделаны выводы о применимости каждого из способов.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, краткосрочное прогнозирование, шельф, оптимизация, эффективность, модель, инструмент, управление, математическая модель, уровень ошибки прогноза

# WIND POWER PREDICTION METHODS FOR SHELF WIND POWER PLANTS

## Relevance

Wind energy forecasting is an opportunity to evaluate the production possibilities of a wind farm in the short term. Production often refers to the available capacity of the wind farm in question. For example, to date, the installed wind power in Russia has reached 20 GW. Direct transmission operators use existing tools to forecast wind production up to 48 hours. Forecasting tools help optimize power system management. This article discusses the abundance of relevant forecasting methods in the field of wind energy, evaluates their effectiveness and value for the most effective control of wind energy. Particular attention is paid to the ongoing development of wind energy forecasting models to meet the specifics of shelf.

## Aim of research

Conduct a comparative analysis of existing forecasting methods in the field of wind energy under general given conditions, choose the best method for a particular case.

## Research methods

To solve the problem, the authors conducted a comparative analysis of the popular, currently existing methods for forecasting wind farms, comparing their applicability with the specification of the area of use.

## Results

In the course of the study, modern wind energy forecasting tools were analyzed, a comparative analysis was carried out, and conclusions were drawn about the applicability of each of the methods.

**Keywords:** wind energy, short-term forecasting, shelf, optimization, efficiency, model, tool, control, mathematical model, forecast error level

## Введение

Способность эффективно управлять интеграцией ветра в энергосистему зависит, в первую очередь, от предсказуемости, а не от изменчивости ветрогенерации. Прогнозирование ветроэнергетики в настоящее время признано экономически эффективным решением, способным предоставить адекватную информацию о производстве ветряных электростанций в период от нескольких часов до нескольких дней. Повышение ценности ветрогенерации за счет улучшения систем прогнозирования является одним из приоритетов в исследованиях ветроэнергетики на ближайшие годы.

Прогнозы могут быть использованы по следующим направлениям.

- *Оптимизация управления энергосистемой* с помощью таких функций, как экономическая диспетчеризация, блокирование, динамическая оценка безопасности, распределение резервов, обмен

электроэнергией с соседними системами, планирование гидроаккумулирования и т.д. Горизонт прогнозирования зависит от размера энергосистемы. Для взаимосвязанных систем или для больших изолированных систем с «медленными» агрегатами (например паровыми турбинами) это обычно составляет от 48 до 72 ч. Для небольших автономных систем, включающих только быстродействующие агрегаты, такие, как дизель-генераторы или газовые турбины, горизонт может составлять порядка 3–6 ч. В настоящее время существует лишь несколько онлайн-приложений этого типа, главным образом в островных системах. Проектом, содержащим инструменты для изолированных систем, является европейский проект MORE-CARE.

- *Оптимальная торговля ветровой продукцией на рынке электроэнергии.* Участники рынка должны предоставить свой график генерации на рассматриваемый

мый горизонт, а отклонения от этого графика влекут за собой штрафные санкции. Краткосрочные прогнозы ветра позволяют минимизировать эти штрафы. Временная шкала интереса определяется рыночными правилами, но горизонты обычно лежат в пределах 48 ч.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы дать обзор доступных методов прогнозирования и уровня их эффективности. Представлены также фактические исследования по адаптации существующих методологий прогнозирования к морским условиям, а также исследования, проводимые для лучшего понимания особенностей морских месторождений.

### Методы прогнозирования в области изучения ветроэнергетики

Прогнозирование в сфере ветроэнергетики строится на основе прогноза мощности ветра, сделанного в момент начала времени  $t$  для предсказания на время  $t + k$ , и представляет собой среднюю мощность  $\hat{p}_{t+k/t}$  ветровой электростанции [1]. Прогнозы делаются на горизонт  $T$ , указывающий общую продолжительность периода прогноза в будущем (обычно на 48 ч вперед). Временное разрешение прогнозов обозначается временным шагом  $k$ . Длина временного шага (количество минут) связана с длиной горизонта. Обычно для горизонта порядка 24–48 ч шаг по времени часовой. Внутришаговые (т.е. внутрисуточные) изменения мощности и их влияние не учитываются, поскольку численные прогнозы погоды (ЧПП) скорости ветра, которые часто используются в качестве входных данных, задаются как постоянные значения для рассматриваемого шага (т.е. на следующий час). Стоит обратить внимание, что для очень коротких горизонтов ( $< 4-6$  ч) модели временных рядов, основанные только на оперативных производственных данных, способны давать прогнозы с временным разрешением 10–15 мин.

На практике значение измеренной мощности  $p_t$  получается путем усреднения измерения с более высоким разрешением (т.е. каждые 1 мин, 10 мин и т.д.), которые могут быть мгновенными значениями мощности или энергии в зависимости от системы сбора данных.

Ошибка предсказания определяется как:

$$e_{t+k/t} \equiv p_{t+k} - \hat{p}_{t+k/t}. \quad (1)$$

Часто бывает удобно ввести нормализованную ошибку прогноза:

$$\epsilon_{t+k/t} \equiv \frac{1}{P_n} (p_{t+k} - \hat{p}_{t+k/t}), \quad (2)$$

где  $P_n$  — установленная мощность ветропарка.

Нормализация позволяет сравнивать ошибки прогнозирования, связанные с ветряными электростанциями различной установленной мощности. Следует отметить, что уравнение (1) дает формальное определение ошибки в теории анализа временных рядов, где положительная ошибка означает недооценку мощности, а отрицательная ошибка означает завышение прогноза.

### Эталонные модели

Оперативное использование передового инструмента для прогнозирования ветра имеет смысл только в том случае, если он может превзойти методы, основанные на простых соображениях, без специального моделирования. Такие простые методы используются в качестве эталона для оценки более сложных. Наиболее часто используемым эталонным предиктором является утверждение, что будущая выработка ветра будет такой же, как и последнее измеренное значение мощности, т.е.

$$\hat{p}_{t+k/t}^P = p_t. \quad (3)$$

В соответствии с приведенным выше определением ошибка для нулевого временного шага равна 0. Несмотря на свою кажущуюся простоту эту модель трудно превзойти для первого времени прогно-

зирования (до 4–6 ч). Это связано с масштабом изменений в атмосфере, которые происходят относительно медленно [2]. Системе низкого давления требуется около одного или трех дней, чтобы пересечь континент. Системы высокого давления могут быть еще более стационарными, но они не связаны с сильным ветром и поэтому не очень интересны для прогнозирования ветровой энергии.

Обобщение модели состоит в использовании среднего значения последних  $n$  измеренных значений:

$$\hat{p}_{t+k/t}^{M A, n} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i}. \quad (4)$$

Такие модели часто называют предикторами скользящего среднего. Асимптотически (при стремлении  $n$  к бесконечности) они стремятся к глобальному среднему:

$$\hat{p}^0 \left( t + \frac{k}{t} \right) = \bar{p}_t, \quad (5)$$

где  $p_t$  — среднее значение всех доступных наблюдений энергии ветра в момент времени  $t$ .

Уравнение (5) определяет климатологическую среднюю, оно также может рассматриваться как эталонная модель, но поскольку она не является динамической, ее эффективность может быть очень низкой для начальных горизонтов прогнозирования. Тем не менее, для дальнейшего прогнозирования на более длинные горизонты модель демонстрирует лучшую эффективность.

### Основные подходы

В качестве основных подходов к прогнозированию ветроэнергетики выделяют те, которые включают в себя численные прогнозы погоды (ЧПП) и измерения в качестве входных данных. Это единственные подходы, способные обеспечить приемлемую точность в течение следующих 24–48 ч. В качестве альтернативы могут быть построены модели, получающие в качестве входных данных

только измерения (сила ветра, скорость и т.д.). Однако производительность таких моделей может быть приемлемой лишь до 3–6 ч вперед. Для более длинных горизонтов необходимо включение данных ЧПП. Включение измерений в качестве входных данных в основные подходы вместе с ЧПП способствует их хорошей работе в первом интервале горизонта прогнозирования (0–6 ч).

### Физический подход

Основные входные данные для физической модели:

— *динамическая информация*: численные прогнозы погоды на ближайшие часы, предоставляемые метеорологической службой;

— *статическая информация*: описание установки ветряной электростанции (количество турбин, кривая мощности и т.д.); описание местности, неровности, расположение ветряных турбин и препятствия.

Система ЧПП (метеорологическая служба) обычно предоставляет прогнозы скорости ветра для сетки окружающих точек вокруг ветровой электростанции. В зависимости от типа системы ЧПП эти прогнозы даются с пространственным разрешением в несколько километров, обычно 10–15 км. Целью первого шага моделирования для конкретной площадки является интерполяция прогнозов скорости ветра (и других переменных, таких как направление) на уровень ветровой электростанции. В качестве первого шага необходимо решить, какой уровень ЧПП является наиболее эффективным. Для дальнейшего запуска модели необходимо иметь подробное описание местности, окружающей ветровую электростанцию. Обычно требуется информация о планировке ветряной электростанции, неровностях, препятствиях и орографии. Сбор этой информации требует больших затрат при реализации физических моделей.

Несмотря на то, что перед использованием таких моделей на рабочем уровне требуется дальнейшая работа по проверке и большая вычислительная мощность, считается, что такие модели могут значительно улучшить моделирование потока на площадках ветряных электростанций, особенно на сложном рельефе.

Наконец, в некоторых случаях ЧПП предоставляются непосредственно метеорологической службой на уровне ветряной электростанции в виде интерполированных значений. Однако если интерполяция основана на простых математических соотношениях, не учитывающих нелинейности из-за рельефа, могут быть внесены значительные ошибки. Использование кривой мощности производителя является самым простым подходом, хотя более новые исследования показали, что полезно оценивать кривую мощности на основе прогнозируемой скорости и направления ветра и измеряемой мощности [3]. Обычно преобразование скорости ветра в мощность достигается с помощью матрицы мощности ветровой электростанции. Следует подчеркнуть, что метод получения этой матрицы мощности имеет решающее значение, если этот этап не должен внести дополнительную неопределенность в прогнозы. На основе этих данных модель прогнозирует уровень мощности.

#### *Статистический подход*

Альтернативный основной подход к прогнозированию основан на чисто статистическом моделировании. Этапы моделирования конкретной площадки и кривой мощности заменяются уникальным этапом, который напрямую преобразует входные переменные (ЧПП, онлайн-данные) в мощность.

Статистические модели в их чистом виде пытаются найти взаимосвязь между множеством объясняющих переменных, включая ЧПП, и данными онлайн-изме-

рений (в основном мощность, но также скорость или направление ветра, если они доступны) обычно с использованием рекурсивных методов. Часто используются искусственные нейронные сети. Статистические модели также можно использовать для прогнозирования скорости ветра. Однако этим промежуточным этапом часто пренебрегают и разрабатывают уникальную модель, непосредственно направленную на прогноз мощности.

Ниже приводится упрощенный пример того, как может быть сформулирована статистическая модель. Модель использует ЧПП и измеренную выработку (если она доступна в режиме онлайн) для прогнозирования будущей выработки электроэнергии. Общая форма модели:

$$\hat{p}_{t+k/t} = f(p_t, \hat{u}_{t+\frac{k}{t}\text{чпп}}, \hat{\theta}_{t+\frac{k}{t}\text{чпп}}, \hat{x}_{t+\frac{k}{t}\text{чпп}}), \quad (6)$$

где  $\hat{p}_{t+k/t}$  — прогноз мощности на время  $t+k$ , сделанный во время  $t$ ;

$p_t$  — прошлые производственные показатели в момент времени  $t$ , также могут быть добавлены измеренные значения скорости ветра, направления и т.д.;

$\hat{u}_{t+\frac{k}{t}\text{чпп}}$  — прогноз скорости ветра ЧПП на время  $t+k$ , сделано в момент времени  $t_{\text{чпп}}$ ;

$\hat{\theta}_{t+\frac{k}{t}\text{чпп}}$  — прогноз направления ветра ЧПП для  $t+k$ , сделано в момент времени  $t_{\text{чпп}}$ ;

$\hat{x}_{t+\frac{k}{t}\text{чпп}}$  — обозначает другие доступные переменные ЧПП, прогнозируемые в момент времени  $t_{\text{чпп}}$  для времени  $t+k$ ,

Прогнозы на несколько шагов вперед можно генерировать либо путем разработки специальной модели для каждого горизонта, либо путем итеративного использования модели, т.е. чтобы произвести прогноз для  $t+2$ , прогноз  $\hat{p}_{t+k/t}$  для  $t+1$  возвращается в качестве входных данных для модели вместо наблюдаемой мощности.

### Комбинированный подход

В последнее время было разработано несколько подходов, основанных на сочетании различных моделей. Конечная цель состоит в том, чтобы извлечь выгоду из преимуществ каждой модели и получить глобальную оптимальную производительность для исследуемого горизонта. Типы комбинаций могут быть:

— сочетание физического и статистического подходов (например Zephyr [4] (рисунок 1));

— сочетание краткосрочных (0–6 ч) и среднесрочных (0–48 ч) моделей (например MORE-CARE (рисунок 2));

— сочетание альтернативных статистических моделей (например Sireolico [5] (рисунок 3)).

### Обзор инструментов прогнозирования, доступных в настоящее время

На рисунке 4 отображено географическое распространение применения энергии ветра, из чего можно сделать вывод о том, что на многих континентах используют энергию ветра, а, значит, существует потребность в ее прогнозировании.

Из таблицы 1 очевидна заметная доля ветроэнергетики в общем энергетическом

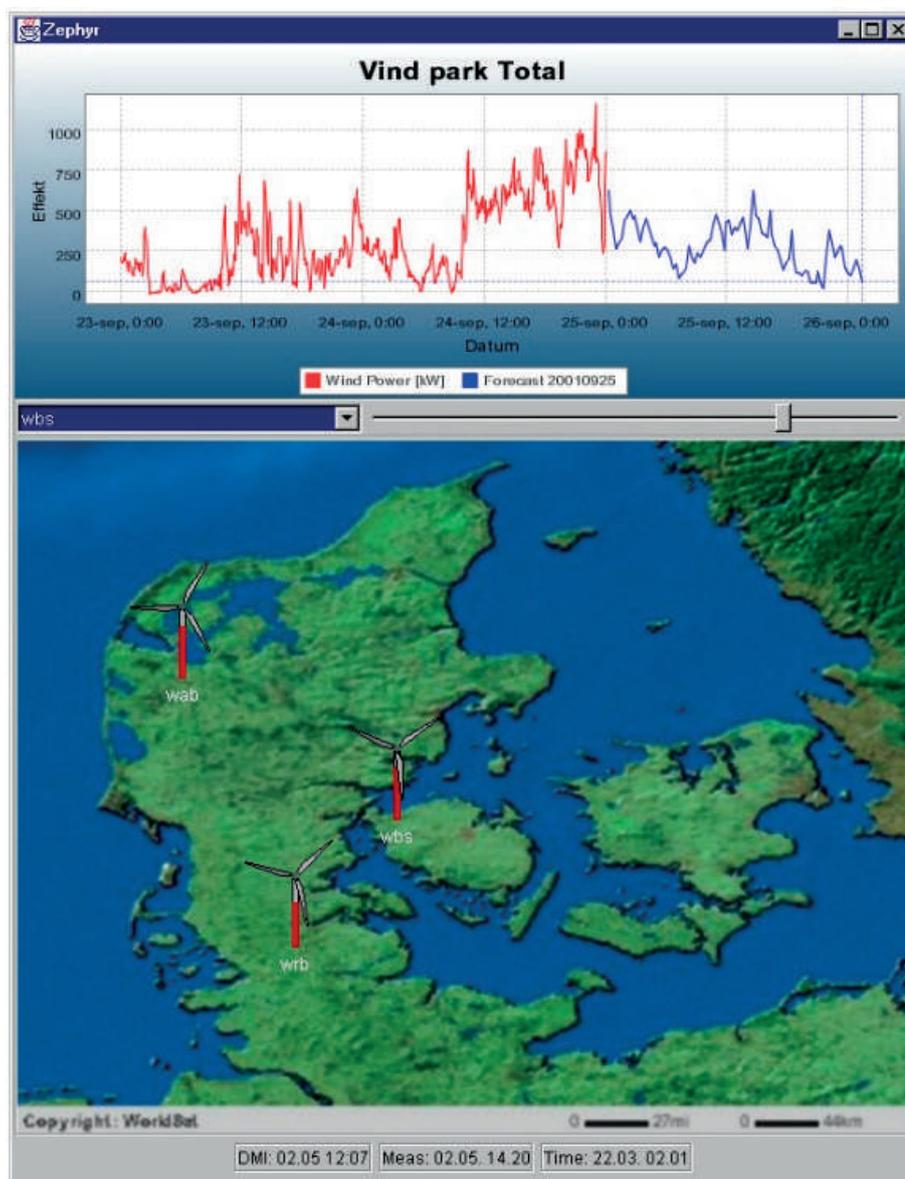


Рисунок 1. Пользовательский интерфейс программного пакет Zephyr

Figure 1. Zephyr user interface

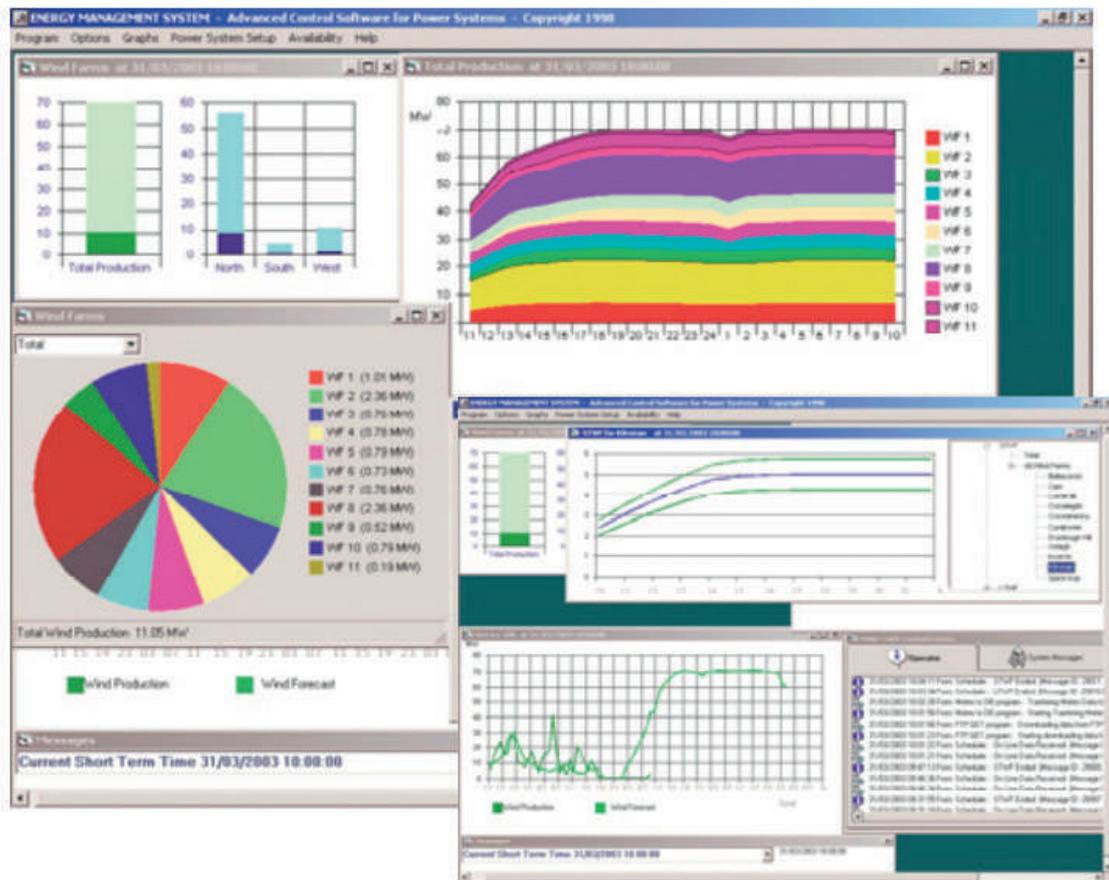


Рисунок 2. Прогнозирования мощности в ПО More-Care

Figure 2. User interface of the wind power prediction module of More-Care

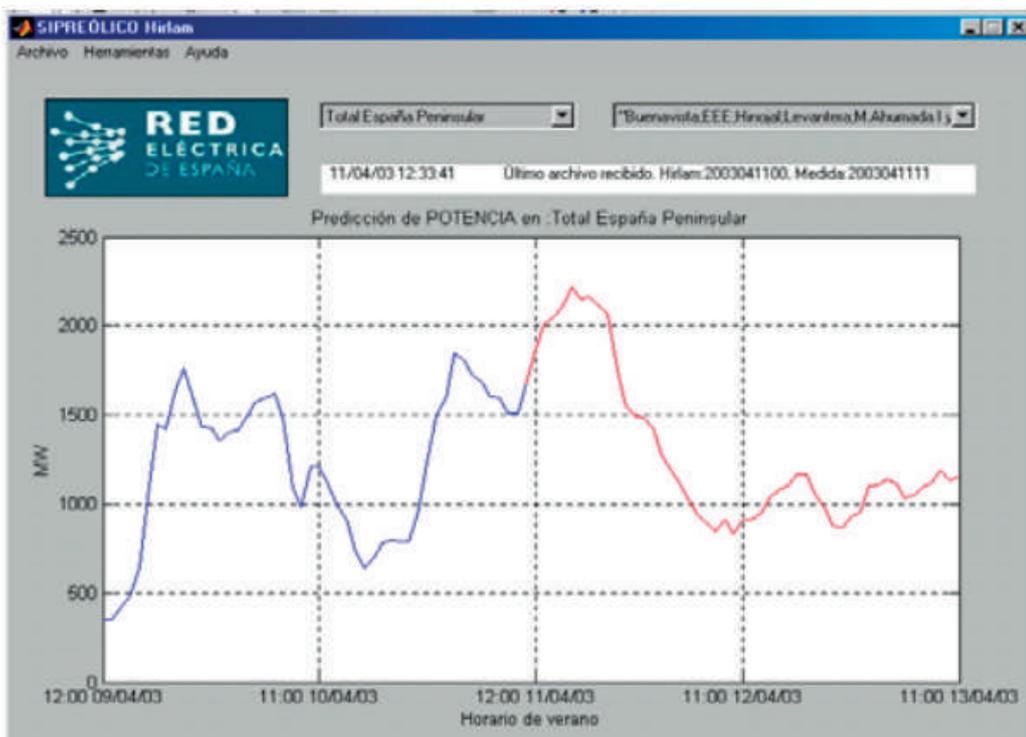
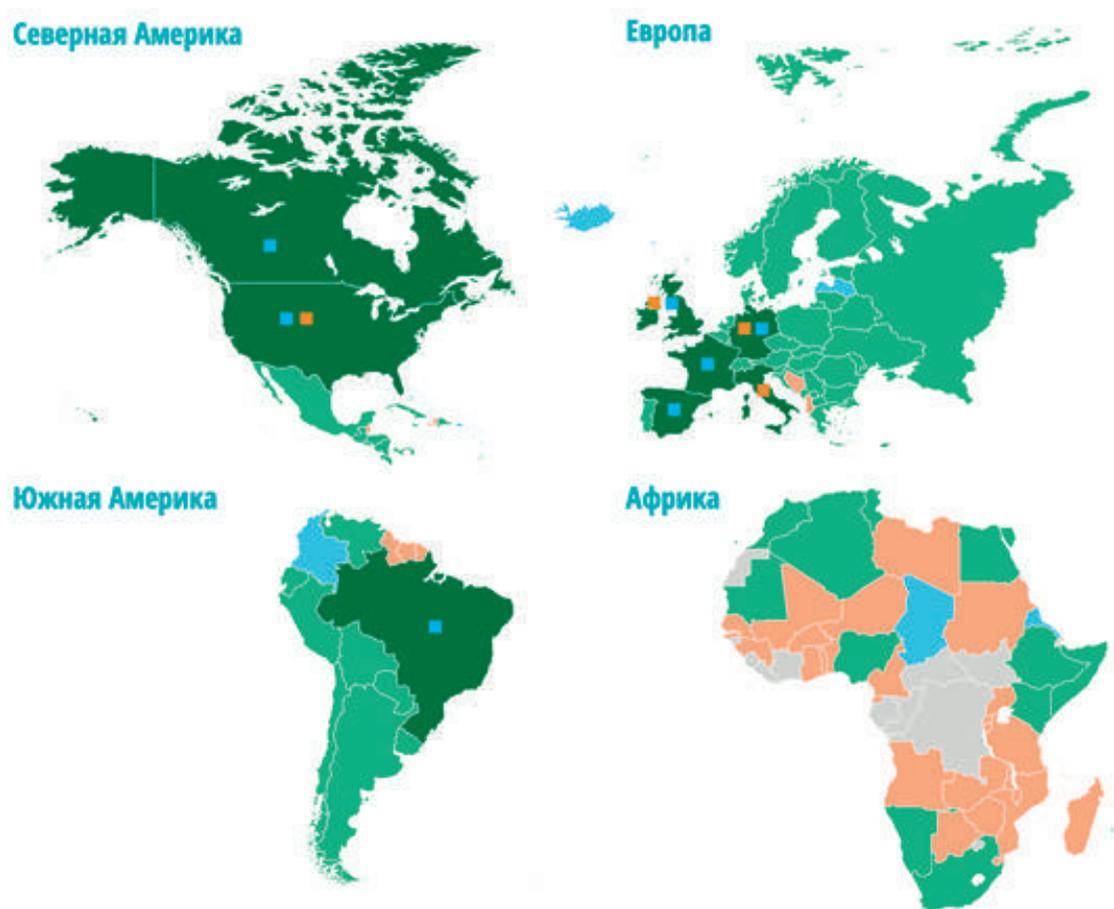


Рисунок 3. Прогнозирование выработки ветровой энергии на следующие 48 ч на основе предыдущих 48 ч

Figure 3. Forecasting wind power generation for the next 48 h based on the previous 48 h



**Рисунок 4.** Распределение возобновляемых источников энергии по миру

**Figure 4.** Distribution of renewable energy sources around the world

**Таблица 1.** Ресурсы возобновляемых источников энергии в мире и России

**Table 1.** Resources of renewable energy sources in the world and in Russia

Вид энергии	Теоретические ресурсы, млн, т.у.т.		Технические ресурсы, млн, т.у.т.	
	Мир	Россия	Мир	Россия
Энергия Солнца	$1,3 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^6$	$5,3 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^3$
Энергия ветра	$2,0 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^3$
Геотермальная энергия (до глубины 10 км)	$4,8 \cdot 10^9$	–	$1,7 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^2$
Энергия Мирового океана	$2,5 \cdot 10^5$	–	–	–
Энергия биомассы	$9,9 \cdot 10^4$	$10^4$	$9,5 \cdot 10^3$	53
Гидроэнергия	$5,0 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^2$

портфеле возобновляемых источников. В настоящее время существует множество моделей прогнозирования энергии ветра, причем как готовых коммерческих продуктов, так и исследовательских проектов.

Однако в эксплуатации находятся лишь несколько моделей. В приведенном ниже описании особое внимание уделяется операционным моделям. Уже в 1990 г. Ландберг разработал краткосрочную модель прогнозирования, основанную на

физических рассуждениях. Идея состоит в том, чтобы использовать скорость и направление ветра из NWP, затем преобразовать этот ветер в местный участок, использовать кривую мощности и, наконец, скорректировать это с помощью эффективности парка. Он обнаружил, что для сходимости MOS необходимы данные примерно за 4 мес. Ландберг использовал датскую версию: модель HIRLAM DMI в качестве входных данных NWP, модель WAsP от Risø для преобразования ветра в местные условия и модель Risø PARK для учета более низкого выхода в ветряной парк из-за волновых эффектов.

Существуют две общие возможности для преобразования ветра HIRLAM в местные условия: ветер может быть с одного из более высоких уровней в атмосфере и, следовательно, рассматривается как геострофический ветер, или ветер может быть предложением ЧПП для ветра, в 10 м над уровнем моря [6]. Обычно этот ветер не очень точно адаптируется к местным условиям, но будет довольно общим ветром со средней шероховатостью, характерной для области, смоделированной в точке сетки. Если используется ветер с верхнего уровня, то процедура следующая: по геострофическому ветру и местной шероховатости вычисляется скорость трения  $u^*$  по закону геострофического сопротивления. Затем это используется в логарифмическом профиле высоты опять же вместе с локальной шероховатостью.

Оценка места на предмет шероховатости выполняется в качестве входных данных для WAsP. Требуется либо роза шероховатостей, либо карта шероховатостей. Исходя из этого, WAsP определяет среднюю шероховатость на высоте ступицы. Это — шероховатость, используемая в законе геострофического сопротивления или логарифмическом профиле. Используется только одна поправочная матрица WAsP, что может быть недостаточно для

более крупной ветровой электростанции. В своей первоначальной работе Ландберг и Уотсон определили идеальным уровнем HIRLAM уровень моделирования 27, так как он дает наилучшие результаты. Однако DMI изменил операционную модель HIRLAM в июне 1998 г., и Joensen с соавторами обнаружил, что после изменения ветер на высоте 10 м был намного сильнее, чем ветер с более высоких уровней. После изменения проходящие штормовые системы также стали лучше предсказываться. Модель была протестирована в ESB (Совет по электроснабжению, Ирландия) и в Айове [7]. Prediktor также используется в универсальной системе SCADA (диспетчерское управление и сбор данных) CleverFarm для планирования технического обслуживания.

Инструмент прогнозирования ветровой энергии (ДИФ) был разработан Институтом информатики и математического моделирования (ИММ) Технического университета Дании. ДИФ работает в западной части Дании с 1994 г., а в восточной части — с 1999 г. [8]. Первоначально они использовали адаптивную рекурсивную оценку методом наименьших квадратов с экспоненциальным забыванием в многоступенчатой настройке для прогнозирования от 0,5 до 36 ч. Однако из-за недостаточного качества результатов для более высоких горизонтов прогнозирования оперативные прогнозы использовались только до 12 ч. В более поздней версии были добавлены прогнозы HIRLAM, что позволило расширить диапазон полезных прогнозов до 39 ч. Эта версия успешно эксплуатируется Elsam и другими датскими утилитами.

ДИФ подразумевает статистическое моделирование, а именно условные параметрические модели. Эти модели превосходят традиционные параметрические модели. Это — нелинейные модели, сформулированные как линейные, в кото-

рых параметры заменены гладкими, но в остальном неизвестными функциями одной или нескольких объясняющих переменных. Эти функции называются коэффициент-функциями.

Адаптивность параметров модели ко времени является важным свойством, которое модели прогнозирования ветровой энергии должны учитывать при изменении условий приложения, таких как изменения в окружающей среде или даже количество ветряных электростанций в рассматриваемой области, изменения в Модели ЧПП и т.д. Это вызвано такими эффектами, как старение ветряных турбин, изменения в окружающей растительности и, возможно, самое главное — изменениями в моделях ЧПП, используемых метеорологической службой, а также изменениями в популяции ветров [9].

ARMINES протестировала различные подходы к прогнозированию ветроэнергетики на основе ARMA, нейронных сетей различных типов (обратное распространение, RHONN и т.д.), нечетких нейронных сетей, вейвлет-сетей и т.д. В результате этой процедуры бенчмаркинга были найдены модели, основанные на нечетких нейронных сетях [10].

ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) оперативно работает с краткосрочным прогнозированием, используя модель DWD и нейронные сети с 2000 г. Он вышел из немецкой федеральной программы мониторинга WMEP (Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm), в рамках которой необходимо было детально отслеживать рост ветровой энергии в Германии [11]. Их первым заказчиком была компания E.On, которой изначально не хватало обзора текущего производства ветровой энергии, и поэтому она нуждалась в инструменте для прогнозирования текущей погоды. Тогда их модель называлась Advanced Wind Power Prediction Tool AWPT.

Эрнст и Рориг сообщили в Норчепинге о последних разработках системы управления ветровой энергией ISET WPMS. Сейчас они прогнозируют 95 % всей ветровой энергии в Германии.

eWind — модель компании TrueWind, Inc. Вместо того, чтобы использовать раз и навсегда параметризацию для локальных эффектов, как это делает подход Risø WAsP, они запускают численную модель погоды ForeWind как мезомасштабную модель, используя граничные условия из региональной модели погоды. Таким образом, фиксируется больше физических процессов, и прогноз может лучше адаптироваться к локальному сайту. В начальной конфигурации системы eWind они использовали модель MASS (мезомасштабная система моделирования атмосферы). В настоящее время используются дополнительные мезомасштабные модели: ForeWind, MM5, WRF, COAMPS, workstation-ETA и OMEGA. Горизонт их прогноза составляет 48 ч. Они опубликовали улучшение RMSE на 50 % по сравнению с Persistence в диапазоне 12–36 ч для 5 ветряных башен в Пенсильвании. Недавно они предложили новую методику, основанную на быстром цикле обновления, которая сможет ассимилировать большой объем входных метеорологических данных и данных дистанционного зондирования.

Сильный рост ветровой энергии в Испании побудил Red Eléctrica de España (Испанский TSO) использовать инструмент Sireólico, разработанный Университетом Карлоса III в Мадриде. Инструмент основан на испанских прогнозах HIRLAM с учетом почасовых данных SCADA от 80 % всех испанских ветряных турбин. Затем эти входные данные используются в адаптивных непараметрических статистических моделях вместе с различными моделями кривой мощности. Используется 9 различных моделей в зависимости от наличия данных: одна из них работает по аналогии с моде-

лями для очень краткосрочного прогнозирования, вообще не используя входные данные ЧПП; еще три всё чаще включают более высокие значения прогнозируемой скорости ветра; а ещё три также учитывают прогнозируемое направление ветра; последние две являются комбинацией других плюс непараметрический прогноз суточного цикла.

Эти 9 моделей рекурсивно оцениваются как с помощью алгоритма рекурсивных наименьших квадратов (RLS), так и с помощью фильтра Калмана (это приводит к 18 моделям). Для алгоритма RLS используется новый подход к определению коэффициента адаптивного забывания, основанный на связи между влиянием нового наблюдения с использованием расстояния Кука в качестве меры и вероятностью того, что параметры изменились. Результаты этих 18 моделей затем используются в комбинации прогнозов, где член ошибки основан на экспоненциально взвешенной среднеквадратичной ошибке прогноза с коэффициентом забывания, соответствующим 24-часовой памяти. Основной проблемой испанского случая является испанская модель HIRLAM в сочетании со сложным рельефом. Разрешение HIRLAM недостаточно высоко, чтобы разрешить течение во многих внутренних районах.

### **Текущие исследования по адаптации моделей к морским условиям**

Будущие основные разработки ветроэнергетических мощностей, скорее всего, будут происходить на шельфе. Более высокие и регулярные скорости ветра, а также возможность установки многочисленных и мощных (многомегаваттных) ветряных турбин являются основными преимуществами выхода на море для производства электроэнергии. Скорость ветра в классах выработки электроэнергии в морской среде более постоянна, чем на берегу. Затишья бывают реже и менее

продолжительны. Кроме того, оффшорной ветровой энергии может быть достаточно для удовлетворения местного спроса в таких странах, как Великобритания или Дания. Например, ветряная электростанция Horns Rev мощностью 160 МВт в Дании (эксплуатация с декабря 2002 г.) представляет собой первое техническое достижение такого рода крупномасштабных морских проектов. Только эта конкретная ветровая электростанция способна обеспечить до 2 % всего потребления электроэнергии в Дании. Несколько других примеров очень амбициозных шельфовых проектов находятся в стадии изучения или разработки в некоторых европейских странах.

Все современные модели прогнозирования изначально разрабатывались для наземных условий. В случае оффшорных месторождений необходимо учитывать особенности моделирования для адаптации физических моделей. Этот факт уже признан для проблемы оценки ресурсов. В связи с распространением ветряных турбин на большой площади необходимо изучать следовые эффекты и влияние побережья. Крупные кластеры морских ветряных электростанций можно моделировать с помощью стандартных моделей ветряных электростанций, но они, как правило, недооценивают расстояния восстановления ветровой энергии. Есть еще возможности для улучшения этих моделей.

Адаптация моделей физического прогнозирования не является простой задачей, поскольку для оценки ресурсов необходимо реальное понимание профилей скорости ветра в открытом море и характеристик ветра в целом. В северной части Европы мониторинг морского ветра в течение более 10 лет позволил получить более полное представление о характеристиках морского ветра. Исследования по моделированию морского ветра продолжаются и будут служить для адаптации моделей физического прогнозирования.

Статистические альтернативы, а точнее методы, основанные на искусственном интеллекте, не требуют очень точного знания морских условий для разработки подходящих моделей прогнозирования. Действительно, эти методы можно научить давать оценку выходной мощности ветряной электростанции для заданных метеорологических условий, что позволяет избежать всех промежуточных этапов физического моделирования. Подход, основанный на нечеткой нейронной сети, был адаптирован и оценен для оффшорной ветровой электростанции в Дании [12]. Результаты обнадеживают, разработаны первые конфигурации моделей, основанные на виртуальной кластеризации крупных морских ветровых электростанций.

### Выводы

Краткосрочное прогнозирование прошло долгий путь с момента его первых попыток. Первые модели появились в начале 90-х гг. прошлого века, но с тех пор в этой области появилось больше игроков, что привело к тому, что сегодня во всем мире доступно множество моделей. Хотя они используют различные подходы, их можно разделить на две категории: I — физическая, для которой учитываются характеристики местности для масштабирования прогнозируемой скорости ветра на уровне ветровой электростанции; II — статистическая, для которой разрабатываются и обучаются чисто математические модели для вычисления

выходной мощности на основе различных входных данных.

В настоящее время главной проблемой является точность современных моделей прогнозирования. Такой анализ производительности моделей проводится в рамках проекта ANEMOS, чтобы информировать конечных пользователей об уровне ошибки прогноза, который они могут ожидать в зависимости от характеристик площадки, рассматриваемого подхода к прогнозированию, используемых ЧПП и т.д.

Программное обеспечение для прогнозирования всегда зависит от места. Именно здесь опыт устанавливающих учреждений имеет наибольшее значение. При оценке систем прогнозирования необходимо учитывать их надежность в условиях эксплуатации и другие факторы.

Несмотря на появление на сегодняшний день множества подобных подходов, в ряде областей проводятся дальнейшие исследования.

Теперь, когда ожидается, что основные разработки в области ветроэнергетики будут происходить на шельфе, необходимо адаптировать существующие подходы к прогнозированию ветроэнергетики, также будет необходимо разработать новые методологии прогнозирования, особенно предназначенные для морских месторождений. Эти новые методологии будут учитывать особенности характеристик морских ветряных электростанций, а также большой размер и кластерный характер таких морских ветровых электростанций.

### Список источников

1. Thor S. E., Weis-Taylor P. Long-Term Research and Development Needs for Wind Energy for the Time Frame 2000–2020 // *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*. 2002. Vol. 5. No. 1. P. 73–75.

2. Hatzigryriou N. e.a. Preliminary Results from the More Advanced Control Advice Project for Secure Operation of Isolated Power Systems with Increased Renewable Energy Penetration and Storage // 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502). IEEE, 2001. Vol. 4. P. 6.

3. Cabezon D. e.a. Comparison of Methods for Power Curve Modeling // *CD-Rom Proceedings*

of the Global WindPower 2004 Conference. Chicago, Illinois, USA, 2004.

4. Giebel G. e.a. The Zephyr Project — The Next Generation Prediction System // Proceedings of the 2001 European Wind Energy Conference, EWEC. 2002. Vol. 1. P. 777–780.

5. Sánchez I. e.a. Sipleólico-a Wind Power Prediction System Based on Flexible Combination of Dynamic Models. Application to the Spanish Power System // Poster on the World Wind Energy Conference in Berlin, Germany. 2002.

6. Nielsen T.S. e.a. A New Reference for Wind Power Forecasting // Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology. 1998. Vol. 1. No. 1. P. 29–34.

7. Landberg L. A Mathematical Look at a Physical Power Prediction Model // Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology. 1998. Vol. 1. No. 1. P. 23–28.

8. Magnusson M., Wern L. PG1. 54 Wind Energy Predictions Using CFD and HIR-LAM Forecasts // EWEC-CONFERENCE. 2001. P. 861–863.

9. Martí I. e.a. Wind Power Prediction in Complex Terrain: from the Synoptic Scale to the Local Scale // CD-Rom Proceedings of the Conference: The Science of making Torque from Wind. Delft, The Netherlands, 2004. P. 19–21.

10. Kariniotakis G. e.a. What Performance Can Be Expected by Short-Term Wind Power Prediction Models Depending on Site Characteristics // CD-Rom Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC. 2004.

11. Madsen H. e.a. Standardizing the Performance Evaluation of Short-Term Wind Power Prediction Models // Wind Engineering. 2005. Vol. 29. No. 6. P. 475–489.

12. Giebel G. On the Benefits of Distributed Generation of Wind Energy in Europe. 2001.

## References

1. Thor S. E., Weis-Taylor P. Long-Term Research and Development Needs for Wind Energy for the Time Frame 2000–2020. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 2002, Vol. 5, No. 1, pp. 73–75.

2. Hatziargyriou N. e.a. Preliminary Results from the More Advanced Control Advice Project for Secure Operation of Isolated Power Systems with Increased Renewable Energy Penetration and Storage. *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502)*. IEEE, 2001, Vol. 4, pp. 6.

3. Cabezon D. e.a. Comparison of Methods for Power Curve Modeling. *CD-Rom Proceedings of the Global WindPower 2004 Conference*. Chicago, Illinois, USA, 2004.

4. Giebel G. e.a. The Zephyr Project — The Next Generation Prediction System. *Proceedings of the 2001 European Wind Energy Conference, EWEC*, 2002, Vol. 1, pp. 777–780.

5. Sánchez I. e.a. Sipleólico-a Wind Power Prediction System Based on Flexible Combination of Dynamic Models. Application to the Spanish Power System. *Poster on the World Wind Energy Conference in Berlin, Germany*. 2002.

6. Nielsen T.S. e.a. A New Reference for Wind Power Forecasting. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 1998, Vol. 1, No. 1, pp. 29–34.

7. Landberg L. A Mathematical Look at a Physical Power Prediction Model. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 1998, Vol. 1, No. 1, pp. 23–28.

8. Magnusson M., Wern L. PG1. 54 Wind Energy Predictions Using CFD and HIR-LAM Forecasts. *EWEC-CONFERENCE*, 2001, P. 861–863.

9. Martí I. e.a. Wind Power Prediction in Complex Terrain: from the Synoptic Scale to the Local Scale. *CD-Rom Proceedings of the Conference: The Science of making Torque from Wind*. Delft, The Netherlands, 2004, pp. 19–21.

10. Kariniotakis G. e.a. What Performance Can Be Expected by Short-Term Wind Power Prediction Models Depending on Site Characteristics. *CD-Rom Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC*. 2004.

11. Madsen H. e.a. Standardizing the Performance Evaluation of Short-Term Wind Power Prediction Models. *Wind Engineering*, 2005, Vol. 29, No. 6, pp. 475–489.

12. Giebel G. *On the Benefits of Distributed Generation of Wind Energy in Europe*. 2001.



**Рустам Нуриманович Хамитов**

**Rustam N. Khamitov**

доктор технических наук,  
профессор кафедры электрической техники,  
Омский государственный университет,  
Омск, Россия



**Павел Витальевич Зыкин**

**Pavel V. Zykin**

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



**Александр Савельевич Глазырин**

**Aleksandr S. Glazyrin**

доктор технических наук, профессор, отделение электроэнергетики  
и электротехники Инженерной школы энергетики,  
Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет, Томск, Россия

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-121-131

## СИНТЕЗ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧИ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### Актуальность

В рамках исследования при помощи программного пакета MATLAB разработана продольно-интегрально-дифференциальная система управления для привода продольной подачи токарного станка с числовым программным управлением (ЧПУ). Экспериментальные исследования показали эффективность системы управления, которая выражается в экономичном использовании ресурса синхронного электродвигателя. Экономичность ресурса достигается за счет возможности оптимизации и корректировки показателя скорости вращения электродвигателя на любом этапе реализации технологического процесса обработки детали.

### Цель исследования

Разработать параметрическую пропорционально-интегрально-дифференциальную (ПИД) систему управления электроприводом токарного станка с ЧПУ. Исследовать разработанную систему управления на устойчивость по нескольким критериям.

### Методы исследования

Для разработки системы управления применены методы компьютерного автоматизированного моделирования, в частности, использовался программный пакет MATLAB SIMULINK.

### Результаты

Разработана параметрическая пропорционально-интегрально-дифференциальная система управления продольной подачи токарного станка с ЧПУ. Стоит отметить, что в основе регулирования заложена эмпирическая зависимость шероховатости

обработанной поверхности детали от радиуса при вершине резца и подачи. Сам процесс регулирования начинается выполняться в функциональном блоке «PID». В его основе заложены математические зависимости применяемых коэффициентов (P – продольный; I – интегральный; D – дифференциальный). Установлено, что динамическое регулирование нечетких значений параметров электродвигателя обеспечивается за счет передаточной функции шарико-винтовой пары. Функции преобразовывающего устройства, крутящего момента выполняет редуктор. Стоит отметить, что система управления является настраиваемой, пользователь имеет возможность самостоятельно выставлять время, через которое блок PID дает отклик и выполняет функцию регулирования. В данном исследовании время отклика составляет 20 с с учетом работы блока транспортной задержки. В рамках подтверждения полученных результатов моделирования выполнены исследования устойчивости разработанной системы управления электродвигателем.

Показатель устойчивости проанализирован на основании трех основных критериев: Гурвица; Михайлова; Вышнеградского. Результаты расчетов по критерию Гурвица показали, что система управления электроприводом стабильна (устойчива), так как в результате выполненных вычислений получены положительные значения. При исследовании по показателю Михайлова получен соответствующий градограф, который показывает, что система управления устойчива, так как кривая, начинающаяся с действительной положительной полуоси (градограф), изгибается против часовой стрелки вокруг начала координат и проходит через три квадранта по очереди. Результаты расчетов по критерию Вышнеградского показали, что система управления соответствует неравенству  $a_1a_2 \geq a_2a_3$ , следовательно, можно сделать вывод, что система управления устойчива.

**Ключевые слова:** параметрическая пропорционально-интегрально-дифференциальная система управления, исследования на устойчивость, критерий Гурвица

## SYNTHESIS OF PROPORTIONAL-INTEGRAL-DIFERENTIAL CONTROL SYSTEM FOR LONGITUDINAL FEED OF CNC LATHE

### Relevance

As part of the study, the MATLAB software package has developed a longitudinal-integral-differential control system for driving the longitudinal supply of a CNC lathe. Experimental studies have shown the effectiveness of the control system, which is expressed in the economical use of the synchronous motor life. Resource efficiency is achieved due to the ability to optimize and adjust the speed of rotation of the electric motor at any stage in the implementation of the part processing process.

### Aim of research

The main aims of the research develop a parametric PID system for controlling the electric drive of a CNC lathe. Study the developed management system for stability according to several criteria.

### Research methods

To achieve computer-automated modeling, control system development methods were used. In particular, the MATLAB SIMULINK software package was used.

### Results

Parametric proportional-integral-trimming control system for longitudinal supply of CNC lathe has been developed. It is worth noting that the control is based on the empirical dependence of the roughness of the treated surface of the part on the radius at the tip of the cutter and feed. The self-control process begins in the PID function block. It is based on the mateamtic dependencies of the applied coefficients (P – longitudinal; I – integral; D – differential). It is found that dynamic control of fuzzy values of electric motor

parameters is provided due to transfer function of ball-screw pair. The functions of the converter, the torque motor, are performed by the gearbox. It is worth noting that the control system is customizable, the user has the ability to independently set the time after which the PID unit responds and performs the control function. In this study, the response time is 20 s, taking into account the operation of the transport delay unit. Stability studies of the developed electric motor control system were performed as part of confirmation of the obtained simulation results. The stability index was analyzed on the basis of three main criteria: Hurwitz; Mikhailov; Vyshnegradsky. The results of calculations according to the Hurwitz criterion showed that the electric drive control system is stable (stable), since positive values were obtained as a result of the calculations. In the Mikhailov study, the corresponding gradograph was obtained, which shows that the control system is stable, since the curve starting with the real positive semi-axis (gradograph) bends counterclockwise around the origin and passes through three quadrants in turn. The results of calculations according to the Vyshnegradsky criterion showed that the control system corresponds to inequality,  $a_1 a_2 \geq a_2 a_3$ , therefore, it can be concluded that the control system is stable.

**Keywords:** parametric proportional-integral-differential control system, resistance studies, Hurwitz criterion

## Введение

В современных условиях развития электроэнергетики как отрасли наблюдается тенденция применения регулирующих систем управления, наделенных параметрическим обеспечением. Высокие стандарты качества выпускаемых изделий вынуждают практически без ограничений внедрять в технологический процесс параметрические алгоритмы управления электроприводом. Такие изменения в структуре работы системы автоматического управления (САУ) позволяют вывести их на технологически новый уровень, не только повысив показатели точности и производительности электродвигателя, но и в целом расширить диапазон, в котором целесообразно их применение.

Параметрические САУ представляют собой системы, управление которыми происходит за счет изменения параметров элементов самой системы и соотношений между этими параметрами [1]. Параметризация способствует возможности при помощи заложенных в системе математических зависимостей подобрать оптимальные значения показателей электродвигателя, тем самым скорректировать его работу.

Однако стоит отметить, что параметрические системы управления в чистом виде, которые внедрены в процесс производства взамен регулятора адаптивной системы управления, в условиях повышения качества конечных продуктов производства и оптимизации основного времени технологического процесса обладают существенным недостатком.

Недостаток параметрического регулятора выражается в невозможности полноценно обеспечить устойчивость процесса управления синхронным электродвигателем, так как в процессе работы на электродвигатель оказывается внешнее воздействие в виде координатно-параметрических помех. Наличие подобных помех делает числовые параметры синхронного электродвигателя переменными.

Для разрешения выявленного недостатка [2] в качестве регулирующей системы в структуре электропривода применяют алгоритмический продольно-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.

Применение модели продольно-интегрально-дифференциальной системы управления [3] позволяет решить ключевую задачу, а именно существенно оптимизировать работу синхронного электро-

двигателя, обеспечить эффективное использование его ресурса на всех этапах эксплуатации.

На начальном этапе для функционирования модели требуется подобрать оптимальную функцию принадлежности для обеспечения эффективности и точности работы системы управления, в частности обеспечить, чтобы блок ПИД регулятора функционировал на всем диапазоне регулирования без застойных зон. Точное определение типа функции принадлежности, которая будет применяться, позволяет с математической точки зрения проанализировать все процессы функционирования системы управления, выявить возможные факторы, способные снизить ее эффективность.

Применительно к регулированию показателей продольной подачи токарного станка с ЧПУ целесообразно применить совместно используемые функции принадлежности [4]. В целом для решения выше поставленной задачи параметрическая система управления с ПИД регулятором должна обладать многокомпонентной структурой.

Для осуществления регулирования основных параметров продольной подачи электропривода необходимо задать значения требуемой шероховатости поверхности для того, чтобы система управления могла проанализировать полученные данные и подобрать оптимальный алгоритм регулирования. После чего важно разработать в структуре системы функциональный блок, позволяющий посредством передаточной функции автоматически рассчитывать оптимальные значения подачи токарного станка с ЧПУ.

Ключевым вопросом является разработка непосредственно самого ПИД регулятора. Функционирование обеспечивается за счет трех основных коэффициентов (пропорционального, интегрального и дифференциального) [5]. Алгоритмы функционирования ПИД регулятора на основе

коэффициентов является ключевым отличием от системы управления на нечеткой логике, представленной в статье [4].

Актуальным направлением исследования в процессе проектирования системы управления является обеспечение корректировки скорости вращения электродвигателя для оптимального использования его эксплуатационного ресурса, а также контроля качества поверхности обрабатываемой детали на всех этапах реализации технологического процесса. Для решения обеих выше представленных исследовательских задач следует выполнить синтез функциональных блоков, которые будут входить в структуру системы управления. Взаимоэффективная и цельная работа частей системы управления будет осуществляться за счет передаточных функций [6].

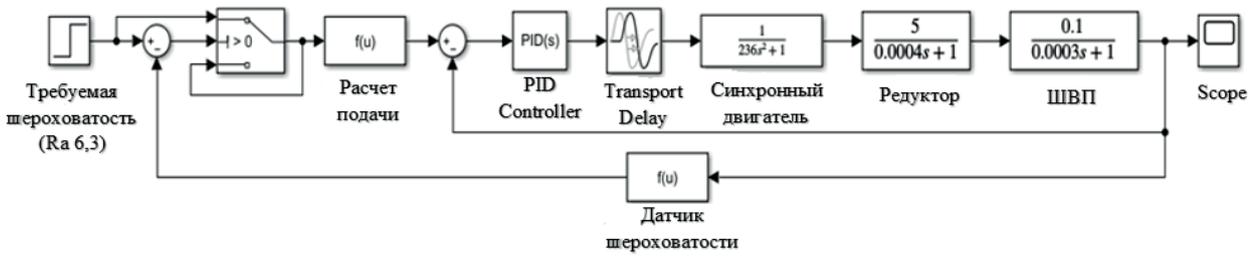
### **Синтез продольно-интегрально-дифференциальной системы управления**

Синхронные электродвигатели находят свое применение в структуре токарных станков с ЧПУ. Технологические операции часто носят динамический характер, поэтому на работу электродвигателя оказывают влияние различного рода помехи, следовательно, снижается его эффективность.

Для устранения выявленного недостатка предложен вариант применения модели системы управления продольной подачи токарного станка с ЧПУ [7, 8]. Система разработана при помощи программного пакета MATLAB [9].

Принципиальная схема параметрической системы управления продольной подачи станка с ЧПУ с ПИД регулятором представлена на рисунке 1.

Параметрическая система управления с PID регулятором функционирует следующим образом: на начальном этапе проектирования необходимо задать требуемые значения шероховатости обрабаты-



**Рисунок 1.** Принципиальная схема параметрической системы управления с PID регулятором

**Figure 1.** Schematic diagram of parametric control system with PID regulator

ваемых поверхностей детали. Система управления анализирует полученную информацию, после чего выполняет расчет величины скорости изменения показателя шероховатости при помощи универсальной математической зависимости:

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

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

$S$  — подача, мм/об;

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

Переходный график реакции на сигнал представлен на рисунке 2.

Исходя из графика (рисунок 2), можно отметить, что реакция на сигнал осуществляется через 0,1 с. За указанное время свои функции выполняет блок системы «Транспортная задержка».

На следующем этапе работы свои функции выполняет продольно-интегрально-дифференциальный регулятор.

В основе его работы лежат три составляющие:

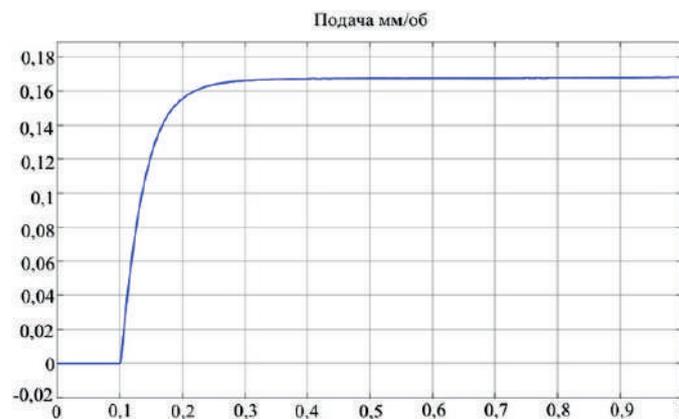
— *пропорциональная*: в рамках данного исследования для обеспечения шероховатости  $Ra$  6.3 оптимальное значение коэффициента  $P(t) = 62,9$ ;

— *интегральная*: для обеспечения регулирования расчетное значение коэффициента составляет  $I(t) = 0,78$ ;

— *дифференциальная*: для обеспечения регулирования расчетное значение коэффициента составляет  $D(t) = 1127,19$ .

Система управления продольной подачи с ПИД регулятором имеет возможность представить результат регулирования не только в виде расчетных формул, но и в графическом виде, как показано на рисунке 3.

Основываясь на результатах построения графика, можно сделать вывод, что показатель продольной подачи в результате работы ПИД регулятора корректируется через 0,2 с.



**Рисунок 2.** График реакции системы управления на сигнал

**Figure 2.** Signal response plot of the control system

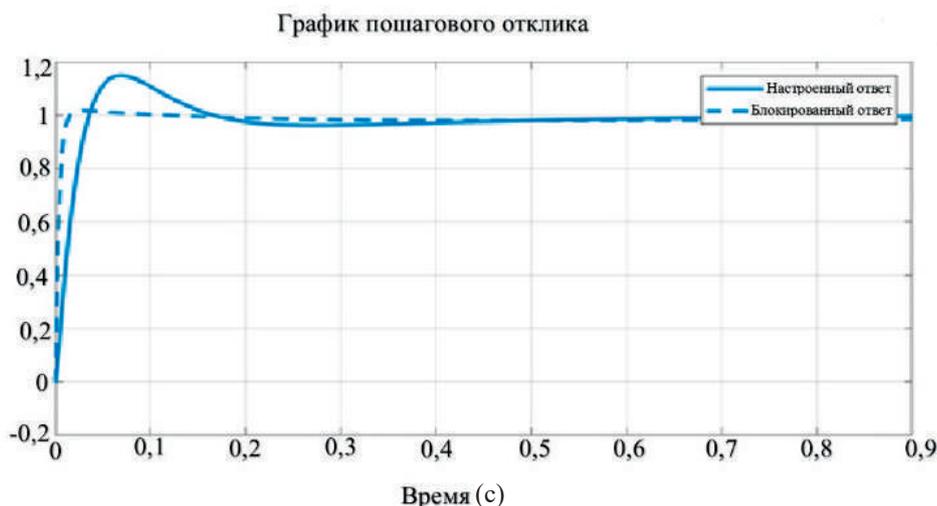


Рисунок 3. График отклика системы управления на сигнал

Figure 3. Control system signal response graph

На следующем этапе работы выполним корректировку скорости вращения синхронного электродвигателя А9-54-30-ЕН/4096.

Первоначально следует сформулировать передаточную функцию синхронного электродвигателя.

Для ее составления с математической точки зрения необходимо описать электрическую и механическую части электродвигателя при помощи дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 \sin \theta_{эл} &= R_1 \cdot i_{1d} + \psi_{1d} - \omega_{эл} \psi_{1d}; \\ -U_1 \cos \theta_{эл} &= R_1 \cdot i_{1q} + \psi_{1q} - \omega_{эл} \psi_{1d}; \\ u_B &= R_B \cdot i_B + \psi_B; \end{aligned} \quad (2)$$

$$M = \frac{3z_p}{2} (\psi_{1d} \cdot i_{1q} - \psi_{1q} \cdot i_{1d}).$$

Составим уравнение равновесия моментов, на валу электродвигателя используя зависимость:

$$M + \beta(\omega_0 - \omega) - M_c = J_{\Sigma w}. \quad (3)$$

Тогда в форме операторов система выглядит в виде уравнений:

$$\begin{aligned} U_d &= R_1 \cdot I_d + \psi_d - (1-s) \cdot \psi_q; \\ U_q &= R_1 \cdot I_q + \psi_q + (1-s) \psi_d; \\ U_f &= R_f \cdot I_f + \psi_f; \\ 0 &= R_D \cdot I_D + \psi_D; \\ 0 &= R_Q \cdot I_Q + \psi_Q, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $U_d$  и  $U_q$  — составляющие вектора напряжения  $U$  по осям  $d$  и  $q$  соответственно;

$U_f$  — напряжение обмотки возбуждения;

$I_d, I_q$  — составляющие вектора тока  $I$  по осям  $d$  и  $q$  соответственно;

$I_f$  — ток возбуждения;

$I_D, I_Q$  — составляющие вектора тока демпферной обмотки по осям  $d$  и  $q$  соответственно;

$S$  — скольжение.

В структуре проектируемой системы управления демпферной обмотки не предусмотрено, отсюда передаточную функцию синхронного электропривода с моментом  $M_c$  можно представить при помощи уравнения:

$$\begin{aligned} W_{(\omega)}(p) &= \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = \\ &= \frac{p}{\beta(T_m p^2 + p + T_m p^2 + p + T_m \Omega_{эл}^2)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Упростив выражение (5), есть возможность математически сформулировать передаточную функцию синхронного электропривода с моментом  $M_c$  при помощи уравнения:

$$W_{cs}(p) = \frac{1}{T_{\Sigma 1}^2 \cdot p^2 + 1}, \quad (6)$$

где  $T_{\Sigma 1}$  — электромеханическая постоянная времени.

Далее для обеспечения корректировки скорости вращения электродвигателя необходимо сформулировать соответствующую передаточную функцию, представленную в виде формулы:

$$W_{mn}(p) = \frac{K_{mn}}{T_{mn} \cdot p + 1}, \quad (7)$$

где  $K_{mn}$  — коэффициент механической передачи;

$T_{mn}$  — электромеханическая постоянная времени механической передачи.

На следующем этапе работы свои функции выполняет блок «Редуктор», он обеспечивает процесс передачи энергии с механической точки зрения, выполняет преобразование таких показателей, как крутящий момент и частота вращения. Для обеспечения эффективной работы системы управления редуктор уменьшает усилие, необходимое приводу для преобразования выше описанных параметров.

Далее следует скорректировать скорость движения режущего инструмента.

Корректировка обеспечивается за счет блока шарико-винтовая пара, в ней заложена математически составленная передаточная функция, представленная в виде формулы:

$$W_{en}(p) = \frac{K_{en}}{T_{en} \cdot p + 1}, \quad (8)$$

где  $K_{en}$  — коэффициент винтовой пары.

На завершающем этапе работы система управления осуществляет контроль качества поверхностей полученной детали посредством датчика шероховатости. Объем числовых данных записывается в блоке долгосрочного хранения информации.

Последующий анализ позволяет системе управления определить алгоритм дальнейшей работы, существует два основных варианта:

1) полученные показатели шероховатости не входят в диапазон требуемого качества точности, в таком случае микропроцессор системы управления подает

команду на повторное редактирование показателей подачи, скорости вращения электродвигателя и скорости движения инструмента;

2) показатели шероховатости входят в диапазон требуемого качества точности, соответствуют тем, что указаны в технологическом процессе, в этом случае работа системы управления прекращается.

Представленная система управления существенно повышает эффективность работы электропривода, позволяет выпускать изделия, поверхности которых имеют более высокое качество обработки. Однако для подтверждения эффективности применения системы управления в структуре электропривода следует оценить степень ее устойчивости (в том числе динамической) в процессе выполнения возложенных на нее функций.

#### **Анализ устойчивости параметрической системы управления с ПИД регулятором**

Устойчивость системы управления является ключевым показателем, указывающим на ее корректную бесперебойную работу. Применительно к рассматриваемой системе управления важно корректно подобрать передаточную функцию замкнутой системы, предварительно выполнить подбор вспомогательных коэффициентов, после чего проанализировать устойчивость ее работы, используя как алгебраические, так и частотные критерии.

На начальном этапе работы требуется представить значения исходных характеристик системы управления, а также заданные показатели качества управления (таблицы 1 и 2).

На начальном этапе работы рассчитаем передаточную функцию для замкнутой системы, предварительно определив

**Таблица 1.** Технические характеристики параметрической системы управления с ПИД регулятором**Table 1.** Technical characteristics of parametric control system with PID regulator

Обозначение параметра							
$T_r, c$	$T_m, c$	$R_r, Ом$	$K_d, рад/с$	$K_{dc}, В$	$\omega_{ном}, рад/с$	$I_{ном}, А$	$P_{ном}, кВт$
0,00129	0,000053	0,6	0,45	0,0454	110	12	5

**Таблица 2.** Заданные показатели качества управления и параметры тиристорного преобразователя**Table 2.** Control quality parameters and thyristor transducer parameters

$\delta, \%$	$t_{mn}, c$	$D$	$K_{mn}$	$T_{mn}$	$U_n$	$K_{mn}$
1,255	0,12	2	20	1,1	220	20%

вспомогательные коэффициенты так, как показано в формуле:

$$W_y(p) = \frac{92,85}{0,000000075p^3 + 0,000058p^2 + 1,1p + 11,31} \quad (9)$$

#### Анализ устойчивости параметрической системы управления по критерию Гурвица

На основании формулы (9) составим характеристическое уравнение, представленное в виде формулы:

$$D(p) = 0,000000075p^3 + 0,000058p^2 + 1,1p + 11,31 = 0. \quad (10)$$

Далее запишем условие устойчивости, представленное в виде матрицы и следующих неравенств:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} ; \quad (11)$$

$$\Delta_1 = a_1 > 0;$$

$$\Delta_2 = a_2 \cdot a_1 - a_3 \cdot a_0 > 0. \quad (12)$$

Подставим данные в матрицу (11) и проверим условия критериев:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0,000058 & 11,31 & 0 \\ 0,000000075 & 1,1 & 0 \\ 0 & 0,000058 & 11,31 \end{vmatrix} ;$$

$$\Delta_1 = 1,1 > 0;$$

$$\Delta_2 = 0,000063 > 0.$$

Условия критерия Гурвица выполняются, следовательно, система управления устойчива.

#### Анализ устойчивости параметрической системы управления по критерию Рауса

Согласно критерию Рауса система управления считается устойчивой в том случае, если все коэффициенты, представленные в таблице 3, больше 0.

Вычислим значения выражений (строка 3 и строка 4), полученные данные занесем в таблицу 4.

По результатам расчета можно сделать вывод, что все полученные значения положительные, следовательно, по критерию Рауса параметрическая система управления устойчива.

#### Анализ устойчивости параметрической системы управления по критерию Михайлова

На начальном этапе расчета устойчивости по критерию Михайлова запишем полином третьего порядка так, как показано в формуле:

$$M_{(p)} = a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0. \quad (13)$$

Исходя из формулы (13), составим действительную функцию:

$$X(\omega) = a_0 - a_3 \cdot \omega^2. \quad (14)$$

**Таблица 3.** Расчет коэффициентов системы управления по критерию Рауса

**Table 3.** Calculation of control system coefficients by Routh's criterion

Номер строки	Номер столбца	
	1	2
1	$a_3$	$a_1$
2	$a_2$	$a_0$
3	$a_1 - a_3 I / a_2$	0
4	$a_0$	-

**Таблица 4.** Результаты расчета коэффициентов системы управления по критерию Рауса

**Table 4.** Results of calculation of control system coefficients by Routh's criterion

Номер строки	Номер столбца	
	1	2
1	0,000000075	1,1
2	0,000058	11,31
3	1,0853	0
4	11,31	-

Подставим данные в формулу (14), получим:

$$\omega_2 = \pm 441,5.$$

В результате расчета примем положительное значение  $\omega_2$ .

Уравнение мнимой составляющей представлено в виде формулы:

$$X(\omega) = -a_3 \cdot \omega^3 + a_1 \cdot \omega = 0. \quad (15)$$

Выразим значение  $\omega_3$  и подставим данные в формулу (15):

$$\omega_3 = \pm 1154,7.$$

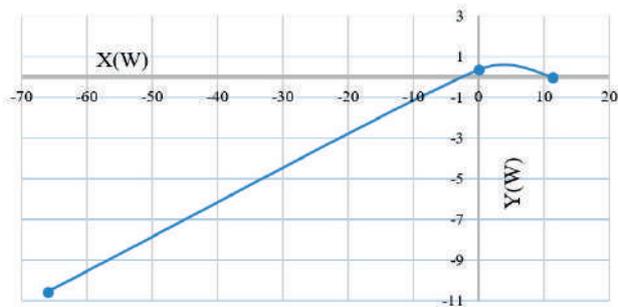
Полученные результаты расчетов сведем в таблицу 5.

Соответствующий график годографа Михайлова представлен на рисунке 4.

**Таблица 5.** Результаты расчета устойчивости системы управления по критерию Михайлова

**Table 5.** Results of calculation of control system stability according to Mikhailov criterion

Номер строки	1	2	3
Корни $Y(\omega)$	0		1154,7
Корни $X(\omega)$		441,5	



**Рисунок 4.** Годограф Михайлова

**Figure 4.** Mikhailov's Godographer

По результатам выполненного расчета можно сделать вывод, что все полученные значения положительны и расположены по возрастанию, следовательно, по критерию Михайлова параметрическая система управления устойчива.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная параметрическая система управления с ПИД регулятором применима в условиях производства, так как является устойчивой по нескольким критериям САУ и способна оптимизировать работу электропривода, а также способствует увеличению показателей качества обрабатываемых поверхностей деталей.

### Выводы

В рамках исследования разработана параметрическая ПИД система управления для привода продольной подачи токарного станка с ЧПУ.

Основные функции в системе управления выполняет продольно-интегрально-дифференциальный регулятор, в его основе заложены аналитически рассчитанные ПИД коэффициенты, наличие которых способствует реализации процесса регулирования скорости вращения электродвигателя, а также скорости движения режущего инструмента.

Разработан ряд математически сформулированных передаточных функций, обеспечивающих взаимодействие между составными частями системы управления [10], в частности наличие данных законо-

мерностей позволяют выполнить корректировку скорости вращения синхронного двигателя, слаженную передачу полученных данных на последующие блоки системы управления для дальнейшего регулирования скорости вращения режущего инструмента.

Для подтверждения эффективности применения параметрической системы управления в технологических процессах обработки деталей выполнено исследова-

ние устойчивости представленной разработки. По ее результатам можно сделать вывод, что система управления устойчива по таким критериям, как критерии Гурвица, Михайлова и Рауса.

Полученная ПИД система управления для привода продольной подачи токарного станка с ЧПУ станет основой для дальнейшей разработки системы слежения за показателями шероховатости обработанной поверхности детали.

### Список литературы

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

2. Яковлева Д.А. Теория автоматического управления. М.: Академия Жуковского, 2018. 80 с.

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

4. Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С. Разработка нечеткой системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на основе совместно используемых функций принадлежности // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2021. Т. 17, № 3–4. С. 82–91.

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

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

7. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems

with Disturbance Observer // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. June 2022. No. 138 (2). P. 107971. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.

8. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. (2022). Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. May 2022, No. 137 (2). P. 107778. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.

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

10. Ким Д.П. Теория автоматического управления. М.: Юрайт, 2022. 276 с.

### References

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

2. Yakovleva D.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Moscow, Zhukovsky Academy Publ., 2018. 80 p. [in Russian].

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

4. Khamitov R.N., Zykin P.V., Glazyrin A.S. Razrabotka nechetkoi sistemy upravleniya privodom prodol'noi podachi tokarnogo stanka s ChPU na osnove sovmestno ispol'zuemykh funktsii prinadlezhnosti [Development of Fuzzy CNC Lathe Drive Control System Based on Shared Accessory Functions]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 3–4, pp. 82–91. [in Russian].
5. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdulateef J., Hasan A., Mohamad A. An Analysis of Photovoltaic/Supercapacitor Energy System for Improving Self-Consumption and Self-Sufficiency. *Energy Reports*, 2022, No. 8, pp. 680–695. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.021>.
6. Li J., Ma J., Sun L., Liu X., Liao H., He D. Mechanistic Insight into the Biofilm Formation and Process Performance of a Passive Aeration Ditch (PAD) for Decentralized Wastewater Treatment. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2022, No. 16(7). <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1494-3>.
7. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems with Disturbance Observer. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, June 2022, No. 138 (2), pp. 107971. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.
8. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. (2022). Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, May 2022, No. 137 (2), pp. 107778. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.
9. Li D., Deng X., Li C., Zhang X., Fang E. Study on the Space Vector Modulation Strategy of Matrix Converter under Abnormal Input Condition. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, No. 61(6), pp. 4595–4605. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.020>.
10. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Moscow, Yurite Publ., 2022. 276 p. [in Russian].



**Екатерина Анатольевна Шулаева**  
**Ekaterina A. Shulaeva**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия



**Илья Александрович Пенкин**  
**Ilya A. Penkin**

магистрант кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

УДК 004.942

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-132-140

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА УЗЛА СЕРООЧИСТКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

### Актуальность

На данный момент одной из самых быстроразвивающихся и актуальных проблем улучшения условий безопасности и качества управления опасными технологическими производствами являются проектирование и внедрение инструментария, позволяющего моделировать технологические процессы на компьютере для отладки действий персонала до выхода на реальный объект. Таким образом становится возможным решение основных задач: обучение высококвалифицированного персонала и настройка оптимальных технологических параметров. Помимо практического аспекта данной проблемы остро встаёт вопрос безопасности и в нормативно-правовых актах. Так, в соответствии с федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности устанавливается, что для приобретения практических навыков безопасного выполнения работ, предупреждения аварий и ликвидации их последствий на технологических объектах с блоками I и II категории взрывоопасности все рабочие и инженерно-технические работники, непосредственно занятые ведением технологического процесса и эксплуатацией оборудования на этих объектах, проходят курс подготовки с использованием современных технических средств обучения и отработки таких навыков на специализированном оборудовании, способном имитировать реально протекающий процесс.

Для повышения уровня подготовки персонала к более качественному и безопасному управлению технологическими объектами возможно использование инструментов, имеющих возможность моделирования на компьютере технологических процессов и системы управления, до выхода на настоящий промышленный объект. Таким образом, решается несколько задач: обучение персонала по ведению технологического процесса и выбор эффективных технологических режимов. Одним из таких инструментов является цифровой двойник.

### Цель исследования

Разработка цифрового двойника узла сероочистки углеводородного сырья в программной среде UniSim.

### Методы исследования

Для разработки имитационной модели узла сероочистки углеводородного сырья применялся программный комплекс Honeywell UniSim.

## Результаты

В данной работе рассмотрено создание динамической модели узла сероочистки углеводородного сырья с имитационными экранами аппаратчика и оператора.

**Ключевые слова:** моделирование, цифровой двойник производства, сероочистка, углеводородное сырьё, управление производством, имитационная модель

## DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF THE UNIT FOR SULFUR REMOVAL OF HYDROCARBONS

### Relevance

At the moment, one of the fastest growing and urgent problems of improving safety conditions and the quality of management of hazardous technological production is the design and implementation of tools that allow you to simulate technological processes on a computer to debug personnel actions before entering a real object. Thus, it becomes possible to solve the main tasks: training qualified personnel, and setting the optimal technological parameters. In addition to the practical aspect of this problem, there is an acute issue of security in regulatory legal acts. So, in accordance with federal norms and rules in the field of industrial safety, it is said that in order to acquire practical skills for the safe performance of work, the prevention of accidents and the elimination of their consequences at technological facilities with blocks of I and II explosion hazard categories, all workers and engineering and technical workers, those directly involved in the conduct of the technological process and the operation of equipment at these facilities undergo a training course using modern technical means of training and practicing such skills on specialized equipment capable of simulating a real process.

To improve the level of personnel training for better and safer management of technological facilities, it is possible to use tools that have the ability to simulate technological processes and control systems on a computer before entering a real industrial facility. Thus, several tasks are solved: personnel training in the conduct of the technological process, and the choice of effective technological modes. Such equipment is a digital twin.

### Aim of research

Development of a digital twin of the unit for desulphurization of hydrocarbon raw materials in the UniSim software.

### Research methods

The Honeywell UniSim software package was used to develop a simulation model of the hydrocarbon feedstock desulfurization unit.

### Results

This paper considers the creation of a mathematical model of a unit for desulphurization of hydrocarbons with simulation screens for an apparatus operator and an operator.

**Keywords:** modeling, digital twin of production, desulfurization, hydrocarbon feedstock, production management, simulation model

На данный момент существует различное программное обеспечение для компьютерного моделирования технологических процессов, выбора режимов работы и настройки контуров регулирования. Одной из таких программ является Unisim.

Использованием Unisim Design можно решить следующие проблемы: улучшение навыков подготовки персонала из-за постоянного роста сложности самих про-

цессов; появление новых автоматизированных систем управления (АСУП).

Решение о создании цифрового двойника возникло из-за необходимости подготовки новых кадров, а также повышения и поддержания текущей квалификации персонала. Чем лучше будет подготовлен операторский персонал, тем выше будут уровни безопасности и производительности работы.

Благодаря современным средам моделирования возможно создание имитирующих и прогнозирующих программ, внедряемых в производство, устранение и поиск неисправностей, а также повышение эффективности использования промышленных установок.

Таким образом, внедрение цифровых двойников помогает подготовить персонал перед запуском нового оборудования, а также является эффективным способом обучения, повышения и поддержания квалификации персонала. Использование таких тренажёров должно помочь отработать действия персонала при различных аварийных ситуациях, а также уменьшить вероятность их возникновения [1–4].

Задачи, которые ставятся перед специалистами, требуют не только глубокого знания технологических процессов, но и знания принципов составления автоматических систем, позволяющих наиболее эффективно управлять процессом.

Программный пакет UniSim Operations от компании Honeywell позволяет объединить весь технологический процесс в краткую учебную программу. Он позволяет усовершенствовать надёжность производства и качество подготовки персонала, получения им новых или закрепления уже полученных навыков.

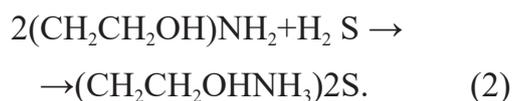
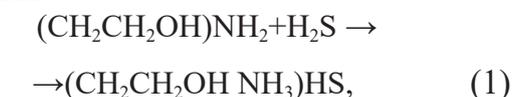
К достоинствам программы UniSim Operations можно отнести:

- полную унификацию с программной средой UniSim Design;
- способность отображения динамических процессов в реальном времени, которые отображают все выходные функции;
- способность имитационных моделей иметь неограниченные размеры и адаптироваться для подробных инженерных исследований или приложений в реальном времени, например для обучения оператора.

За счёт связи UniSim Operations с математической моделью в UniSim Design

присутствует возможность управления технологическими аппаратами данного узла сероочистки углеводородного сырья, в точности так, как это происходит на автоматизированном рабочем месте (АРМ) специалиста [5, 6].

На секции узла сероочистки углеводородного сырья осуществляется очистка сырья от содержания в нем сероводорода, с последующим проведением глубокой перегонки, продуктом чего являются бензиновые и газовые фракции. Очистка осуществляется водным раствором моноэтаноламина (МЭА), который взаимодействует с сероводородом по следующим реакциям:



Процесс сероочистки происходит при давлении до 1,0 МПа и температуре до 40 °С, при более высоких температурах качество сероочистки ухудшается, т.к. возможен процесс обратной реакции. Регенерация насыщенного сероводорода МЭА производится централизованно на установке регенерации МЭА путем его нагрева до температуры 105–120 °С, при которой происходит обратная реакция.

Очистке от сероводорода подлежат: нестабильная головка; газовый конденсат из сепаратора (в сепаратор поступают продукты продувки сепараторов газовой компрессорной), продукт низа колонны секции и углеводороды из отстойных частей емкостей и установок; фракция C<sub>5</sub> и выше с установки.

Газосырьевая смесь с температурой 40 °С поступает в экстрактор К-1 (рисунок 1). Температура потока на входе в К-1 контролируется прибором ТТ-12. Раствор МЭА поступает непосредственно с установки регенерации МЭА на прием Н-1, 2, и данными насосами закачивается в экс-

трактор К-1. Уровень жидкости на приеме насосов измеряется приборами LSA H1 на Н-1, LSA H2 на Н-2, (при отсутствии уровня жидкости на приеме насоса срабатывают световая и звуковая сигнализации, срабатывает блокировка, и происходит останов насоса).

Давление в бачке уплотняющей жидкости насосов измеряется приборами PISA H1 на Н-1, PISA H2 на Н-2 и должно быть не более 0,25 МПа (при значении давления более 0,25 МПа срабатывают световая и звуковая сигнализации, при значении давления более 0,4 МПа срабатывают световая и звуковая сигнализацию, срабатывает блокировка, и происходит остановка насоса).

Уровень уплотняющей жидкости насосов измеряется приборами LSA H1 на Н-1, LSA H2 на Н-2 (при отсутствии

уровня уплотняющей жидкости срабатывают световая и звуковая сигнализации, срабатывает блокировка, и происходит останов насоса).

Температура МЭА контролируется прибором ТТ-3 и должна быть не выше 45 °С.

Расход МЭА в К-1 должен составлять 5–15 м<sup>3</sup>/ч, регулируется контуром FIRC 4402 с помощью клапана FV-18, установленного на выходе МЭА из Н-1, 2 (рисунок 1).

После настройки и задания необходимых параметров и компонентов разработанная модель была запущена в динамическом режиме. Для проверки корректности процесса необходимо проверить компонентный состав сырья, выходящего из колонны К-1, который должен совпадать с необходимым значением, полученным в результате расчёта ПИ-регулятора (рисунок 2).

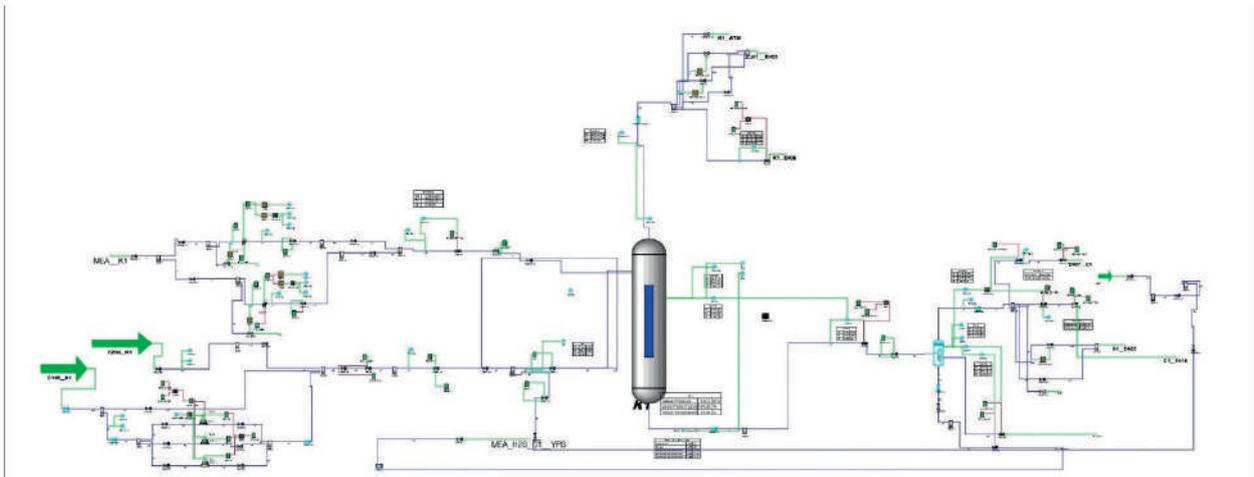


Рисунок 1. Готовая схема процесса в UniSimDesign

Figure 1. Finished process diagram in UniSim Design

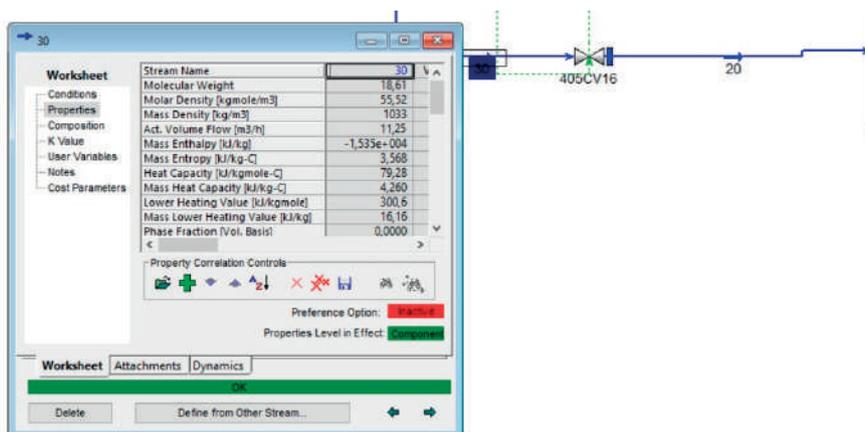


Рисунок 2. Окно параметров потока после ПИ-регулятора

Figure 2. Flow parameter window after PI controller

На рисунке 3 показан график основных параметров технологического процесса в результате вывода на режим. В случае успешного выхода и правильности настройки модели графики должны стремиться к прямому виду.

Для успешной разработки имитационного комплекса помимо создания математической модели необходимо разработать экраны оператора и аппаратчика, которые позволят воссоздать реальный экран на производстве. Инструктора в компьютер-

ном тренинге интересует статус задачи компьютерного обучения, и в этом смысле созданный нами инструкторский интерфейс (ИИ) является человеко-компьютерным [7–12] (рисунок 4).

Несмотря на то, что целью данной работы является создание обучающего комплекса узла сероочистки, необходимо отметить, что инструктор должен иметь возможность взаимодействовать с разработанными интерфейсами как в реальном времени, так и вне занятий (контроль обу-



Рисунок 3. Окно устоявшихся параметров технологического процесса

Figure 3. Window of established process parameters



Рисунок 4. Схема устройства компьютерно-тренажёрного комплекса

Figure 4. Scheme of the device of a computer-simulator complex

чаемого, просмотр занятия, изменение заданий, смена данных).

В зависимости от поставленных инструктором задач их можно сформировать в виде выражения:

$$\bar{b} = [b_1, b_1^s, b_2, b_2^s, b_3, b_3^s, b_4, b_4^s, b_5, b_5^s, b_6, b_6^s, b_7] = B(r^s, d_1, d_2, d_2^s, \bar{y}, u, \bar{z}), \quad (3)$$

где  $b_1, b_1^s$  и  $b_2, b_2^s$  — соответственно вмешательства инструктора в работу блока базового регулирования и диспетчера управления блоками (БРДУ) и блока усовершенствования управления и поддержки решений (УУПР);

$b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  — соответственно вмешательства инструктора в работу имитационной модели, изменение графического исполнения и сообщения оператору [13–16].

Вмешательства инструктора через подсистему исполнения транслируются на уровень диалога, где преобразуются в графический и доступный остальным элементам системы вид:

$$\bar{m} = [m_1^s, m_2^s, m_3^s, m_4^s, m_5^s, m_6^s, m_7^s] = B(r^s, d_1, d_2, d_2^s, \bar{y}, u, \bar{z}). \quad (4)$$

Элементы выражения (4) представляют собой соответственно инструкторские вмешательства в блоки БРДУ ( $m_1^s$ ), УУПР ( $m_2^s$ ), модель исполнительных механизмов (МИМ) ( $m_3^s$ ), модель процесса (МП) ( $m_4^s$ ), модель измерения и преобразования информации (МИП) ( $m_5^s$ ), запросы в блок графической поддержки ИИ ( $m_6^s$ ) и сообщения оператору ( $m_7^s$ ) [6].

Более современные средства компьютерного имитационного моделирования представляют собой автоматизированные комплексы для обучения (смена процесса, создание аварийных ситуаций, создание сценариев, и т.д.) [17–20].

В нашем случае для создания экранов тренажера использовался программный комплекс Unisim Operation, позволяющий связать математическую модель с экранами симулятора оператора и аппаратчика (рисунки 4 и 5). Это позволяет единым образом управлять различными технологическими устройствами узла сероочистки углеводородного сырья на АРМ специалиста.

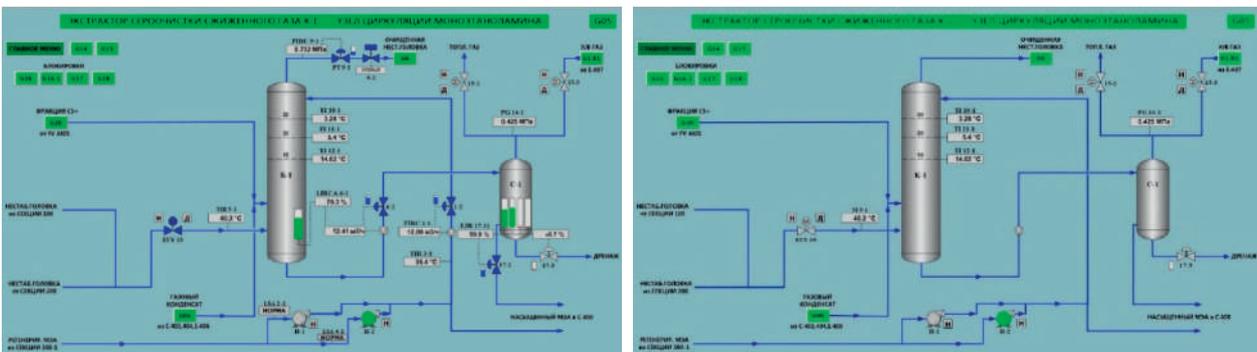


Рисунок 5. Экраны сероочистки К-1 оператора и аппаратчика

Figure 5. Desulphurization screens K-1 for operator and apparatusik

**Выводы**

Рассмотрена разработка цифрового двойника производственного процесса узла сероочистки углеводородного сырья с целью обучения персонала и наблюдения за течением технологического процесса.

Представлен анализ проблематики компьютерных тренажёрных комплексов, рассмотрен программный пакет Honeywell Unisim, разработаны отдельные его составляющие: экраны оператора и аппаратчика, элементы математической модели с учётом всех особенностей про-

цесса очистки углеводородного сырья от сероводорода.

Достигнут высокий уровень взаимодействия пользователя с моделью, пользователь может непосредственно наблюдать за ходом производства, его масштабом и участвовать в процессе самостоятельно, что улучшает понимание сути

непосредственно производственного процесса. Разработанный цифровой двойник может быть использован в нефтехимической промышленности для обучения персонала навыкам, необходимым для безаварийного ведения технологического процесса.

#### Список источников

1. Shulaeva E.A., Pavlov V.B., Burdov A. E. Simulation of the Fuel Gas and Raw Material Supply System to the Furnace of the Atmospheric Oil Distillation Unit and Development of a Computer Training Software // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1679 (1). P. 022093 (1-6). doi:10.1088/1742-6596/1679/2/022093.
2. Shulaeva E.A., Valitov D.R., Kubryak A.I. Simulation of the Gas Fractionating Unit of Depropanization System and Development of a Computer Training Software // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1691 (1). P. 012144 (1-7). doi:10.1088/1742-6596/1691/1/012144.
3. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: СИНТЕГ, 2009. 372 с.
4. Koteleva N.I., Shablonsky I.E., Koshkin A.V. Computer Training Simulator for Instruction of Oil and Gas Technological Processes Operators: the Analysis of Existing Decisions and the Way of Their Improvement // *Journal of Mining Institute*. 2011. Vol. 192. P. 212–215.
5. Подольский А.К. Применение методов искусственного интеллекта в нефтегазовой промышленности // *Современная наука*. 2016. № 3. С. 33–36.
6. Кириллов Д.С., Барчукова Т.А. Цифровые двойники как основа цифровой трансформации промышленных предприятий // *Актуальные вопросы экономики и управления*. 2021. С. 161–164.
7. Шулаева Е.А., Павлов В.Б., Карачевский Д.Ю., Пенкин И.А. Анализ технологических решений в процессе очистки серосодержащих соединений // *Естественные и технические науки*. 2020. № 10. С. 182–185.
8. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R., Khristodulo O.I. Development and Application of Problem-Oriented Digital Twins for Magnetic Observatories and Variation Stations // *Information and Control Systems*. 2021. No. 2 (111). P. 60–71.
9. Рахманов М.Л., Шишкин А.В. Современные цифровые технологии и цифровой двойник // *Качество и жизнь*. 2021. № 2 (30). С. 57–59.
10. Рудской А.И. Цифровая промышленность на основе цифровых двойников // *Приборы*. 2021. № 3 (249). С. 9–16.
11. Аверкиев В.Е. Цифровые двойники как новая парадигма цифрового проектирования // *Актуальные аспекты модернизации российской экономики: сб. науч. тр. по матер. VI Всеросс. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2019. С. 164–166.
12. Пономарев К.С., Феофанов А.Н., Гришина Т.Г. Стратегия цифрового двойника производства как метод цифровой трансформации предприятия // *Вестник современных технологий*. 2019. № 4 (16). С. 23–30.
13. Тельнов Ю.Ф. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий // *Цифровая экономика: тенденции и перспективы развития: сб. тез. докл. национальн. науч.-практ. конф.: в 2 т.* 2020. С. 63–65.
14. Абрамов В.И., Туйцына А.А. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации компании // *Управление бизнесом в цифровой экономике: сб. тез. выступлений Четвертой междунар. конф. / Под общ. ред. И.А. Аренкова, М.К. Ценжарик*. Санкт-Петербург, 2021. С. 33–39.
15. Штоль М.С. Цифровой двойник: ключевая технология цифровой трансформации // *Экономика XXI века: инновации, инвестиции, образование*. 2022. Т. 10. № 5. С. 20–23.
16. Паршина И.С., Фролов Е.Ю. Разработка цифрового двойника производственной системы на базе современных цифровых технологий // *Экономика промышленности*. 2020. Т. 13. № 1. С. 29–34.

17. Пономарев К.С., Шутиков М.А., Феофанов А.Н. Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. № 4 (51). С. 19–23.

18. Naidenko N.A. Application and Benefits of Digital Twins // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2021. № 20. С. 234–236.

19. Smirnov S.V., Mardanov G.D., Morozov G.A., Nasybullin A.R. Introduction of Digital Twin Systems in the Production // Вестник НЦБЖД. 2021. № 4 (50). С. 160–165.

20. Романовская В.Е. «Цифровой двойник» как основа цифрового проектирования и моделирования // Цифровые технологии в экономике и промышленности (ЭКОПРОМ-2019): сб. тр. национальн. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Под ред. А.В. Бабкина. 2019. С. 208–214.

### References

1. Shulaeva E.A., Pavlov V.B., Burdov A.E. Simulation of the Fuel Gas and Raw Material Supply System to the Furnace of the Atmospheric Oil Distillation Unit and Development of a Computer Training Software. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1679 (1), pp. 022093 (1-6). doi:10.1088/1742-6596/1679/2/022093.

2. Shulaeva E.A., Valitov D.R., Kubryak A.I. Simulation of the Gas Fractionating Unit of Depropanization System and Development of a Computer Training Software. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1691 (1), pp. 012144 (1-7). doi:10.1088/1742-6596/1691/1/012144.

3. Dozortsev V.M. *Komp'yuternye trenazhery dlya obucheniya operatorov tekhnologicheskikh protsessov* [Computer Simulators for Training Process Operators]. Moscow, SINTEG Publ., 2009. 372 p. [in Russian].

4. Koteleva N.I., Shablonsky I.E., Koshkin A.V. Computer Training Simulator for Instruction of Oil and Gas Technological Processes Operators: the Analysis of Existing Decisions and the Way of Their Improvement. *Journal of Mining Institute*, 2011, Vol. 192, pp. 212–215.

5. Podol'skii A.K. Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v neftegazovoi promyshlennosti [Application of Artificial Intelligence Methods in the Oil and Gas Industry]. *Sovremennaya nauka – Modern Science*, 2016, No. 3, pp. 33–36. [in Russian].

6. Kirillov D.S., Barchukova T.A. Tsifrovye dvoyniki kak osnova tsifrovoi transformatsii promyshlennykh predpriyatii [Digital Twins as the Basis for the Digital Transformation of Industrial Enterprises]. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniya* [Topical Issues of Economics and Management]. 2021, pp. 161–164. [in Russian].

7. Shulaeva E.A., Pavlov V.B., Karachevskii D.Yu., Penkin I.A. Analiz tekhnologicheskikh reshenii v protsesse ochistki serosoderzhashchikh soedinenii [Analysis of Technological Solutions in the Process of Purification of Sulfur-Containing Compounds]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Natural and Technical Sciences*, 2020, No. 10, pp. 182–185. [in Russian].

8. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R., Khristodulo O.I. Development and Application of Problem-Oriented Digital Twins for Magnetic Observatories and Variation Stations. *Information and Control Systems*, 2021, No. 2 (111), pp. 60–71.

9. Rakhmanov M.L., Shishkin A.V. Sovremennye tsifrovye tekhnologii i tsifrovoi dvoynik [Modern Digital Technologies and Digital Twin]. *Kachestvo i zhizn' – Quality and Life*, 2021, No. 2 (30), pp. 57–59. [in Russian].

10. Rudskoi A.I. Tsifrovaya promyshlennost' na osnove tsifrovyykh dvoynikov [Digital Industry Based on Digital Twins]. *Pribory – Devices*, 2021, No. 3 (249), pp. 9–16. [in Russian].

11. Averkiev V.E. Tsifrovye dvoyniki kak novaya paradigma tsifrovogo proektirovaniya [Digital Twins as a New Paradigm of Digital Design]. *Sbornik nauchnykh trudov «Aktual'nye aspekty modernizatsii rossiiskoi ekonomiki» po materialam VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Collection of Scientific Papers «Actual Aspects of the Modernization of the Russian Economy» Based on Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. 2019, pp. 164–166. [in Russian].

12. Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grishina T.G. Strategiya tsifrovogo dvoynika proizvodstva kak metod tsifrovoi transformatsii predpriyatiya [Strategy of a Digital Twin of Manufactory as a Method of Digital Enterprise Transformation]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii – Journal of Modern Technologies*, 2019, No. 4 (16), pp. 23–30. [in Russian].

13. Tel'nov Yu.F. Tsifrovye dvoyniki i tsifrovaya transformatsiya predpriyatii [Digital Twins and Digital Transformation of Enterprises]. *Sbornik tezisov dokladov natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tsifrovaya ekonomika: tendentsii i perspektivy razvitiya»: v 2 t.* [Collection of Abstracts of Reports of the National Scientific-Practical Conference «Digital Economy: Trends and Prospects of Development»: in 2 vol.]. 2020, pp. 63–65. [in Russian].
14. Abramov V.I., Tuitsyna A.A. Tsifrovye dvoyniki – effektivnye instrumenty tsifrovoy transformatsii kompanii [Digital Twins are Effective Tools for Digital Transformation of a Company]. *Sbornik tezisov vystuplenii Chetvertoi mezhdunarodnoi konferentsii «Upravlenie biznesom v tsifrovoi ekonomike».* [Collection of Abstracts of the Fourth International Conference «Business Management in the Digital Economy»]. Ed. by I.A. Arenkov, M.K. Tsenzharik. Saint-Petersburg, 2021, pp. 33–39. [in Russian].
15. Shtol' M.S. Tsifrovoi dvoynik: klyuchevaya tekhnologiya tsifrovoy transformatsii [The Digital Twin: A Key Technology for Digital Transformation]. *Ekonomika XXI veka: innovatsii, investitsii, obrazovanie – Economy of the 21st Century: Innovations, Investments, Education*, 2022, Vol. 10, No. 5, pp. 20–23. [in Russian].
16. Parshina I.S., Frolov E.Yu. Razrabotka tsifrovogo dvoynika proizvodstvennoi sistemy na baze sovremennykh tsifrovyykh tekhnologii [Development of a Digital Twin of a Production System Based on Modern Digital Technologies]. *Ekonomika promyshlennosti – Economics of Industry*, 2020, Vol. 13, No. 1, pp. 29–34. [in Russian].
17. Ponomarev K.S., Shutikov M.A., Feofanov A.N. Tsifrovoi dvoynik kak instrument tsifrovoy transformatsii predpriyatiya [Digital Twin as a Tool for Digital Transformation of an Enterprise]. *Vestnik MGTU «Stankin» – Bulletin of MSTU «Stankin»*, 2019, No. 4 (51), pp. 19–23. [in Russian].
18. Naidenko N.A. Application and Benefits of Digital Twins [Application and Benefits of Digital Twins]. *Molodezh'. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii – Youth. Society. Modern Science, Technology and Innovation*, 2021, No. 20, pp. 234–236. [in Russian].
19. Smirnov S.V., Mardanov G.D., Morozov G.A., Nasybullin A.R. Introduction of Digital Twin Systems in the Production. *Vestnik NTsBZhD*, 2021, No. 4 (50), pp. 160–165.
20. Romanovskaya V.E. «Tsifrovoi dvoynik» kak osnova tsifrovogo proektirovaniya i modelirovaniya [«Digital Twin» as a Basis for Digital Design and Modeling]. *Sbornik trudov natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Tsifrovye tekhnologii v ekonomike i promyshlennosti» (EKOP-ROM-2019).* [Collection of Proceedings of the National Scientific-Practical Conference with International Participation «Digital Technologies in the Economy and Industry» (ECOP-ROM-2019)]. Ed. by A.V. Babkin. 2019, pp. 208–214. [in Russian].



**Антон Геннадьевич Юдинцев**

**Anton G. Yudin**

кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия



**Вячеслав Михайлович Дмитриев**

**Vyacheslav M. Dmitriev**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия



**Тарас Викторович Ганджа**

**Taras V. Gandzha**

доктор технических наук, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия



**Татьяна Николаевна Зайченко**

**Tatiana N. Zaichenko**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия



**Никита Максимович Дубинин**

**Nikita M. Dubinin**

аспирант, младший научный сотрудник лаборатории системного проектирования и автоматического расчета систем кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

УДК 004.942

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-141-150

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

### Актуальность

Освоение космоса с помощью автоматических космических аппаратов – спутников различного назначения, аппаратов исследования дальнего космоса, насчитывает не одно десятилетие. Несмотря на это даже при современном уровне надёжности космические аппараты выходят из строя, не исчерпав всего срока активного существования. Базовую часть, так называемую платформу космического аппарата, как правило,

составляют его жизнеобеспечивающие системы: система терморегулирования, система ориентации, двигательная система, бортовой вычислительный комплекс управления. Сбой в работе каждой из них приводит к нештатной ситуации на борту, но достаточно выхода из строя любой части системы электроснабжения, чтобы аппарат в итоге оказался полностью неработоспособным. В связи с этим система электроснабжения космического аппарата должна подвергаться качественной наземной проверке, проходить несколько стадий испытаний, от автономных до комплексных в составе космического аппарата. С целью подтверждения прогнозируемой надёжности и работоспособности системы электроснабжения космического аппарата в наземных условиях должны быть смоделированы номинальные и предельные режимы её работы. Но, в силу очевидных причин, применение в наземных условиях бортовых солнечной и аккумуляторной батарей, а также всего комплекса служебной и полезной электрических нагрузок является трудновыполнимым и малоэффективным. Поэтому с целью проведения полноценной наземной экспериментальной отработки применяют особый класс контрольно-проверочной аппаратуры — аппаратно-программные комплексы, имитирующие режимы работы системы электроснабжения, состоящие из имитаторов солнечной, аккумуляторной батарей и бортовой электрической нагрузки, автоматизированных систем контроля соединений.

#### **Цель исследования**

Привести структуру цифрового двойника системы электропитания космического аппарата и реализовать компьютерную модель цифрового двойника для автоматизации задач проектирования, разработки и наземных испытаний системы электроснабжения.

#### **Методы исследования**

Метод компонентных цепей, методы системного анализа.

#### **Результаты**

Приведена структура цифрового двойника системы электропитания космического аппарата. Реализована компьютерная модель цифрового двойника в отечественной среде многоуровневого компьютерного моделирования MAPC. Цифровой двойник был интегрирован в испытательный стенд системы электроснабжения путем взаимодействия с реальными базами данных и управляющей ЭВМ.

**Ключевые слова:** система электроснабжения космического аппарата, наземные испытания, контрольно-проверочная аппаратура, имитатор аккумуляторной батареи, имитатор солнечной батареи, имитатор электрической нагрузки, автоматизация процесса испытаний, цифровой двойник

## **STRUCTURAL AND FUNCTIONAL DIAGRAM OF THE DIGITAL TWIN OF THE TEST COMPLEX OF THE SPACECRAFT POWER SUPPLY SYSTEM BASED ON A MULTI-LEVEL COMPUTER MODEL**

#### **Relevance**

Space exploration with the help of automatic spacecraft — satellites for various purposes, deep space exploration devices, has been going on for decades. Despite this, even with the current level of reliability, spacecraft fail without having exhausted the entire period of active existence. The basic part, the so-called platform of the spacecraft, as a rule, consists of its life-supporting systems: a temperature control system, an orientation system, a propulsion system, an on-board computer control system. A failure in the operation of each of them leads to an emergency situation on board, but it is enough for any part of the power supply system to fail so that the device eventually turns out to be completely inoperable. In this regard, the power supply system of the spacecraft must be subjected to high-quality ground testing, undergo several stages of testing, from autonomous to complex as part of the

spacecraft. In order to confirm the predicted reliability and operability of the spacecraft power supply system, the nominal and limit modes of its operation should be simulated in ground conditions. But, for obvious reasons, the use of on-board solar and battery batteries in ground conditions, as well as the entire complex of service and useful electrical loads, is difficult and ineffective. Therefore, in order to carry out a full-fledged ground experimental testing, a special class of control and verification equipment is used – hardware and software complexes that simulate the operating modes of the power supply system, consisting of simulators of solar, rechargeable batteries and onboard electrical load, automated connection control systems.

#### **Aim of research**

To bring the structure of the digital twin of the spacecraft power supply system and implement a computer model of the digital twin to automate the tasks of designing, developing and ground testing of the power supply system.

#### **Research methods**

The method of component circuits, methods of system analysis.

#### **Results**

The structure of the digital twin of the spacecraft power supply system is given. A computer model of a digital double has been implemented in the domestic environment of multilevel computer modeling of MARS. The digital twin was integrated into the test bench of the power supply system by interacting with real databases and a control computer

**Keywords:** spacecraft power supply system, ground tests, control and verification equipment, battery simulator, solar battery simulator, electric load simulator, automation of the test process, digital twin

#### **Введение**

Одна из важнейших систем, образующих платформу космического аппарата (КА), и во многом определяющая срок его активного существования, является система электроснабжения (СЭС).

Как правило, СЭС КА состоит из: солнечной батареи (СБ, БС), аккумуляторной батареи (АБ), блока энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) и бортовой электрической нагрузки — служебной и полезной.

Блок ЭПА является системообразующим элементом СЭС КА и предназначен для обеспечения совместной работы источников (БС) и накопителей (АБ) электрической энергии с целью надёжного электроснабжения бортовой аппаратуры (БА) электроэнергией необходимого качества [1].

Система электроснабжения, как составная часть, вносит особый вклад в прогнозируемую надёжность космического аппарата. Статистика отказов показывает, что несмотря на многолетний

опыт необходимым является увеличение надёжности СЭС КА. Следует отметить, что большая часть отказов может быть выявлена и устранена до запуска КА. К авариям приводят, как правило, невыявленные до эксплуатации причины отказов. Показатели качества рассчитываются ещё на этапе проектирования, но особым этапом в создании системы электроснабжения КА, подтверждении её надёжности и работоспособности в предельных и эксплуатационных режимах являются наземные испытания [2].

#### **Наземная экспериментальная отработка КА**

Наземная экспериментальная отработка КА с применением бортовых СБ, АБ и всего комплекса нагрузок, в эксплуатационных режимах работы СЭС, в наземных условиях не представляется возможной в силу очевидных причин. С учётом этого, при проведении наземных испытаний для подтверждения прогнозируемой надёжности и работоспособности

энергопреобразующей аппаратуры СЭС КА в номинальных и предельных режимах применяется специальная контрольно-проверочная аппаратура (КПА) — аппаратно-программные энергопреобразующие комплексы имитации СЭС КА, заменяющие основные элементы СЭС КА их физическими моделями, адекватно отражающими их электротехнические свойства — вольт-амперные и частотные характеристики, внутреннее сопротивление, выходные динамические параметры [3].

Являясь физическими моделями реальных объектов, имитаторы элементов (ИЭ) СЭС должны обладать максимально близкими к бортовым характеристиками солнечной и аккумуляторной батарей, а также обеспечивать имитацию статических и динамических токовых нагрузок для отработки профиля мощности, потребляемой бортовой аппаратурой. В некоторых случаях (определяется заказчиком) предстартовое энергообеспечение СЭС КА может осуществляться имитаторами солнечных либо аккумуляторных батарей [4].

Таким образом, энергопреобразующие комплексы, применяемые в ходе наземных испытаний, должны отвечать ряду требований, самыми важными из которых, как и для самой СЭС КА, являются энергетическая эффективность, оптимальные массогабаритные показатели, точность стабилизации выходных параметров и длительные сроки безотказной эксплуатации [5].

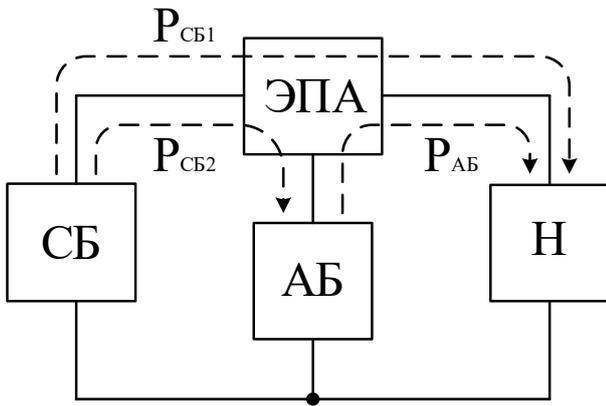
Отказы энергопреобразующих комплексов, спроектированных и изготовленных с не выявленными дефектами, при проведении этапов наземной отработки приводят к нежелательным последствиям: создаются аварийные ситуации для ЭПА, АБ либо всего космического аппарата, длительное выяснение причин остановки испытаний, дорогостоящие простои производства и т. д.

Как отмечалось ранее [6], в связи с постоянным увеличением средней мощности СЭС КА увеличивается мощность КПА. Поэтому необходимы не только разработка и производство, а также развитие методов и современных подходов к проектированию эффективных энергопреобразующих комплексов имитации СЭС КА. Сегодня существуют различные реализации имитаторов элементов СЭС КА для проведения наземных испытаний, разработанные предприятиями отечественной и зарубежной промышленности. Но их эффективность, точность, показатели надёжности, массогабаритные параметры, гарантийные сроки эксплуатации ставят перед разработчиками ряд задач по проектированию и созданию более эффективных комплексов имитации СЭС КА [7].

#### **Обобщённая схема замещения структур СЭС КА**

За всю историю проектирования и производства космических аппаратов к настоящему времени были разработаны различные структуры СЭС, построенные под определенные типы задач, рабочие орбиты и массогабаритные параметры спутников. Из структур, нашедших применение, можно выделить следующие: параллельная с шунтовым стабилизатором, параллельно-последовательные и с экстремальным регулятором мощности [8].

При этом все существующие структуры СЭС КА обобщенно можно представить в виде T-образной модели баланса мощностей, состоящей из генерирующего (солнечная батарея), накапливающего (аккумуляторная батарея) и потребляющего (обобщённая нагрузка — Н) элементов, объединённых посредством блока ЭПА (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Т-образная модель баланса мощностей СЭС КА

**Figure 1.** T-shape model of the power balance for the spacecraft power supply

Представленная модель (рисунок 1) отображает четыре возможных режима передачи мощности через преобразователи блока ЭПА:

1) АБ не задействована, нагрузка питается только от СБ:

$$P_H = P_{CB1} \cdot \eta_{ЭПА1};$$

2) АБ заряжается избытком мощности СБ:

$$P_H = P_{CB1} \cdot \eta_{ЭПА1} - P_{CB2} \cdot \eta_{ЭПА2};$$

3) режим пиковой нагрузки — АБ компенсирует недостаток мощности СБ:

$$P_H = P_{CB1} \cdot \eta_{ЭПА1} + P_{AB} \cdot \eta_{ЭПА3};$$

4) теневой участок орбиты — нагрузка обеспечивается энергией, передаваемой только от АБ:  $P_H = P_{AB} \cdot \eta_{ЭПА3}$ ; где  $\eta_{ЭПА1} - \eta_{ЭПА3}$  — КПД каналов преобразования ЭПА СЭС КА;  $P_H$  — режимы передачи мощности через преобразователи блока ЭПА;  $P_{CB1} - P_{CB2}$  — мощность солнечных батарей;  $P_{AB}$  — мощность аккумуляторной батареи.

Блок ЭПА обладает рядом основополагающих функций и в зависимости от структуры СЭС содержит стабилизатор напряжения, шунтовой стабилизатор, зарядно-разрядные устройства АБ, а также устройство обмена информацией с бортовой ЭВМ. Таким образом, блок ЭПА являясь системообразующим эле-

ментом, который обеспечивает алгоритм работы СЭС КА, определяет надёжность функционирования космического аппарата в целом [9].

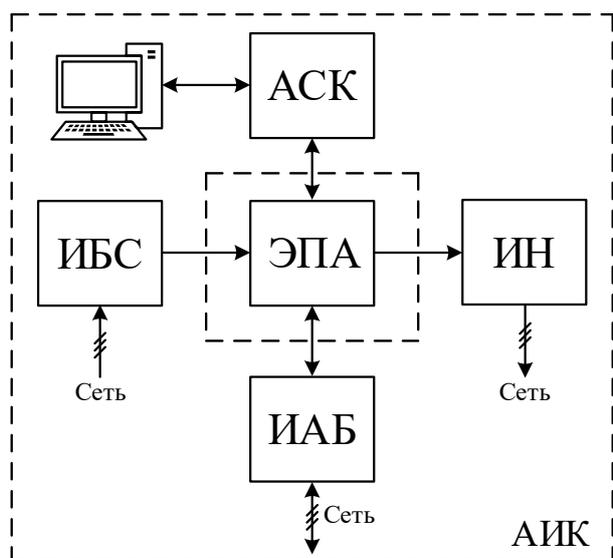
### Автоматизированный испытательный комплекс

В зависимости от типа рабочего места и соответствующего ему вида испытаний имитаторы элементов СЭС могут применяться как по отдельности, так и в составе испытательного комплекса. Для проведения комплексной наземной отработки ЭПА СЭС КА необходимо создание интегрированной испытательной площадки — автоматизированный испытательный комплекс (АИК) (рисунок 2). АИК является физической реализацией Т-образной модели баланса мощностей и состоит из имитаторов элементов СЭС КА, питающихся от промышленной трехфазной сети, управляющей ЭВМ и автоматизированной системы контроля, имитирующей формирование команд управления и обработки телеметрии, поступающей от блока ЭПА, а также необходимой для проведения проверок кабельной сети и сопротивления изоляции [10].

Структура АИК в общем виде остается постоянной, изменяются количество и типы имитаторов АБ и СБ, которые определяются мощностью и структурой СЭС, при этом функционал комплекса имитации нагрузки может расширяться дополнительными блоками формирования динамических режимов нагрузочных токов.

Основной вклад в эффективность испытательного комплекса в целом, вносят имитаторы элементов СЭС, приведенные на рисунке 2. Поэтому разработка и исследование структур ИЭ, их оптимизация, увеличение энергетических показателей, моделирование, определение общих подходов к проектированию и решению частных задач, являющихся свойством отдельной физической модели

элемента СЭС, представляют особый интерес [11].



**Рисунок 2.** Структура автоматизированного испытательного комплекса испытаний системы электроснабжения космического аппарата

**Figure 2.** The structure of the automated testing complex of the spacecraft power supply system tests

В настоящее время на всех этапах жизненного цикла сложных устройств находят применение их цифровые двойники. Они позволяют автоматизировать задачи функционального проектирования, процессы пуско-наладочных работ, испытаний, а также осуществляют контроль за работой сложного технического устройства во время его эксплуатации при воздействии на него различных внешних факторов [12].

### Структурно-функциональная схема цифрового двойника СЭС КА

Для автоматизации процесса проектирования и определения необходимых показателей качества функционирования СЭС КА предлагается использовать ее цифровой двойник, представленный на рисунке 3. Он реализуется в структуре многоуровневой компьютерной модели [13], состоящей из трёх взаимосвязанных

слоев. На ее визуальном уровне, представляющем собой графическую панель виртуальных инструментов и приборов [14], формируется интерфейс визуализации и интеллектуального управления, в который с логического уровня поступают данные для визуализации. На их основе пользователь формирует уставки, которые с помощью компонентов-регуляторов передаются на логический уровень, где из компонентов реализуются алгоритмы интеллектуального управления, включающие блоки обработки результатов. На логический уровень поступают данные с объектного уровня в виде значений переменных имитационных моделей блоков и элементов СЭС и данные измерения характеристик реальной системы [15]. На нем реализуются алгоритмы интеллектуального управления, в которые включены компоненты, взаимодействующие с базами данных внешних воздействий (температура, давление, влажность, радиация, вибрация и т.д.) и базами данных параметров объекта (эксплуатационные данные, данные о текущем состоянии и деградации параметров) и внутренних процессов, событий объекта (отклонение от нормы, аварийные ситуации). На объектном уровне располагается модель испытуемого объекта, представляющая собой либо модель полной СЭС, либо модели ее составных подсистем, значения параметров моделей которых пересчитываются в алгоритмах интеллектуального управления и передаются с логического уровня на объектный.

Данная модель представляет собой совокупность компонентов, каждый из которых описывается своей моделью в виде системы алгебро-дифференциальных уравнений. Универсальным вычислительным ядром, входящим в комплекс программ MAPC [16], путем опроса компонентов из компонентных и топологических уравнений формируется система алгебро-дифференциальных уравнений,

которая рассчитывается во временной области. В модели испытуемого объекта переменные, значения которых подлежат обработке и визуализации, помечаются компонентами-измерителями, передающими значения переменных анализируемой модели с объектного уровня на логический [17].

Таким образом, модель цифрового двойника моделирует работу испытательного стенда, данные с которого также передаются в базы данных параметров объекта (эксплуатационные данные, данные о текущем состоянии и деградации), внутренних процессов, событий объекта (отклонение от нормы, аварийные ситуации) и в базу знаний причин и последствий отклонений параметров и характеристик от номинальных (рабочих) значений, отклонений режимов работы стенда [18].

На логическом уровне многоуровневой модели также формируются управляю-

щие воздействия на испытуемый объект, которые передаются в управляющую ЭВМ, которая, в свою очередь, связана с испытательным стендом. В случае отклонения модельных данных от данных функционирования испытательного стенда в базу знаний причин и последствий отклонений параметров и характеристик от номинальных (рабочих) значений, отклонений режимов работы стенда заносится соответствующая информация, и пользователь-экспериментатор формирует причину отказа [19].

Пользователями разработанного цифрового двойника являются:

- сотрудники отдела проектирования, деятельность которых связана с выработкой рекомендаций по формированию и реализации стратегической политики предприятия, а также координации деятельности в этой области всех подразделений предприятия;

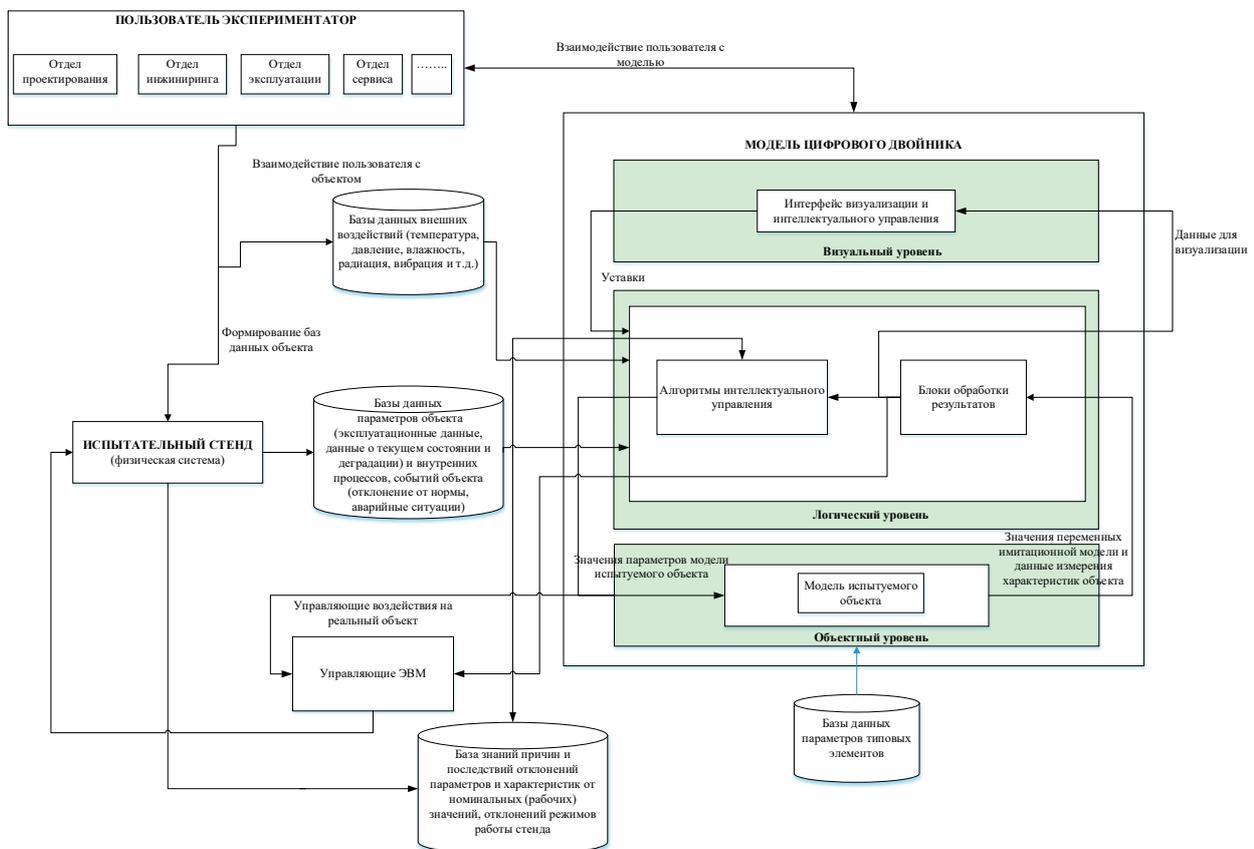


Рисунок 3. Структурно-функциональная схема цифрового двойника системы электроснабжения

Figure 3. Structural and functional diagram of the digital twin of the power supply system

— сотрудники отдела инжиниринга, занимающиеся проектной и практической работой в области инженерно-технической науки и необходимой для завершения строительства, и производства уникального проектного оборудования;

— сотрудники отдела эксплуатации, осуществляющие контроль за исправностью оборудования при проведении испытаний;

— сотрудники отдела сервиса, отвечающие за сбор и обработку технической информации, необходимой для решения вопросов, связанных с выпуском новых и совершенствованием существующих устройств [20].

### Выводы

Современные тенденции развития систем компьютерного моделирования

позволяют разрабатывать цифровые двойники технических и технологических объектов, обеспечивающие автоматизацию решения задач на всех этапах жизненного цикла объектов, начиная от их проектирования, заканчивая эксплуатацией и утилизацией.

В данной работе приведена структура цифрового двойника системы электропитания космического аппарата. С ее помощью автоматизируются задачи проектирования, разработки и наземных испытаний СЭС. Цифровой двойник представлен компьютерной моделью, реализованной в отечественной среде многоуровневого компьютерного моделирования MAPC. Он интегрирован в испытательный стенд системы электроснабжения путем взаимодействия с реальными базами данных и управляющей ЭВМ.

### Список источников

1. Юдинцев А.Г. Аппаратно-программные комплексы имитации систем электроснабжения космических аппаратов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1. Т. 17. С. 55–64.

2. Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с.

3. Винтоняк Н.П., Семенов В.Д., Тюнин С.С., Бородин Д.А., Шиняков Ю.А. Резервированная цифровая система автоматического регулирования автономного энергопреобразующего комплекса с реконфигурируемой иерархической структурой // Электронные средства и системы управления: матер. докл. Междунар. науч.-практ. конф. 2019. Т. 1. № 1–1. С. 141–144.

4. ТАСС. Ангольский телекоммуникационный спутник «Ангосат-1». Досье: портал. URL: <https://tass.ru/info/4847125> (дата обращения: 27.04.2022).

5. Sabanci K., Balci S. Development of an Expression for the Output Voltage Ripple of the DC-DC Boost Converter Circuits by Using Particle Swarm Optimization Algorithm // Measurement. 2020. No. 158. 107694. P. 1–9.

6. Володин Е.В., Осипов О.И. Экспериментальное исследование повышающего DC-DC-преобразователя // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3 (44). С. 47–52.

7. Keysight Technologies. Решения для моделирования спутниковых энергосистем: портал. URL: <https://www.keysight.com/ru> (дата обращения: 05.05.2022).

8. ESC Energy Supplies Group. Нагрузочные модули: портал. URL: <http://www.loadbank.ru/catalog> (дата обращения: 10.05.2022).

9. Школьный В.Н., Семенов В.Д., Кабиров В.А., Сухоруков М.П., Торгаева Д.С. Методика синтеза цифрового регулятора для канала преобразования энергии солнечной батареи в системе электропитания космического аппарата // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 1. С. 74–86.

10. Yuan Li, Taewon Lee, Fang Z. Peng, Dichen Liu. A Hybrid Control Strategy for Photovoltaic Simulator. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (дата обращения: 24.05.2022).

11. UCx846/7 Current Mode PWM Controller. URL: <http://www.ti.com/lit/gpn/uc3847> (дата обращения: 13.04.2019).

12. Ruan X., Chen W., Fang T. e.a. Control of Series-Parallel Conversion Systems. Beijing,

Science Press, Singapore Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 213 p.

13. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Зайченко Т.Н., Ганджа Т.В. МАРС — среда моделирования технических устройств и систем. Томск: В-Спектр, 2011. 277 с. ISBN 978-5-91191-220-1.

14. Дмитриев В.М., Шутенков А.В. Виртуальные лаборатории и программно-инструментальное обеспечение для их разработки // Компьютерные технологии в образовании / под ред. В.М. Дмитриева. 2001. Вып. 1. С. 86–94.

15. Thounthong P., Mungporn P., Guilbert D. e.a. Design and Control of Multiphase Interleaved Boost Converters-Based on Differential Flatness Theory for PEM Fuel Cell Multi-Stack Applications // *Electrical Power and Energy Systems*. 2020. No. 124 (2021) 106346. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106346.

16. Derbel N., Zhu Q. Modeling, Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 372 p.

17. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // Информатика и системы управления. 2013. № 2(36). С. 024–035. EDN QBCKJV.

18. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Дмитриев И.В. Компьютерное моделирование устройств и систем / Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. 293 с.

19. Thermal Software for Heat Sinks, Circuit Board, Enclosures, Boxes, Transformers, IC's, Power Transistors and Other Electronics Components [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.thermalsoftware.com/>, свободный (дата обращения: 22.01.2016).

20. Remes C.L., Goncalves da Silva G.R., Treviso A. e.a. Data-Driven Approach for Current Control in DC-DC Boost Converters // *IFAC PapersOnLine*. 2019. Vol. 52, Issue 1. P. 190–195. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.06.059.

## References

1. Yudinsev A.G. Apparato-programmnye komplekсы imitatsii sistem elektrosnabzheniya kosmicheskikh apparatov [Hardware and Software Complexes for Simulating Spacecraft Power Supply Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informa-*

*tsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 1, Vol. 17, pp. 55–64. [in Russian].

2. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft Power Supply Systems]. Novosibirsk, VO «Nauka». Sibirskaya izdatel'skaya firma, 1994. 318 p. [in Russian].

3. Vintonyak N.P., Semenov V.D., Tyunin S.S., Borodin D.A., Shinyakov Yu.A. Rezervirovannaya tsifrovaya sistema avtomaticheskogo regulirovaniya avtonomnogo energopreobrazuyushchego kompleksa s rekonfiguriruemoi ierarkhicheskoi strukturoi [Redundant Digital System of Automatic Regulation of an Autonomous Energy-Converting Complex with a Reconfigurable Hierarchical Structure]. *Materialy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya»* [Materials of International Scientific and Practical Conference «Electronic Means and Control Systems»]. 2019, Vol. 1, No. 1-1, pp. 141–144. [in Russian].

4. TASS. *Angol'skii telekommunikatsionnyi sputnik «Angosat-1»*. Dos' e: portal. [TASS. Angolan Telecommunications Satellite «Angosat-1». Dossier: Portal]. URL: <https://tass.ru/info/4847125> (accessed 27.04.2022). [in Russian].

5. Sabanci K., Balci S. Development of an Expression for the Output Voltage Ripple of the DC-DC Boost Converter Circuits by Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Measurement*, 2020, No. 158, 107694, pp. 1–9.

6. Volodin E.V., Osipov O.I. Eksperimental'noe issledovanie povyshayushchego DC-DC-preobrazovatelya [Experimental Study of a DC-Boosting DC Converter]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrical Systems and Complexes*, 2019, No. 3 (44), pp. 47–52. [in Russian].

7. Keysight Technologies. *Resheniya dlya modelirovaniya sputnikovykh energosistem: portal* [Keysight Technologies. Solutions for Modeling Satellite Power Systems: Portal]. URL: <https://www.keysight.com/ru> (accessed 05.05.2022). [in Russian].

8. ESC Energy Supplies Group. *Nagruzochnye moduli: portal* [ESC Power Supply Group. Load Modules: Port]. URL: <http://www.loadbank.ru/catalog> (accessed 10.05.2022).

9. Shkol'nyi V.N., Semenov V.D., Kabi-rov V.A., Sukhorukov M.P., Torgaeva D.S. Meto- dika sinteza tsifrovogo regulatora dlya kanala preobrazovaniya energii solnechnoi batarei v sisteme elektropitaniya kosmicheskogo apparata [Method of Synthesis of a Digital Controller for the Solar Battery Energy Conversion Channel in the Spacecraft Power Supply System]. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii — Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, Vol. 20, No. 1, pp. 74–86. [in Russian].
10. Yuan Li, Taewon Lee, Fang Z. Peng, Dichen Liu. *A Hybrid Control Strategy for Photo- voltaic Simulator*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (accessed 24.05.2022).
11. UCx846/7 Current Mode PWM Controller. URL: <http://www.ti.com/lit/gpn/uc3847> (accessed 13.04.2019).
12. Ruan X., Chen W., Fang T. e.a. *Control of Series-Parallel Conversion Systems*. Beijing, Science Press, Singapore Springer Nature Singa- pore Pte Ltd., 2019. 213 p.
13. Dmitriev V.M., Shutenkov A.V., Zai- chenko T.N., Gandzha T.V. *MARS — sreda modeli- rovaniya tekhnicheskikh ustroystv i system* [MARS — Environment for Modeling Technical Devices and Systems]. Tomsk, V-Spektr Publ., 2011. 277 p. ISBN 978-5-91191-220-1. [in Russian].
14. Dmitriev V.M., Shutenkov A.V. Virtual'- nye laboratorii i programmno-instrumental'noe obespechenie dlya ikh razrabotki [Virtual Labo- ratories and Software and Tools for Their Deve- lopment]. *Komp'yuternye tekhnologii v obra- zovanii* [Computer Technologies in Education]. Ed. by V.M. Dmitriev. 2001. Issue 1, pp. 86–94. [in Russian].
15. Thounthong P., Mungporn P., Guilbert D., e.a. Design and Control of Multiphase Interleaved Boost Converters-Based on Differential Flatness Theory for PEM Fuel Cell Multi-Stack Appli- cations. *Electrical Power and Energy Systems*, 2020, No. 124 (2021) 106346, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106346. [in Russian].
16. Derbel N., Zhu Q. *Modeling, Identi- fication and Control Methods in Renewable Energy Systems*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 372 p.
17. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. Printsip formirovaniya mnogourovnevykh komp'yut- ernykh modelei SCADA-sistem dlya upravleniya slozhnyimi tekhnologicheskimi ob"ektami [The Principle of Formation of Multilevel Computer Models of SCADA Systems for Managing Complex Technological Objects]. *Informatika i sistemy upravleniya — Informatics and Control Systems*, 2013, No. 2(36), pp. 024–035. EDN QBCKJV. [in Russian].
18. Dmitriev V.M., Shutenkov A.V., Dmit- riev I.V. *Komp'yuternoe modelirovanie ustroystv i sistem* [Computer Modeling of Devices and Sys- tems]. Tomskii gosudarstvennyi universitet sistem upravleniya i radioelektroniki. Tomsk, TML-Press Publ., 2010. 293 p. [in Russian].
19. *Thermal Software for Heat Sinks, Circuit, Board, Enclosures, Boxes, Transformers, IC's, Power Transistors and Other Electronics Com- ponents* [Electronic Resource]. URL: [http://www. thermalsoftware.com/](http://www.thermalsoftware.com/), svobodnyi (accessed 22.01.2016).
20. Remes C.L., Goncalves da Silva G.R., Treviso A. e.a. Data-Driven Approach for Current Control in DC-DC Boost Converters. *IFAC PapersOnLine*, 2019, Vol. 52, Issue 1, pp. 190–195. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.06.059.



**Константин Владимирович Важдаев**  
**Konstantin V. Vazhdaev**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия  
доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия



**Марат Абдуллоевич Ураксеев**  
**Marat A. Urakseev**

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



**Азамат Булякович Аллабердин**  
**Azamat B. Allaberdin**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия



**Константин Маратович Субханкулов**  
**Kostantin M. Subkhankulov**

магистрант кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

УДК 681.782.473

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-151-158

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ОТ СТОЯЧИХ УПРУГИХ ВОЛН

### Актуальность

В настоящее время широкое распространение получают оптоэлектронные приборы на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн. Это связано с тем, что такие приборы имеют небольшие размеры, позволяют производить измерения в реальном масштабе времени и обладают высокой точностью, быстродействием и надежностью. Обзор зарубежных патентов и научно-технической литературы показывает, что в Японии, США, ФРГ и других странах в последние годы ведутся интенсивные работы по созданию оптоэлектронных приборов в составе информационно-измерительных систем, основанных на использовании дифракционных решеток от стоячих упругих волн. Такие работы проводятся и в России. Сегодня оптоэлектронные приборы получили широкое распространение в различных областях промышленности, в медицине, экологии и т.п.

### Цель исследования

Обосновать перспективность исследований по разработке оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн. Необходимо рассмотреть физику процессов в области акустооптических взаимодействий. Важно при-

вести основные характеристики и возможные сферы применения оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн.

#### **Объекты исследования**

Световые и звуковые волны, взаимодействующие между собой при прохождении ими через одну и ту же среду, дифракционная решетка, оптоэлектронный прибор.

#### **Методы исследования**

Математические методы расчета и анализа.

#### **Результаты**

Сформулирована необходимость проведения исследований в области оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн. Показано, что при прохождении через одну и ту же среду световые и звуковые волны взаимодействуют друг с другом. Свет рассеивается на звуковой волне, как на дифракционной решетке. Предложены рекомендации по проектированию оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн. Рассмотрены возможные сферы применения оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн.

**Ключевые слова:** акустооптика, волны, модулятор, дифракционная решетка, оптоэлектронный прибор

## **OPTOELECTRONIC DEVICES BASED ON DIFFRACTION GRATINGS FROM STANDING ELASTIC WAVES**

### **Relevance**

Currently, optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves are widely used. This is due to the fact that such devices are small in size, allow real-time measurements and have high accuracy, speed and reliability. A review of foreign patents and scientific and technical literature shows that in Japan, the USA, Germany and other countries, intensive work has been carried out in recent years to create optoelectronic devices as part of information-measuring systems based on the use of diffraction gratings from standing elastic waves. Such work is also carried out in Russia. Today, optoelectronic devices are widely used in various fields of industry, medicine, ecology, etc.

### **Aim of research**

It is necessary to investigate the prospects of research on the development of optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves. It is necessary to consider the physics of processes in the field of acousto-optic interactions. It is important to give the main characteristics and possible applications of optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves.

### **Research objects**

Light and sound waves interacting with each other when they pass through the same medium, diffraction grating, optoelectronic device.

### **Research methods**

Mathematical methods of calculation and analysis.

### **Results**

The need for research in the field of optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves is formulated. It is shown that when passing through the same medium, light and sound waves interact with each other. Light is scattered on a sound wave, as on a diffraction grating. Recommendations for the design of optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves are proposed. Possible areas of application of optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves are considered.

**Keywords:** acousto-optics, waves, modulator, diffraction grating, optoelectronic device

## Введение

### *Актуальность научного исследования.*

В современной экономической ситуации в Российской Федерации требуется обеспечение ее обороноспособности, противодействие санкциям, создание конкурентоспособных технологий. К выпускаемой отечественной продукции предъявляются повышенные требования — к приборам, датчикам, системам и программно-аппаратным комплексам, основанным на различных физических эффектах и явлениях, с использованием новейших достижений в области информационных технологий.

В связи с этим представленная работа актуальна, т.к. она посвящена созданию современных оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток отстоящих упругих волн. Акустооптические модуляторы являются достаточно эффективными устройствами, обладающими высокими метрологическими характеристиками. При их правильной компоновке и расположении можно достичь быстродействия таких модуляторов примерно в 20 нс, т.е.  $20 \cdot 10^{-9}$  с [1–6].

### **Физика акустооптических процессов, происходящих в приборах на основе дифракционных решеток**

Световые и звуковые волны взаимодействуют между собой при прохождении ими через одну и ту же среду. Свет рассеивается на звуковой волне, точно также как на дифракционной решетке.

Физика данного процесса такова: акустическая волна, распространяющаяся в упругой среде, создает периодическое пространственно-временное распределение давления. В связи с этим происходит пространственно-временное изменение плотности и, соответственно, коэффициента преломления среды [7–18]. Световая волна, падающая на такую среду, рассеивается на разных коэффициентах прелом-

ления, в результате чего образуется дифракционное световое поле. Отклонение оптического пучка почти линейно зависит от частоты акустической волны, из чего следует, что световая картина, формируемая отклоненным лучом, соответствует Фурье-образу модуляции акустической волны. Взаимодействие такого типа делает возможным широкий круг обработки сигналов. Это явление широко используется при изучении оптических и упругих свойств различных материалов и может быть использовано для определения положения в пространстве подвижных объектов систем [19, 20].

В устройстве с бегущей (отсутствие акустического отражения, обеспечивающего режим бегущей волны, достигается применением поглотителя акустических колебаний — материала, в котором акустические волны быстро затухают) ультразвуковой волной интенсивность проходящего излучения можно модулировать, изменяя по необходимому закону мощность генератора частоты  $f_a$ . Частота модуляции, разумеется, должна быть ниже частоты  $f_a$ , а широкополосность модулятора обычно определяется свойствами электрострикционного преобразователя. Амплитудные акустооптические модуляторы описанного типа обладают меньшей широкополосностью, чем электрооптические модуляторы, однако основным их достоинством является сравнительно небольшая мощность, которая необходима для модуляции оптического излучения, а также малые оптические потери в таких модуляторах. В качестве сред, в которых будет распространяться ультразвуковая волна, могут выступать такие материалы, как кварц и некоторые типы стёкол. Анализ работы акустооптического модулятора с бегущей ультразвуковой волной показывает, что частота оптических колебаний в дифрагированных волнах отличается от частоты колебаний исходной волны на величину

$pf_a$  ( $p$  — порядок дифракции). Поэтому иногда такие акустооптические устройства используются для сдвига частоты полученных от лазера колебаний на определённую величину (необходимость в таком сдвиге частоты возникает, например, при гетеродинном приеме оптических сигналов).

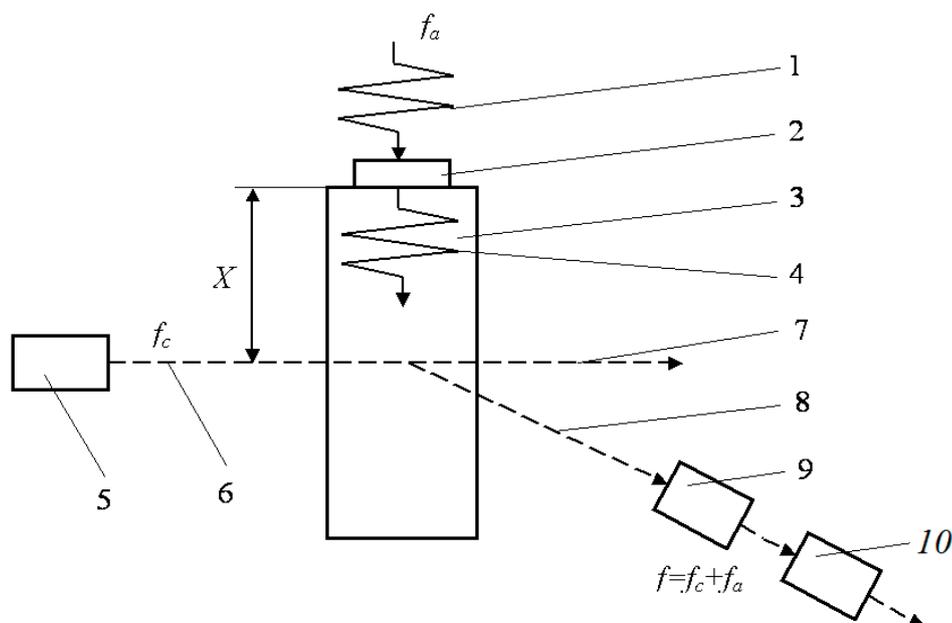
Если в модуляторе поглотитель акустических колебаний заменить на отражатель, то в среде появится стоячая ультразвуковая волна, которая образуется в результате интерференции прямой и отражённой волн. В таком устройстве волна нулевого порядка окажется модулированной по амплитуде с частотой  $2f_a$ , поскольку узлы и пучности стоячей волны образуются и исчезают дважды за период колебаний. Такие устройства данного типа могут использоваться для высокочастотной модуляции излучения на фиксированных или плавно изменяемых в небольшом диапазоне частотах, что необходимо, например, в геодезических фазовых светодальномерах. Благодаря небольшим оптическим потерям такие

устройства используются также в качестве внутрирезонаторных модуляторов для синхронизации мод в твердотельных и газовых лазерах.

Отклоненный луч первого порядка дифракции поступает на фотоприемник ФП, а затем с помощью электронной схемы ЭС преобразуется в выходное напряжение  $U_{вых}$ .

На рисунке 1 изображена функциональная схема оптоэлектронного прибора на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн, учитывающая лазерно-акустическую обработку сигналов.

Сигнал 1 с частотой  $f_a$  вводится в акустооптический модулятор (АОМ) 3 с помощью пьезоэлектрического преобразователя 2. Акустическая волна 4 перемещается по АОМ. Лазерный диод 5 излучает световую волну 6 с частотой  $f_c$ . Вследствие явления рассеяния света акустическими волнами сигнал накладывается на луч лазерного диода, который проходит сквозь АОМ, представляющий собой линию задержки.



**Рисунок 1.** Оптоэлектронный прибор на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн с лазерно-акустической обработкой сигнала

**Figure 1.** Optoelectronic device based on diffraction sieves from standing elastic waves with laser-acoustic signal processing

В результате на выходе позиции 3 появляются дифракционные лучи (дифракционные максимумы), равностоящие друг от друга и расположенные по обе стороны от прошедшего пучка света 7. Один из них 8, соответствующий первому порядку дифракции, попадает на светочувствительный слой фотоприемника.

Фотоприемник 9, который расположен в зоне первого дифракционного максимума, реагирует на интенсивность падающего на фоточувствительную поверхность оптического сигнала.

На выходе фотоприемника образуется сигнал задержки относительно опорного сигнала генератора высокой частоты в виде распределения амплитуд и фаз, который несет информацию об измеряемом перемещении подвижного объекта системы. С помощью электронного устройства обработки измеряемой информации 10 измеряют интервал задержки и получают информацию о конечном результате обработки в наглядном виде.

### **Рекомендации по проектированию оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн**

Многие ученые проводили исследования, которые направлены на выявление условий, когда наблюдается тот или иной вид дифракции. Однако когда в современной акустооптике заходит речь о критерии, разграничивающем дифракцию Рамана-Ната и Брэгга, в большинстве своем авторы делают ссылку на работы Клейна и Кука [21–24], в которых сделано обобщение результатов предыдущих работ. Согласно этой работе, вид дифракции определяется безразмерным параметром  $Q = \frac{2\pi \cdot b \cdot \lambda}{\Lambda^2}$ , где  $b$  — ширина АОМ (длина взаимодействия света с акустическим пучком).

При  $Q \ll b$  имеет место дифракция Рамана-Ната, а при  $Q \gg b$  — дифракция

Брэгга. Однако эти условия являются достаточно сильными, и практически дифракция Рамана-Ната наблюдается уже при  $Q \leq 0,3$ , а дифракция Брэгга — при  $Q \geq 4\pi$ .

### **Возможные сферы применения**

С учетом литературных источников возможными сферами применения систем контроля перемещений можно назвать станочное и технологическое оборудование [25–28], машиностроение, металлургию, самолетостроение, нефтяную промышленность и другие отрасли. В последние годы появились совершенно новые сферы контроля смещений, которые возникли в связи с созданием оптоволоконных измерительных систем, например, смещение деталей конструкций, при мониторинге и наблюдении за горными породами, горными тоннелями, мостами, железобетонными опорными конструкциями, металлическими арочными потолочными перекрытиями крупных сооружений (дворцов, стадионов, аквапарков и т.д.), при мониторинге состояния зданий и сооружений, построенных на горных участках с карстовыми пустотами, при контроле за положением объектов, построенных в сейсмоопасных регионах.

Так, например, это возможно было бы применить при построении длинных мостовых конструкций, военных объектов и в других сферах промышленности, в которых требуется мониторинг за состоянием сооружений.

### **Выводы**

Таким образом, могут быть сделаны следующие выводы.

1. В данной статье показана актуальность создания и практическая применимость оптоэлектронных устройств на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн.

2. Предложены рекомендации по проектированию оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн.

#### Список источников

1. Фрайден Дж. Современные датчики: пер. с англ. / Ю.А. Заболотная; под ред. Е.Л. Свицова. М.: Техносфера, 2005. 592 с. ISBN 5-94836-050-4.

2. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V., Sagadeev A.R. Analysis of the Main Components of the Error of Measuring Systems Based on Acousto-Optical Converters in an Interferometer // *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020*. 2020. С. 742–749, 9208137.

3. Важдяев К.В. Акустооптические устройства и их применение в приборах и информационно-измерительных системах // *Нефтегазовое дело*. 2012. Т. 10. № 1. С. 148–151.

4. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с. ISBN 978-5-94836-111-6.

5. Гонда С., Сэко Д. Оптоэлектроника в вопросах и ответах. М.: Радио и связь, 1990. 360 с.

6. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V. Information-Measuring Systems and Waveguides with Acousto-Optic Effect // *Eighteen World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation WCIS-2014*. Tashkent, 2014. P. 100–103.

7. Балакший В.И., Парыгин В.Н. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.

8. Окоши Т., Окамото К. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990. 256 с.

9. Oliveira R.A. Characterization and New Applications of the Acousto-Optic Effect in Fiber Gratings: Phd. Diss. Federal University of Technology — Parana, 2011. 182 p.

10. Taylor H.F. Bending Effects in Optical Fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 1984. Vol. LT-2. No. 5. P. 617–627.

11. Kim B.Y., Blake J.N., Engan H.E., Shaw H.J. All-fiber Acousto-Optic Frequency Shifter // *Optic Letters*. 1986. Vol. 11. No. 6. P. 389–391.

12. Birks T.A., Russel P.St.J., Culverhouse D.O. The Acousto-Optic Effect in Single-Mode Fiber Tapers and Couplers // *Journal of Lightwave Technology*. 1996. Vol. 14. No. 11. P. 2519–2529.

3. Рассмотрены возможные сферы применения оптоэлектронных приборов на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн.

13. Vazhdaev K.V., Urakseev M.A., Sagadeev A.R. Microcontroller Information-Measuring Systems on Bragg Gratings // *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Saint-Petersburg, 2019. P. 1–5.

14. Birks T.A., Russel P.St.J., Pannell C.N. Low Power Acousto-Optic Device Passed on a Tapered Single-Mode Fiber // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1994. Vol. 6. No. 6. P. 725–727.

15. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V., Sagadeev A.R. Sensor Based on Fiber Bragg Grating with Acousto-Optic Filter // *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon-2020*. 2020. P. 737–741, 9208060.

16. Zhao J., Liu X. Fiber Acousto-Optic Mode Coupling between the Higher-Order Modes with adjacent Azimuthal Numbers // *Optic Letters*. 2006. Vol. 31. No. 11. P. 1609–1611.

17. Liu W.F., Russel P.St.J., Dong L. Acousto-Optic Superlattice Modulator Using a Fiber Bragg Grating // *Optic Letters*. 1997. Vol. 22. No. 19. P. 1515–1517.

18. Russel P.St.J., Liu W.F. Acousto-Optic Superlattice Modulation in Fiber Bragg Grating // *Journal Optic Society of America*. 2000. Vol. 17. No. 8. P. 1421–1429.

19. Abrishamian F., Sato S., Imai M. A New Method of Solving Multimode Coupled Equations for Analysis of Uniform and Non-Uniform Fiber Bragg Grating and Its Application to Acoustically Induced Superstructure Modulation // *Optical Review*. 2005. Vol. 12. No. 6. P. 467–471.

20. Oliveira R.A., Neves P.T. Jr., Pereira J.T., Pohl A.P.P. Numerical Approach for Designing a Bragg Grating Acousto-Optics Modulator Using Finite Element and Transfer Matrix Methods. *Optic Communications*. 2008. Vol. 281. No. 19. P. 4899–4905.

21. Pohl A.A.P., Cook K., Canning J. Acoustic-Induced Modulation of Photonic Crystal Fiber Bragg Gratings // *Proceeding of the 10th International Conference on Transparent Optical Networks*, Athen, Greece. 2008. Vol. 2. P. 51–54.

22. James S.W., Tatam R.P. Optical Fiber Long Period Grating Sensors: Characteristics and

Application // Measurement Science and Technology. 2003. Vol. 14. No. 5. P. R49–R61.

23. Rego G., Marques P., Santos J., Salgado H. Arc-Induced Long-Period Grating // Fiber and Integrated Optics. 2005. Vol. 24. No. 3–4. P. 245–259.

24. Oliveira R.A., Posseti G.R.C., Marques C.A.F., Never P.T., Cook K., Kamikawachi R.C., e.a. Control of the Long-Period Grating Spectrum through Low Frequency Flexural Acoustic Waves // Measurement Science & Technology. 2011. Vol. 22. No. 4. P. 045205.

25. Kim H.S., Yun S.H., Kim H.K., Park N., Kim B.Y. Dynamic Erbium-Doped Fiber Amplifier Based on Active Gain-Flattening with Fiber Acousto-Optic Tunable Filters // IEEE Photonics Technology Letters. 2000. Vol. 12. No. 2. P. 176–178.

26. Liu W.F., Liu I.M., Chung L.W., Huang D.W., Yang C.C. Acoustic-Induced Switching of the Reflection Wavelength in a Fiber Bragg Grating // Optics Letters. 2000. Vol. 25. No. 18. P. 1319–1321.

27. Liu W.F., Tu P.J. Switchable Narrow-Bandwidth Comb Filters Based on an Acousto-Optic Superlattice Modulator in Sinc-Sampled Fiber Grating // Optical Engineering. 2001. Vol. 40. No. 8. P. 1513–1515.

28. Diez A., Delgado-Pinar M., Mora J., Cruz J.L., Andres M.V. Dynamic Fiber-Optic Add-Drop Multi-Plexer Using Bragg Grating and Acousto-Optic-Induced Coupling // IEEE Photonics Technology Letters. 2003. Vol. 15. No. 1. P. 84–86.

## References

1. Fraiden Dzh. *Sovremennye datchiki: per. s angl.* [Modern sensors: Transl. from English]. Yu.A. Zabolotnaya; under edition of E.L. Svintsov. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 592 p. ISBN 5-94836-050-4. [in Russian].

2. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V., Sagadev A.R. Analysis of the Main Components of the Error of Measuring Systems Based on Acousto-Optical Converters in an Interferometer. *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAuto-Con 2020*, 2020, pp. 742–749, 9208137.

3. Vazhdaev K.V. Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye v priborakh i informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh [Acousto Optics Devices and Their Using in the Units and Information-

Measuring Systems]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2012, Vol. 10, No. 1, pp. 148–151. [in Russian].

4. Jackson R.G. *Noveishie datchiki* [Latest Sensors.]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 384 p. ISBN 978-5-94836-111-6. [in Russian].

5. Gonda S., Seko D. Optoelektronika v voprosakh i otvetakh [Optoelectronics in Questions and Answers]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 360 p. [in Russian].

6. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V. Information-Measuring Systems and Waveguides with Acousto-Optic Effect. *Eighteen World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation WCIS-2014*. Tashkent, 2014, pp. 100–103.

7. Balakshii V.I., Parygin V.N. *Fizicheskie osnovy akustooptiki* [Physical Foundations of Acousto-Optics]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 280 p. [in Russian].

8. Okosi T., Okamoto K. *Volonnoopticheskie datchiki* [Fiber-Optic Sensors]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningradskoe otdeleniye, 1990. 256 p. [in Russian].

9. Oliveira R.A. *Characterization and New Applications of the Acousto-Optic Effect in Fiber Gratings: Phd. Diss.* Federal University of Technology — Parana, 2011. 182 p.

10. Taylor H.F. Bending Effects in Optical Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, Vol. LT-2, No. 5, pp. 617–627.

11. Kim B.Y., Blake J.N., Engan H.E., Shaw H.J. All-Fiber Acousto-Optic Frequency Shifter. *Optic Letters*, 1986, Vol. 11, No. 6, pp. 389–391.

12. Birks T.A., Russel P.St.J., Culverhouse D.O. The Acousto-Optic Effect in Single-Mode Fiber Tapers and Couplers. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, Vol. 14, No. 11, pp. 2519–2529.

13. Vazhdaev K.V., Urakseev M.A., Sagadev A.R. Microcontroller Information-Measuring Systems on Bragg Gratings. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Saint-Petersburg, 2019, pp. 1–5.

14. Birks T.A., Russel P.St.J., Pannell C.N. Low Power Acousto-Optic Device Passed on a Tapered Single-Mode Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, Vol. 6, No. 6, pp. 725–727.

15. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V., Sagadev A.R. Sensor Based on Fiber Bragg Grating with Acousto-Optic Filter. *Proceedings — 2020 Inter-*

- national Russian Automation Conference, RusAutoCon-2020*, 2020, pp. 737–741, 9208060.
16. Zhao J., Liu X. Fiber Acousto-Optic Mode Coupling between the Higher-Order Modes with Adjacent Azimuthal Numbers. *Optic Letters*, 2006, Vol. 31, No. 11, pp. 1609–1611.
17. Liu W.F., Russel P.St.J., Dong L. Acousto-Optic Superlattice Modulator Using a Fiber Bragg Grating. *Optic Letters*, 1997, Vol. 22, No. 19, pp. 1515–1517.
18. Russel P.St.J., Liu W.F. Acousto-Optic Superlattice Modulation in Fiber Bragg Grating. *Journal Optic Society of America*, 2000, Vol. 17, No. 8, pp. 1421–1429.
19. Abrishamian F., Sato S., Imai M. A New Method of Solving Multimode Coupled Equations for Analysis of Uniform and Non-Uniform Fiber Bragg Grating and Its Application to Acoustically Induced Superstructure Modulation. *Optical Review*, 2005, Vol. 12, No. 6, pp. 467–471.
20. Oliveira R.A., Neves P.T. Jr., Pereira J.T., Pohl A.P.P. Numerical Approach for Designing a Bragg Grating Acousto-Optics Modulator Using Finite Element and Transfer Matrix Methods. *Optic Communications*, 2008, Vol. 281, No. 19, pp. 4899–4905.
21. Pohl A.A.P., Cook K., Canning J. Acoustic-Induced Modulation of Photonic Crystal Fiber Bragg Gratings. *Proceeding of the 10th International Conference on Transparent Optical Networks, Athen, Greece*, 2008, Vol. 2, pp. 51–54.
22. James S.W., Tatam R.P. Optical Fiber Long Period Grating Sensors: Characteristics and Application. *Measurement Science and Technology*, 2003, Vol. 14, No. 5, pp. R49–R61.
23. Rego G., Marques P., Santos J., Salgado H. Arc-Induced Long-Period Grating. *Fiber and Integrated Optics*, 2005, Vol. 24, No. 3–4, pp. 245–259.
24. Oliveira R.A., Posseti G.R.C., Marques C.A.F., Never P.T., Cook K., Kamikawachi R.C., e.a. Control of the Long-Period Grating Spectrum through Low Frequency Flexural Acoustic Waves. *Measurement Science & Technology*, 2011, Vol. 22, No. 4, pp. 045205.
25. Kim H.S., Yun S.H., Kim H.K., Park N., Kim B.Y. Dynamic Erbium-Doped Fiber Amplifier Based on Active Gain-Flattening with Fiber Acousto-Optic Tunable Filters. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, Vol. 12, No. 2, pp. 176–178.
26. Liu W.F., Liu I.M., Chung L.W., Huang D.W., Yang C.C. Acoustic-Induced Switching of the Reflection Wavelength in a Fiber Bragg Grating. *Optics Letters*, 2000, Vol. 25, No. 18, pp. 1319–1321.
27. Liu W.F., Tu P.J. Switchable Narrow-Bandwidth Comb Filters Based on an Acousto-Optic Superlattice Modulator in Sinc-Sampled Fiber Grating. *Optical Engineering*, 2001, Vol. 40, No. 8, pp. 1513–1515.
28. Diez A., Delgado-Pinar M., Mora J., Cruz J.L., Andres M.V. Dynamic Fiber-Optic Add-Drop Multi-Plexer Using Bragg Grating and Acousto-Optic-Induced Coupling. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, Vol. 15, No. 1, pp. 84–86.

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Аллабердин Азамат Булякович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Афлятунов Радмир Рифович**

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

### **Аюпова Айгуль Рафисовна**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационной безопасности, Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал, Нефтекамск, Россия

### **Вавилов Вячеслав Евгеньевич**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

### **Важдаев Константин Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия; доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

### **Васильев Петр Игоревич**

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

### **Гамисония Гиорги Кахаберович**

магистрант Уфимской высшей школы экономики и управления, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Ганджа Тарас Викторович**

доктор технических наук, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

### **Глазырин Александр Савельевич**

доктор технических наук, профессор, отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

### **Димукашева Гульназ Ержановна**

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

### **Дмитриев Вячеслав Михайлович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

---

**Дубинин Никита Максимович**

аспирант, младший научный сотрудник лаборатории системного проектирования и автоматического расчета систем кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

**Зайченко Татьяна Николаевна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

**Зекрин Булат Ринатович**

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

**Зюзов Анатолий Михайлович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия

**Зыкин Павел Витальевич**

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

**Исмагилов Флюр Рашитович**

доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Кириллов Роман Вячеславович**

доцент базовой кафедры «Электроэнергетика и электротехнологии» в составе «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Косарев Борис Андреевич**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Линьков Сергей Александрович**

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

**Лисовская Татьяна Александровна**

старший преподаватель кафедры «Электротехника», Московский политехнический университет, Москва, Россия

**Лопатеева Ольга Николаевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

---

**Маклаков Александр Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Управление научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Накатаев Антон Андреевич**

инженер кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия

**Нестеров Константин Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия

**Николаев Александр Аркадьевич**

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

**Пенкин Илья Александрович**

магистрант кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет» (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

**Сафина Гульнара Фриловна**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического моделирования и информационной безопасности, Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал, Нефтекамск, Россия

**Сафиуллин Рузил Ахнафович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технических дисциплин, Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал, Нефтекамск, Россия

**Соловьев Богдан Алексеевич**

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

**Сорокин Александр Владимирович**

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

**Стрельников Дмитрий Сергеевич**

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

**Субханкулов Константин Маратович**

магистрант кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Текле Самуэль Исаак**

аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия

---

**Ураксеев Марат Абдуллович**

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

**Федосов Евгений Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Хазиева Регина Тагировна**

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

**Халиков Альберт Рашитович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Хамитов Рустам Нуриманович**

доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники, Омский государственный университет, Омск, Россия

**Шабанов Виталий Алексеевич**

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

**Шулаева Екатерина Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет» (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

**Юдинцев Антон Геннадьевич**

кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

**Юрова Ангелина Дмитриевна**

магистрант кафедры информационно-управляющих систем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

**Янгиров Ильгиз Флюсович**

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Aflyatunov Radmir R.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Allaberdin Azamat B.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Water Supply and Sanitation Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Ayupova Aygul R.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the of Mathematical Modeling and Information Security Department, Ufa University of Science and Technology, Neftekamsk branch, Neftekamsk, Russia

### **Dimukasheva Gulnaz E.**

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Dmitriev Vyacheslav M.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Computer Systems in Management and Design Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

### **Dubinik Nikita M.**

Graduate Student, Junior Researcher of Computer Systems in Management and Design Department, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russia

### **Fedosov Evgeniy M.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

### **Gamisonia Giorgi K.**

Undergraduate Student of Ufa Higher School of Economics and Management, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Gandzha Taras V.**

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor of Computer Systems in Management and Design Department, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russia

### **Glazyrin Aleksandr S.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Electric Power and Electrical Engineering Department, Engineering School of Energy, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

### **Ismagilov Fluyr R.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

### **Khalikov Albert R.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

---

**Khamitov Rustam N.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State University, Omsk, Russia

**Khazieva Regina T.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Kirillov Roman V.**

Assistant Professor of Base Department «Electric Power Engineering and Electrotechnology» as a part of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Kosarev Boris A.**

Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer of Electric Equipment Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Linkov Sergey A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Lisovskaya Tatiana A.**

Senior Lecturer of Electrical Engineering Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

**Lopateeva Olga N.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Computer Science and Computer Engineering Department, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

**Maklakov Alexander S.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Research and Innovation Services, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Nakataev Anton A.**

Engineer of Department of Electric Drive and Automation of Technological Complexes, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

**Nesterov Konstantin Ye.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Department of Electric Drive and Automation of Technological Complexes, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

**Nikolaev Aleksandr A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Penkin Ilya A.**

Undergraduate Student of Automatic Technology and Information Systems Department, Institute of Chemical Technology and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Sterlitamak, Russia

---

**Safina Gulnara F.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Mathematical Modeling and Information Security Department, Ufa University of Science and Technology, Neftekamsk Branch, Neftekamsk, Russia

**Safiullin Ruzil A.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Technical Disciplines Department, Ufa University of Science and Technology, Neftekamsk branch, Neftekamsk, 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

**Shulaeva Ekaterina A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automatic Technology and Information Systems Department, Institute of Chemical Technology and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Sterlitamak, Russia

**Solovev Bogdan A.**

Undergraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Sorokin Alexander V.**

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Strelnikov Dmitry S.**

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Subkhankulov Kostantin M.**

Undergraduate Student of Water Supply and Sanitation Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Tekle Samuel I.**

Postgraduate Student of Department of Electric Drive and Automation of Technological Complexes, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

**Urakseev Marat A.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Vasilyev Petr I.**

Postgraduate Student, Assistant of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Vavilov Vyacheslav E.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

---

**Vazhdaev Konstantin V.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Water Supply and Sanitation of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia; Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Yangirov Ilgiz F.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Yudintsev Anton G.**

Candidate of Engineering Sciences, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russia

**Yurova Angelina D.**

Undergraduate Student of Information and Control Systems Department, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

**Zaichenko Tatiana N.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Computer Systems in Management and Design Department, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russia

**Zekrin Bulat R.**

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Zykin Pavel V.**

Postgraduate Student of Electric Power Engineering, Heat Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

**Zyuzev Anatoliy M.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Department of Electric Drive and Automation of Technological Complexes, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

## СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАНЫХ В 2022 ГОДУ

*Андреев А.А.* Моделирование переходного процесса в распределительной сети 10 кВ при однофазном замыкании на землю, № 2, с. 5–12.

*Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Каекбирдина И.Д., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т.* Разработка схемы и моделирование резонансного трансформатора на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, № 2, с. 13–20.

*Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т.* Исследование фильтрокомпенсирующей функции многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе системы индукционного нагрева, № 1, с. 95–106.

*Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т.* Разработка эффективного устройства для электрогидроимпульсной обработки водных растворов, № 3–4, с. 5–12.

*Баширова Э.М., Жаринов Ю.А., Терентьев А.А.* Применение нейронных сетей для решения задач прогнозирования технического состояния электроэнергетического оборудования, № 2, с. 21–31.

*Беляев А.С., Филипас А.А., Курганов В.В., Поберезкин Н.И.* Четырехтрехосовая система обезвешивания с управлением по вектору силы, № 2, с. 98–106.

*Буньков Д.С.* Алгоритм предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором по кривой затухания фазного тока, № 1, с. 5–23.

*Важдаев К.В., Ураксеев М.А., Аллабердин А.Б., Субханкулов К.М.* Оптоэлектронные приборы на основе дифракционных решеток от стоячих упругих волн, № 3–4, с. 151–158.

*Димукашева Г.Е., Зекрин Б.Р., Кириллов Р.В., Стрельников Д.С., Хазиева Р.Т.* Анализ устойчивости частотно-регулируемого асинхронного привода магистрального насосного агрегата, № 3–4, с. 13–22.

*Железняк А.А.* Алгоритм функционирования типовой ветви автоматизированной информационной системы регулирования, № 1, с. 123–130.

*Зайцева А.А., Дудаев Н.О., Зайцев Е.А., Кильмаков Д.К.* Высокопроизводительный вычислительный комплекс для интеллектуальной транспортной системы, № 2, с. 107–120.

*Зайцева А.А., Дудаев Н.О., Щербаков К.В.* Микропроцессорная система автоматического управления средствами противопожарной защиты самолета, № 1, с. 131–142.

*Зиненко А.И., Каримов Н.А.* Анализ способов проектирования структурированных кабельных систем, № 2, с. 121–127.

*Игнатенко И.В., Власенко С.А., Пухова А.И., Казакул А.А.* Внедрение программного продукта по определению аварийно допустимых токов в линиях электропередачи, № 1, с. 24–32.

*Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Вавилов В.Е., Халиков А.Р., Федосов Е.М., Сафина Г.Ф., Аюпова А.Р.* Электропривод со сложной геометрией вторичного элемента, № 3–4, с. 35–44.

*Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А., Аюпова А.Р., Сафина Г.Ф.* Импульсный высоковольтный источник напряжения на базе двухспирального магнитокумулятивного генератора с улучшенными характеристиками, № 3–4, с. 23–34.

*Кича Е.И., Михайленко В.С., Маловик Д.С., Кича М.А.* Метод заливки электронных изделий герметиком ВИКСИНТ У-1-18, № 1, с. 143–153.

---

*Ковалев В.З., Хусаинов Э.И., Балыклов Е.С., Архипова О.В., Хамитов Р.Н., Глазырин А.С.* Цифровой двойник погружного электродвигателя на основе методов планирования эксперимента, № 2, с. 32–44.

*Колесников С.В., Леонов А.П.* Надёжность изоляции статорных обмоток частотно-управляемых электродвигателей, № 1, с. 33–62.

*Косарев Б.А.* Феррорезонансные перенапряжения в электроустановках 6–220 кВ: теория и результаты экспериментальных исследований, № 3–4, с. 45–55.

*Косарев Б.А.* Феррорезонансные процессы в системах электроснабжения с распределенной генерацией, № 3–4, с. 56–64.

*Крымский В.Г., Ахмеджанов Ф.М.* Использование интервальных моделей неопределенностей для оценки надежности человека-оператора с помощью метода SLIM, № 2, с. 128–138.

*Ле Ван Тунг, Данг Нгок Хюу, До Чи Тхань, Буй Чунг Кьен.* Повышение коэффициента мощности и уменьшение гармоник тока источника питания в системе электропривода конвейеров, № 2, с. 63–72.

*Лопатеева О.Н., Юрова А.Д.* Разработка обучающей системы для подготовки специалистов по приему и пуску очистных устройств, № 3–4, с. 101–107.

*Ляхомский А.В., Шадрин А.А.* Прогнозная модель электропотребления на основе полносвязной нейронной сети, № 1, с. 107–113.

*Маклаков А.С., Николаев А.А., Лисовская Т.А., Линьков С.А.* Возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством высокоомощного рекуперативного электропривода переменного тока, № 3–4, с. 65–74.

*Накатаев А.А., Текле С.И., Зюзев А.М., Нестеров К.Е.* Испытательный стенд для моделирования режимов работы электропривода штанговой глубинной насосной установки, № 3–4, с. 75–88.

*Раков И.В.* Экспериментальное исследование работоспособности методики адаптивной идентификации электрических параметров асинхронной машины с разомкнутой обмоткой ротора в установившемся режиме на основе баланса мощностей, № 1, с. 63–76.

*Сарбасова Н.Д., Умурзакова А.Д., Кладиев С.Н.* Применение тахогенератора и регулируемого электропривода для замены механического управляющего канала для синхронно-следящих сортировочных устройств круглого леса, № 1, с. 154–167.

*Сибгатуллин Р.Р.* Информационная система для развития инновационной среды Компании, № 2, с. 139–147.

*Сираев Ф.Ф., Хазиева Р.Т.* Исследование частотно-регулируемого электропривода с асинхронным электродвигателем, № 2, с. 45–51.

*Соловьев Б.А., Гамисония Г.К.* Методы прогнозирования мощности ветра для шельфовых ветроэлектростанций, № 3–4, с. 108–120.

*Сорогин А.С., Хамитов Р.Н., Глазырин А.С.* Модель энергоэффективной солнечной панели, работающей при повышенных температурах окружающей среды, № 1, с. 77–87.

*Сорокин А.В., Шабанов В.А.* Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью, № 2, с. 52–62.

---

*Сухачев И.С., Сидоров С.В., Сушков В.В., Антропова В.Р.* Разработка модели прогнозирования технического состояния нефтепромыслового энергомеханического оборудования с применением искусственной нейронной сети, № 1, с. 88–94.

*Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С.* Синтез пропорционально-интегрально-дифференциальной системы управления продольной подачи токарного станка с числовым программным управлением, № 3–4, с. 121–131.

*Шабанов В.А., Басырова А.А., Кантюков Н.Р.* Оценка устойчивости синхронных двигателей в плоскости двух углов, № 2, с. 73–81.

*Шабанов В.А., Рахимбердина А.А., Яникиев И.И.* К вопросу об определении электрических нагрузок трансформаторных подстанций, № 1, с. 114–122.

*Шабанов В.А., Сорокин А.В.* Признаки поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю, № 3–4, с. 89–100.

*Шулаева Е.А., Павлов В.Б.* Разработка виртуального производства на примере узла разделения пентан-гексановой фракции, № 1, с. 168–174.

*Шулаева Е.А., Пенкин И.А.* Разработка цифрового двойника узла сероочистки углеводородного сырья, № 3–4, с. 132–140.

*Юдинцев А.Г., Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Зайченко Т.Н., Дубинин Н.М.* Структурно-функциональная схема цифрового двойника испытательного комплекса системы электроснабжения космических аппаратов на основе многоуровневой компьютерной модели, № 3–4, с. 141–150.

*Яшин А.Н., Бодылев А.С., Хазиева Р.Т., Хакимьянов М.И.* Лабораторная установка для исследования применения возобновляемых источников энергии, № 2, с. 82–97.

---

## LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2022

- Aflyatunov R.R., Vasilyev P.I., Kaekbirdina I.D., Kirillov R.V., Khazieva R.T.* Development of the circuit and simulation of a resonant transformer based on a multifunctional integrated electromagnetic component, № 2, p. 13–20.
- Aflyatunov R.R., Vasilyev P.I., Kirillov R.V., Khazieva R.T.* Development of an efficient device for electrohydro-pulsed processing of aqueous solutions, № 3–4, p. 5–12.
- Aflyatunov R.R., Vasilyev P.I., Kirillov R.V., Khazieva R.T.* Study of the filter-compensating function of a multifunctional integrated electromagnetic component as a part of the induction heating system, № 1, p. 95–106.
- Andreev A.A.* Simulation of a transient process in a 10 kV distribution network with a single-phase earth fault, № 2, p. 5–12.
- Bashirova E.M., Zharinov Yu.A., Terentyev A.A.* Application of neural networks for solving problems of forecasting technical conditions electric power equipment, № 2, p. 21–31.
- Belyaev A.S., Filipas A.A., Kurganov V.V., Poberezkin N.I.* Four-rope suspension system with force vector control, № 2, p. 98–106.
- Bunkov D.S.* Off-line estimation algorithm of squirrel-cage induction machine equivalent circuit parameters by a falling phase current curve, № 1, p. 5–23.
- Dimukasheva G.E., Zekrin B.R., Kirillov R.V., Strelnikov D.S., Khazieva R.T.* Analysis of stability of a the variable-frequency drives of the main pumps, № 3–4, p. 13–22.
- Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pukhova A.I., Kazakul A.A.* Implementation of a software product for the determination of emergency permissible currents in power lines, № 1, p. 24–32.
- Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Safiullin R.A., Ayupova A.R., Safina G.F.* High-voltage pulse generator based on dual-spiral magnetic accumulation generator with improved characteristics, № 3–4, p. 23–34.
- Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Vavilov V.E., Khalikov A.R., Fedosov E.M., Safina G.F., Ayupova A.R.* Electric drive with a complex geometry of the secondary element, № 3–4, p. 35–44.
- Khamitov R.N., Zykin P.V., Glazyrin A.S.* Synthesis of proportional-integral-differential control system for longitudinal feed of CNC lathe, № 3–4, p. 121–131.
- Kicha E.I., Mikhailenko V.S., Malovik D.S., Kicha M.A.* Method of filling electronic products with VIKSINT U-1-18 sealant, № 1, p. 143–153.
- Kolesnikov S.V., Leonov A.P.* Reliability problems of frequency-controlled electric motors, № 1, p. 33–62.
- Kosarev B.A.* Ferroresonance overvoltages in electrical installations 6–220 kV: theory and results of experimental studies, № 3–4, p. 45–55.
- Kosarev B.A.* Ferroresonant processes in power supply systems with distributed generation, № 3-4, p. 56–64.
- Kovalev V.Z., Husainov E.I., Balyklov E.S., Arhipova O.V., Khamitov R.N., Glazyrin A.S.* Digital twin of a submersible electric motor based on design of experiments methods, № 2, p. 32–44.
- Krymsky V.G., Akhmedzhanov F.M.* Application of interval models of uncertainties to assessing human operator reliability by SLIM method, № 2, p. 128–138.

---

*Le Van Tung, Dang Ngoc Huy, Do Chi Thanh, Bui Trung Kien.* Improving the power factor and reducing the harmonics of the power supply current in the electric drive system of conveyors, № 2, p. 63–72.

*Lopateeva O.N., Yurova A.D.* Development of a training system for personnel in the launch and reception of cleaning devices, № 3–4, p. 101–107.

*Lyakhomsky A.V., Shadrin A.A.* Power consumption forecasting based on fully connected feed-forward neural networks, № 1, p. 107–113.

*Maklakov A.S., Nikolaev A.A., Lisovskaya T.A., Linkov S.A.* Reactive power compensation using a high-power regenerative AC drive, № 3–4, p. 65–74.

*Nakataev A.A., Tekle S.I., Ziuzev A.M., Nesterov K.Ye.* Test bench for simulating operation modes of sucker rod pump electric drive, № 3–4, p. 75–88.

*Rakov I.V.* Experimental research method of adaptive estimation parameters open wound-rotor induction motor in a steady state mode, № 1, p. 63–76.

*Sarbasova N.D., Umurzakova A.D., Kladiev S.N.* The use of a tachogenerator and an adjustable electric drive to replace the mechanical control channel for synchronous-tracking sorting devices for round timber, № 1, p. 154–167.

*Shabanov V.A., Basyrova A.A., Kantyukov N.R.* Assessment of the stability of synchronous motors in the plane of two angles, № 2, p. 73–81.

*Shabanov V.A., Rakhimberdina A.A., Yanikiev I.I.* On the issue of determining the electrical loads of transformer substations, № 1, p. 114–122.

*Shabanov V.A., Sorokin A.V.* Features of a faulty phase at single phase-to-ground faults, № 3–4, p. 89–100.

*Shulaeva E.A., Pavlov V.B.* Development of virtual production on the example of a pentane-hexane fraction separation unit, № 1, p. 168–174.

*Shulaeva E.A., Penkin I.A.* Development of digital twin of the unit for sulfur removal of hydrocarbons, № 3–4, p. 132–140.

*Sibagatullin R.R.* Information system for the development of the innovative environment of the Company, № 2, p. 139–147.

*Siraev F.F., Khazieva R.T.* Investigation of a frequency-regulatory electric drive with asynchronous electric motor, № 2, p. 45–51.

*Solovev B.A., Gamisonia G.K.* Wind power prediction methods for shelf wind power plants, № 3–4, p. 108–120.

*Sorogin A.S., Khamitov R.N., Glazyrin A.S.* Model of energy-efficient solar panel operating at high ambient temperatures, № 1, p. 77–87.

*Sorokin A.V., Shabanov V.A.* Algorithm for determining the damaged phase during a single-phase earth fault in networks with an isolated neutral, № 2, p. 52–62.

*Sukhachev I.S., Sidorov S.V., Sushkov V.V., Antropova V.R.* Development of a model for forecasting the technical condition of oil-field power-mechanical equipment using an artificial neural network, № 1, p. 88–94.

*Vazhdaev K.V., Urakseev M.A., Allaberdin A.B., Subkhankulov K.M.* Optoelectronic devices based on diffraction gratings from standing elastic waves, № 3–4, p. 151–158.

---

*Yashin A.N., Bodylev A.S., Khazieva R.T., Khakimyanov M.I.* Laboratory facility for studying the application of renewable energy sources, № 2, p. 82–97.

*Yudintsev A.G., Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Zaichenko T.N., Dubinin N.M.* Structural and functional diagram of the digital twin of the test complex of the spacecraft power supply system based on a multi-level computer model, № 3–4, p. 141–150.

*Zaitseva A.A., Dudayev N.O., Shcherbakov K.V.* Microprocessor system for automatic control of aircraft fire protection means, № 1, p. 131–142.

*Zaitseva A.A., Dudaev N.O., Zaitsev E.A., Kilmakov D.K.* High-performance computing complex for intelligent transport system, № 2, p. 107–120.

*Zhelezniak A.A.* Functioning algorithm of a typical branch of automated information regulation system, № 1, p. 123–130.

*Zinenko A.I., Karimov N.A.* Analysis of methods for designing structured cable systems, № 2, p. 121–127.

## **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 5 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.**