

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 1, т. 19, 2023

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

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

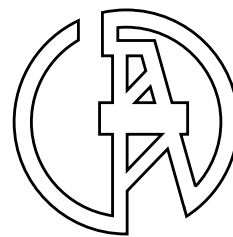
- 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки),
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы (технические науки),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



## Electrical and data processing facilities and systems

№ 1, т. 19, 2023

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 1, т. 19, 2023

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

## Учредитель

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

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 авиации и аэронавтики»  
(г. Нанкин, Китай)



А. Вахеда — 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. Зицмане — 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. Сагтаров — 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.ugues.ru](http://www.ugues.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, 2023.

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: 06.04.2023 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18.95.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 40.

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.

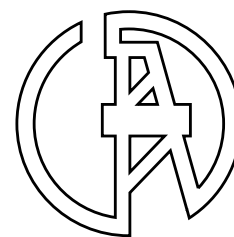
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

№ 1, v. 19, 2023

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

## Founder

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

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, 2023.

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 06.04.2023 Paper format 60×84/8. Offset printing. 18.95 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 40.

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>Сидоров А. В., Сушков В. В., Сидоров С. В., Сухачев И. С.</i> Влияние резонансных явлений на технический ресурс асинхронных электродвигателей при импульсных перенапряжениях	5
<i>Ревякин Е. Е., Сушков В. В., Хамитов Р. Н.</i> Исследование совместной работы автономной газотурбинной электростанции и генерирующего узла с возобновляемыми источниками электроэнергии	14
<i>Раков И. В.</i> Динамическая идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме	24
<i>Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Саттаров Р. Р., Копытин И. И.</i> Оптимизация конструктивных параметров электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами	49
<i>Ярыш Р. Ф., Чернявская И. А., Гарифуллина А. Р.</i> Эффективность применения автоматических установок компенсации реактивной мощности в нефтепромысловых электрических сетях	58
<i>Кириллов Р. В., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И., Хазиева Р. Т.</i> Исследование повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента	68
<i>Кириллов Р. В., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И., Хазиева Р. Т.</i> Моделирование электромагнитных процессов в фильтрокомпенсирующем устройстве в составе системы заряда емкостного накопителя	82
<i>Гильманов Э. А.</i> Способы и современные устройства плавного пуска высоковольтных двигателей	93
<i>Янгиров И. Ф., Лобанов А. В., Халиков А. Р.</i> Двухспиральный магнитокумулятивный источник сверхсильных магнитных полей	106
<i>Соловьев Б. А., Бодылев А. С., Павлов А. Д., Каекбирдина И. Д.</i> Анализ перспектив развития геотермальной энергетики	117
<i>Петков Р. Э., Ишемгузин А. И.</i> Обратнойходовой преобразователь с быстродействующей схемой управления	125

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Баязитов Ф. А., Юсупова Ю. Р., Филиппов В. Н., Альмухаметов А. А.</i> Удаленный доступ к мобильному роботу	135
<i>Шулаева Е. А., Маринич А. А.</i> Разработка системы мониторинга безопасности информационной среды предприятия	144
<b>Об авторах</b>	156

---

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Sidorov A. V., Sushkov V. V., Sidorov S. V., Sukhachev I. S.</i> Influence of resonance phenomena on the technical resource of asynchronous machines at impulse overvoltages	5
<i>Revyakin E. E., Sushkov V. V., Khamitov R. N.</i> Research on cooperative working of isolated gas-turbine power plant and renewable energy sources generation node	14
<i>Rakov I. V.</i> Dynamic estimation parameters of the elimination circuit of induction motor on the basis of instant full power balance in a steady-state mode	24
<i>Charykov V. I., Evdokimov A. A., Sattarov R. R., Kopytin I. I.</i> Optimization of design parameters of an electromagnetic separator with permanent magnets	49
<i>Yarysh R. F., Chernyavskaya I. A., Garifullina A.R.</i> Efficiency of application of automatic power factor correction units in oilfield electric networks	58
<i>Kirillov R. V., Afiyatunov R. R., Vasilyev P. I., Khazieva R. T.</i> Investigation of a DC voltage booster converter based on a multifunctional integrated electromagnetic component	68
<i>Kirillov R. V., Afiyatunov R. R., Vasilyev P. I., Khazieva R. T.</i> Simulation of electromagnetic processes in the filter-compensator device as part of the charging system of the capacitive storage	82
<i>Gilmanov E. A.</i> Methods and modern devices for soft start of high voltage motors	93
<i>Yangirov I. F., Khalikov A. R., Lobanov A. V.</i> Double-spiral magnetic-cumulative source of super strong magnetic fields	106
<i>Solovev B. A., Bodylev A. S., Pavlov A. D., Kaekbirdina I. D.</i> Analysis of geothermal power engineering and development prospects	117
<i>Petkov R. E., Ishemgugin A. I.</i> Reverse-pass converter with a high-speed control circuit	125

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

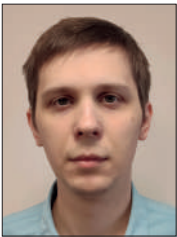
<i>Bayazitov F. A., Yusupova J. R., Filippov V. N., Almukhametov A. A.</i> Remote access to mobile robot	135
<i>Shulaeva E. A., Marinich A. A.</i> Development of an enterprise information environment security monitoring system	144
<b>About the authors</b>	156

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-5-13

## ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕСУРС АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ



**Алексей Владимирович Сидоров**  
*Alexei V. Sidorov*

аспирант кафедры электроэнергетики,  
 Тюменский индустриальный университет,  
 Тюмень, Россия



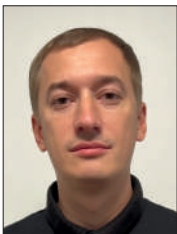
**Валерий Валентинович Сушков**  
*Valery V. Sushkov*

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика»,  
 Нижневартровский государственный университет, Нижневартовск, Россия;  
 профессор кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет,  
 Тюмень, Россия



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

старший преподаватель кафедры электроэнергетики,  
 Тюменский индустриальный университет,  
 Тюмень, Россия



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

кандидат технических наук, доцент,  
 доцент кафедры электроэнергетики,  
 Тюменский индустриальный университет,  
 Тюмень, Россия

### Актуальность

Работа посвящена оценке влияния импульсных перенапряжений на входе питающего кабеля на технический ресурс асинхронных электродвигателей как способа решения проблемы отказа электрооборудования, связанного со сработкой его ресурса.

### Цель исследования

Снижение аварийности асинхронных электродвигателей путём мониторинга их технического состояния и реализации риск-ориентированного обслуживания электроустановок при воздействии импульсных перенапряжений.

### Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, изоляция, технический ресурс, кабельная линия, ограничитель перенапряжений, резонанс, импульсные перенапряжения

**Методы исследования**

В работе использовано имитационное моделирование асинхронного электродвигателя, питающего кабеля, грозового воздействия и нелинейного ограничителя перенапряжений; применен Фурье-анализ.

**Результаты**

Разработана имитационная модель участка системы электроснабжения электродвигателей с установленными нелинейными ограничителями перенапряжений в ячейках трансформаторной подстанции. Получен спектральный состав входного напряжения и тока асинхронного электродвигателя в зависимости от длины кабельной линии. Выполнена оценка технического ресурса асинхронного электродвигателя на основе осциллограмм напряжений и токов на его вводе и соответствующей величины энергии, передаваемой его изоляции при импульсных перенапряжениях.

**Для цитирования:** Сидоров А. В., Сушков В. В., Сидоров С. В., Сухачев И. С. Влияние резонансных явлений на технический ресурс асинхронных электродвигателей при импульсных перенапряжениях // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. № 1. Т. 19. С. 5-13. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-5-13>.

Original article

## INFLUENCE OF RESONANCE PHENOMENA ON THE TECHNICAL RESOURCE OF ASYNCHRONOUS MACHINES AT IMPULSE OVERVOLTAGES

**The relevance**

The work is devoted to assessing the impulse overvoltages effect at the input of the supply cable on the asynchronous machines technical resource as a solution to the electrical equipment failure problem caused by the resource loss.

**Aim of research**

Reducing the asynchronous machines accident rate by monitoring their technical condition and the implementation of electrical equipment risk-based maintenance during impulse overvoltages.

**Research methods**

The asynchronous electric motor, a supply cable, lightning effects and surge arrester simulation modeling was used; Fourier analysis was applied.

**Results**

The simulation model of electric motor supply system section with installed surge arrestors in transformer substation cells was developed. Spectral composition of input voltage and current of asynchronous machine depending on cable line length was obtained. Assessment of technical resource of asynchronous machine based on voltages and currents oscillograms on its input and the related value of energy transmitted to its insulation during impulse overvoltages was realized.

**Ключевые слова**

asynchronous machine, insulation, technical resource, cable line, surge arrester, resonance, impulse overvoltages

**For citation:** Sidorov A.V., Sushkov V.V., Sidorov S.V., Sukhachev I.S. Vliyaniye rezonansnykh yavleniy na tekhnicheskiy resurs asinkhronnykh elektrodvigatelay pri impul'snykh perenapryazheniyakh [Influence of Resonance Phenomena on the Technical Resource of Asynchronous Machines at Impulse Overvoltages]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 5-13 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-5-13>.

Известно, что существенное влияние на изоляцию электроустановок оказывают перенапряжения, для снижения которых в большинстве случаев устанавливаются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) на подходах трансформаторных подстанций 35/6(10) и 6(10)/0,4 кВ и в их распределительных устройствах [1–3]. При этом высоковольтные электродвигатели обладают наименьшим запасом электрической прочности [4] по сравнению с другими видами электрооборудования. Однако, как показывает статистика [5], сохраняется высокий уровень отказов изоляции электродвигателей, поэтому актуальна задача оценки уровня перенапряжения электродвигателя и изменения его остаточного ресурса в зависимости от спектрального состава [6] напряжения и тока при импульсных воздействиях и изменения параметров: питающего кабеля, наличия ОПН.

С целью снижения аварийности асинхронных электродвигателей путём мониторинга их технического состояния и реализации риск-ориентированного обслуживания электроустановок при воздействии импульсных перенапряжений необходимо решить следующие задачи:

1. проанализировать уровни перенапряжений до и после установки ОПН в условиях резонансных явлений в системе электроснабжения асинхронных электродвигателей при импульсных перенапряжениях;

2. исследовать осциллограммы напряжений и токов на вводе асинхронного электродвигателя при импульсных перенапряжениях в зависимости от наличия ОПН в ячейке трансформаторной подстанции и длины питающего кабеля;

3. оценить изменение остаточного ресурса асинхронного электродвигателя по параметрам рабочего режима при импульсных перенапряжениях, вызывающих резонансные явления в его схеме электроснабжения.

Кабельная линия — длинная линия с распределёнными параметрами, содержащая рассредоточенные по длине индуктивности и ёмкости, обмен реактивной энергией между которыми является физической основой резонанса. На вход кабельной линии подаётся импульсное воздействие (грозовое, коммутационное), которое представляет собой совокупность гармонических составляющих, для каждой из которых в кабельной линии возможен резонансный режим. Согласно методу наложения с помощью волновых уравнений [7] для каждой гармонической составляющей импульсного воздействия рассчитывается выходное напряжение кабельной линии, а затем результаты суммируются. При резонансе напряжений, возникающем на определённой гармонической составляющей, на конце кабельной линии, подключённом к асинхронному электродвигателю, формируется перенапряжение, которое в ряде случаев может превышать рабочее напряжение [8, 9].

Группа электродвигательной нагрузки, подключённая к питающей шине трансформаторной подстанции, представляет собой единую электрическую систему без гальванических развязок, что способствует распространению энергии импульсного воздействия и развития перенапряжений на вводах нескольких электродвигателей. Это приводит к необходимости анализа спектрального состава входного напряжения и тока каждого подключённого к питающей шине электродвигателя и соответствующего выбора устройств защиты от перенапряжений [9, 10].

Объект исследования обозначен на принципиальной схеме электроснабжения конечных потребителей, приведённой на рисунке 1 и содержащей шину напряжением 10 кВ, защитные устройства (выключатели Q1-4, ОПН FV1-3), питающий кабель КЛ1-3 марки ПвБП 3×50/16, асинхронные электродвигатели



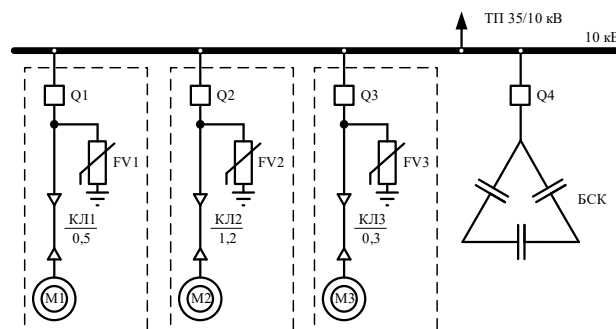
М1-3 марки ВАО4-710-2500/10-2 и батарею статических конденсаторов (БСК). Допустимые варианты установки ОПН в системе электроснабжения перечислены в [4, 6, 10].

Математическое описание асинхронного электродвигателя М1, подключенного к шине напряжением 10 кВ питающим кабелем КЛ1, выполнено с учетом ряда допущений: электродвигатель исправен и оказывает на шину симметричную нагрузку; питающий кабель исправен и имеет одинаковые электрические параметры жил; импульсное воздействие вызывает идентичные перенапряжения в каждой фазе системы электроснабжения конечных потребителей.

На основании изложенных допущений достаточно исследовать переходные процессы в одной произвольной фазе асинхронного электродвигателя и питающего кабеля в соответствии с математическим описанием, приведённом в работах авторов [11].

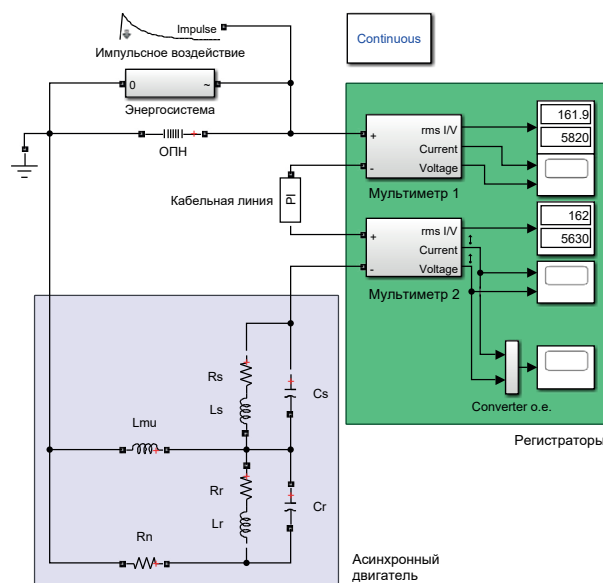
Таким образом, с учётом принятых допущений разработана в программной среде MATLAB Simulink имитационная модель объекта исследования, схема которой приведена на рисунке 2.

Алгоритм расчёта напряжений и токов на вводе асинхронного электродвигателя при импульсных перенапряжениях с применением имитационной модели заключается в следующем.



**Рисунок 1.** Принципиальная схема электроснабжения конечных потребителей, включающая объект исследования

**Figure 1.** Circuit of power supply to loads, including the research object



**Рисунок 2.** Схема имитационной модели объекта исследования

**Figure 2.** Research object simulation model scheme

1. Параметры источника питания заносятся в блок *Энергосистема*: класс напряжения питающей шины 10 кВ и внутреннее сопротивление.

2. Параметры кабельной линии, моделируемой однофазной длинной линией с распределёнными параметрами [11], заносятся в блок *Кабельная линия*: длина, основная частота, погонные сопротивление, индуктивность и ёмкость в соответствии с паспортными параметрами кабеля марки ПвБП 3 × 50/16.

3. Заносятся параметры однофазной высокочастотной схемой замещения [12] высоковольтного асинхронного электродвигателя.

4. Параметры грозового воздействия приняты согласно ГОСТ Р МЭК 62305-12010 и СО 153-34.21.122-2003 и заносятся в блок *Импульсное воздействие*: максимум тока 200 кА, постоянная времени для фронта 19 мкс, постоянная времени для спада 485 мкс, коэффициент, корректирующий значение максимума тока 0,93.

5. Технические параметры нелинейного ограничителя перенапряжений заносятся в блок *ОПН* согласно паспортным данным: коэффициенты аппроксимации вольтамперной характеристики  $I(U) = I_{\text{пр}}(U/U_{\text{пр}})^a$  в соответствии с [13], где  $U_{\text{пр}}$  — защитное напряжение,  $I_{\text{пр}}$  — опорный ток.

6. Посредством встроенного инструмента Linear Analysis Tools производится построения осциллограмм напряжений и токов на вводе асинхронного электродвигателя, диаграммы спектрального состава тока и напряжения на конце кабельной линии при указанном импульсном воздействии.

7. Вычисленные временные функции напряжений и токов сохраняются модулем вывода информации в файл в виде массива данных *Регистраторов*.

Отметим, что в общем случае вместо параметров грозового воздействия в блок

*Импульсное воздействие* могут заносятся результаты регистрации мгновенных значений фазных напряжений и тока приборами контроля качества и учёта электроэнергии, подключённых к питающей шине 10 кВ.

Для оценки изменения остаточного ресурса асинхронного электродвигателя по параметрам рабочего режима при импульсных перенапряжениях, сопровождающихся резонансными явлениями, предложен метод [8, 10, 12], сущность которого заключается в следующем. Во-первых, согласно математическому описанию схемы замещения изоляции асинхронного электродвигателя [12] при известных напряжениях и токах, сохранённых в массиве данных *Регистраторов*, вычисляется по закону Джоуля-Ленца энергия  $W$ , рассеиваемая изоляцией электродвигателя:

$$W = r \int_0^T i^2 dt, \quad (1)$$

где  $r$  — сопротивление изоляции, учитывающее процессы абсорбции;

$T$  — период колебаний тока  $i(t)$ .

Далее вычисляется изменение его ресурса  $\Delta R$  согласно выражению:

$$\Delta R = \frac{W}{W_0} N, \quad (2)$$

где  $N$  — количество импульсов, передающих изоляции энергию  $W$ ;

$W_0$  — минимальная энергия, приводящая к разрушению изоляции [8].

При этом остаточный ресурс изоляции асинхронного электродвигателя при импульсных перенапряжениях, сопровождающихся резонансными явлениями, определяется выражением:

$$\Delta R = 1 - \sum_k \frac{W_k N_k}{W_0}, \quad (3)$$

где  $k$  — номер воздействия на изоляцию электродвигателя.

Разработанная имитационная модель объекта исследования содержит блоки регистраторов, которые позволяют полу-

читать осциллограммы напряжений (рисунок 3) и токов (рисунок 4) при импульсных перенапряжениях и рассчитать их

спектральный состав (рисунок 5) в зависимости от длины кабельной линии и наличия ОПН.

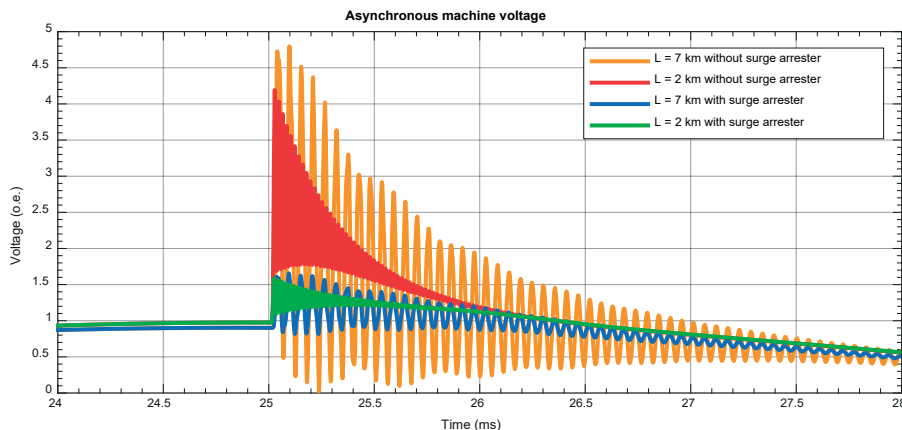


Рисунок 3. Осциллограммы напряжений на вводе асинхронного электродвигателя

Figure 3. Voltages oscillograms on the asynchronous machine input

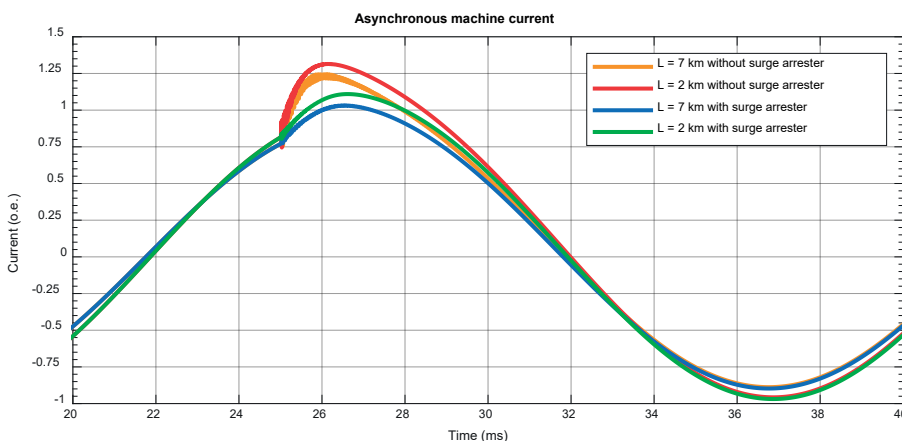


Рисунок 4. Осциллограммы токов на вводе асинхронного электродвигателя

Figure 4. Current oscillograms on the asynchronous machine input

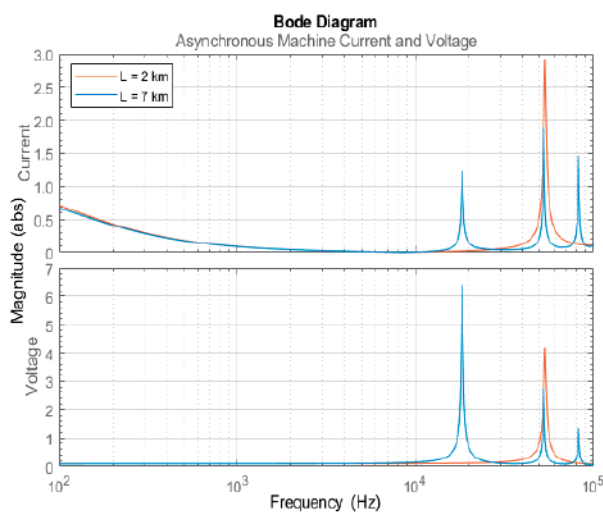


Рисунок 5. Спектральный состав тока и напряжения на конце кабельной линии

Figure 5. Current and voltage spectral composition at cable line end

Изначально имитационная модель работает в нормальном установившемся режиме. Спустя 25 мс на питающие шины подается импульсное воздействие, приводящее к возникновению переходного процесса, записанного блоками *Регистраторов*.

Анализ переходных процессов показал следующее:

1. до установки ОПН при длинах кабельной линии 7 км и 2 км перенапряжение составляет 4,7 о.е. и 4,2 о.е. соответственно, после уставки ОПН в ячейках трансформаторной подстанции перенапряжения при тех же длинах кабельной линии снизились до 1,7 о.е. и 1,6 о.е. соответственно;

2. до установки ОПН вследствие перенапряжения при длинах кабельной линии 7 км и 2 км бросок тока составляет 1,25 о.е. и 1,35 о.е. соответственно, после установки ОПН — 1,05 о.е. и 1,25 о.е. соответственно.

В результате установки ОПН в ячейках трансформаторной подстанции, перенапряжение на вводе электродвигателя снизилось на ~ 64 %, бросок тока снизился на ~ 16 %, что привело согласно формуле (3) к сокращению расхода технического ресурса электродвигателя на ~ 21 %.

Анализ спектрального состава тока и напряжения на конце кабельной линии показал, что с увеличением длины кабельной линии происходит расшире-

ние спектра напряжения и тока в область более низких частот, что приводит к изменению максимального напряжения, которое необходимо учитывать при выборе ОПН.

Практическая реализация мероприятий по оценке изменения остаточного ресурса асинхронного электродвигателя по параметрам рабочего режима позволяет реализовать основные принципы риск-ориентированного обслуживания электродвигателей и корректировать сроки вывода в ремонт, что способствует снижению аварийных выходов из строя асинхронных электродвигателей.

### Вывод

Разработана имитационная модель участка системы электроснабжения электродвигателей с установленными нелинейными ограничителями перенапряжений в ячейках трансформаторной подстанции.

Получен спектральный состав входного напряжения и тока асинхронного электродвигателя в зависимости от длины кабельной линии.

Выполнена оценка технического ресурса асинхронного электродвигателя на основе осциллограмм напряжений и токов на его вводе и соответствующей величины энергии, передаваемой его изоляции при импульсных перенапряжениях.

### Список источников

1. Халилов Ф.Х., Гольдштейн В.Г., Колычев А.В. Ограничители перенапряжений для защиты изоляции электрооборудования и линий сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения от грозных и внутренних перенапряжений. М.: Энергоатомиздат, 2010. 264 с.

2. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. СПб: Энергоатомиздат, 2002. 271 с.

3. Valsalal P., Usa S., Udayakumar K., Sankaranarayanan V. Study of Importance of Line

Entrance Arrester for a Composite Transmission Circuit // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. 2002. Vol. 2, No. ASIA PACIFIC. P. 694–698.

4. Пат. 2655948 РФ, МПК G 01 R 31/00. Устройство регистрации, идентификации перенапряжений и оценки остаточного ресурса изоляции погружных электродвигателей / В.В. Сушков, И.С. Сухачев. 2017109534, Заявлено 21.03.2017; Опубл. 30.05.2018 Бюл. № 16.

5. Бурков А.Ф., Катаев Е.В., Кувшинов Г.Е., Чупина К.В. Анализ надёжности электродвигателей, используемых в современных электроприводах // Электроника и электротехника. 2017. № 1. С. 1–6.
  6. Дмитриев М.В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. 91 с.
  7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2014. 701 с.
  8. Сушков В.В., Тимошкин В.В., Сухачев И.С., Сидоров С.В. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 10. С. 74–80.
  9. Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabinsky S.M. Mathematical Modelling of Failures of Electrical Grid (10 kV) of Autonomous Energy Systems with Renewable Distributed Generation // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018. Vol. 329, No. 7. P. 116–130.
  10. Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С. Оценка влияния различных способов и аппаратов защиты от импульсных перенапряжений в электрической сети напряжением 6–10 кВ нефтяных промыслов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 6. С. 50–58. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2126.
  11. Сухачев И.С., Сидоров С.В., Сушков В.В. Совершенствование защиты от импульсных перенапряжений в системе «Трансформатор — питающий кабель — погружной электродвигатель» // Промышленная энергетика. 2017. № 9. С. 7–12.
  12. Сухачев И.С., Сидоров С.В., Сушков В.В. Методика оценки энергии, воздействующей на изоляцию электрооборудования нефтяной скважины при импульсных перенапряжениях // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 87–91.
  13. Bedoui S., Bayadi A. Probabilistic Evaluation of the Substation Performance under Incoming Lightning Surges // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 162. P. 125–133. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.05.011.
- References**
1. Khalilov F.Kh., Gol'dshtein V.G., Kolychev A.V. *Ogranichiteli perenapryazheniy dlya zashchity izolyatsii elektrooborudovaniya i linii setey srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy* [Surge Arresters for Protecting the Insulation of Electrical Equipment and Lines of Medium, High and Extra High Voltage Networks from Lightning and Internal Overvoltages]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2010. 264 p. [in Russian].
  2. Khalilov F.Kh., Evdokunin G.A., Polyakov V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV Networks against Surges]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 2002. 271 p. [in Russian].
  3. Valsalal P., Usa S., Udayakumar K., Sankaranarayanan V. Study of Importance of Line Entrance Arrester for a Composite Transmission Circuit. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2002, Vol. 2, No. ASIA PACIFIC, pp. 694–698.
  4. Sushkov V.V., Sukhachev I.S. *Ustroystvo registratsii, opredeleniye perenapryazheniya i otsenka ostatochnogo rezerva pogruzhnykh elektrodvigateley* [Device for Registration, Identification of Overloads and Estimation of Residual Resource of Insulation of Submersible Electric Motors]. Patent No. 2655948 RF, 2018. [in Russian].
  5. Burkov A.F., Kataev E.V., Kuvshinov G.E., Chupina K.V. *Analiz nadozhnosti elektrodvigateley, ispol'zuyemykh v sovremennykh elektroprivodakh* [Reliability Analysis of Electric Motors Used in Modern Electric Drives]. *Elektronika i elektrotehnika — Electronics and Electrical Engineering*, 2017, No. 1, pp. 1–6. [in Russian].
  6. Dmitriev M.V. *Primenenie OPN dlya zashchity izolyatsii VL 6-750 kV*. [The Use of Surge Arresters to Protect the Insulation of 6-750 kV Overhead Lines]. Saint-Petersburg, Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta, 2009. 91 p. [in Russian].
  7. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektricheskiye tsepi* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits]. Moscow, Yurayt Publ., 2014. 701 p. [in Russian].
  8. Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. *Otsenka ostatochnogo resursa izolyatsii pogruzhnogo elektrodvigatelya ustanovok elektricheskikh tsentrobezhnykh nasosov dobychi nefi pri vozdeystviyakh impul'snykh perenapryazheniy* [Evaluation of Submersible Electric Motor Insulation Residual Resource in Oil Production Electric Centrifugal Pumps under the Influence of Impulse Overvoltages]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, Vol. 328, No. 10, pp. 74–80. [in Russian].

9. Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabin-sky S.M. Mathematical Modelling of Failures of Electrical Grid (10 kV) of Autonomous Energy Systems with Renewable Distributed Generation. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, Vol. 329, No. 7, pp. 116–130. [in Russian].

10. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. *Otsenka vliyaniya razlichnykh sposobov i apparatov zashchity ot impul'snykh perenapryazheniy v elektricheskoy seti napryazheniyem 6–10 kV neftyanykh promyslov* [Estimation of the Effect of Various Methods and Devices of Impulse Over-voltage Protection in the Oil Field Electric Network 6–10 kV]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, Vol. 330, No. 6, pp. 50–58. [in Russian]. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2126. [in Russian].

11. Sukhachev I.S., Sidorov S.V., Sushkov V.V. *Sovershenstvovaniye zashchity ot impul'snykh perenapryazheniy v sisteme «Transformator — pitayushchiy kabel' — pogruzhnoy elektrodvigatel'»* [Improving Surge Protection in the «Transformer — Supply Cable — Submersible Motor» System]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Power Engineering*, 2017, No. 9, pp. 7–12. [in Russian].

12. Sukhachev I.S., Sidorov S.V., Sushkov V.V. *Metodika otsenki energii, vozdeystvuyushchey na izolyatsiyu elektrooborudovaniya neftyanoy skvazhiny pri impul'snykh perenapryazheniyakh* [Methodology for Estimating the Energy Affecting the Insulation of the Electrical Equipment of an Oil Well under Impulse Overvoltages]. *Omskiy nauchnyy vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2017, No. 6 (156), pp. 87–91. [in Russian].

13. Bedoui S., Bayadi A. Probabilistic Evaluation of the Substation Performance under Incoming Lightning Surges. *Electric Power Systems Research*, 2018, Vol. 162, pp. 125–133. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.05.011.

*Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 16.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.*

*The article was submitted 10.02.2023; approved after reviewing 16.02.2023; accepted for publication 20.02.2023.*

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-14-23

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ГЕНЕРИРУЮЩЕГО УЗЛА С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Егор Евгеньевич Ревякин****Egor E. Revyakin**

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

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

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Энергетика»,  
Нижегородский государственный университет,  
Нижегород, Россия

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

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

### Актуальность

Политика энергоперехода подразумевает увеличение доли возобновляемых источников электроэнергии относительно классического генерирующего оборудования. Совершенно иной подход к способу генерирования электроэнергии посредством установок возобновляемой энергетики обуславливает изменение характера переходных процессов в электроэнергетических системах во время аварийных режимов. Как правило, при исследовании подобных вопросов авторы рассматривают параллельную работу возобновляемых источников с мощной электроэнергетической системой, а также не учитывают особенности работы приводных двигателей генераторов электростанций. В данной работе исследование проводится в изолированной электроэнергетической системе, где мощность возобновляемых источников сопоставима с мощностью классического генерирующего оборудования. Для получения адекватных результатов учитываются модель приводного двигателя синхронного генератора и система его управления, настроенная в соответствии с действующими требованиями и стандартами.

### Ключевые слова

возобновляемые источники  
электроэнергии,  
инверторный источник  
напряжения,  
изолированная  
электроэнергетическая  
система, система  
управления,  
газотурбинная  
электростанция

**Цель исследования**

Исследовать влияние возобновляемых источников электроэнергии на режимы работы автономной газотурбинной электростанции во время аварийных возмущений.

**Методы исследования**

Исследование проводится методом математического имитационного моделирования в ПК Matlab/Simulink.

**Результаты**

Анализ переходных процессов при различных возмущениях в исследуемой электроэнергетической системе показал, что устойчивая работа автономной электростанции возможна при установленной мощности возобновляемых источников электроэнергии, не превышающей 60 % от резерва мощности ведущего генератора электростанции.

**Для цитирования:** Ревакин Е. Е., Сушков В. В., Хамитов Р. Н. Исследование совместной работы автономной газотурбинной электростанции и генерирующего узла с возобновляемыми источниками электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 14-23. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-14-23>.

Original article

## RESEARCH ON COOPERATIVE WORKING OF ISOLATED GAS-TURBINE POWER PLANT AND RENEWABLE ENERGY SOURCES GENERATION NODE

**The relevance**

The installed capacity of renewable energy sources increases annually relative to the total installed capacity. Features of work inherent in renewable energy installations modify the nature of transient processes in electric power systems during emergency modes. A number of authors, when studying the operation of renewable sources as part of the energy system, consider the parallel operation of renewable sources with a powerful electric power system, and also do not take into account the drive motors of power plant generators. In this paper, the study of transient processes is carried out in an isolated electric power system with renewable energy sources, the power of which is comparable to the power of classical generators. This work is dedicated to the study of transient processes in an isolated electric power system with renewable energy sources, the power of which is comparable to the power of classical generators. The research takes into account the model of a synchronous generator drive motor and its control system, configured in accordance with applicable requirements and standards.

**Aim of research**

The main aim of the research is to assess the impact of renewable energy sources on the operating modes of an isolated gas turbine power plant during emergency disturbances.

**Research methods**

To achieve the main aim of the research the method of the simulation mathematical modeling in Matlab/Simulink was used.

**Results**

During the research, a number of curves were obtained that characterize the operating modes of an isolated power system during an emergency process. The analysis of these curves has showed that the stable operation of the power plant is possible with the installed capacity of renewable energy sources not exceeding 60 % of the power reserve of the power plant's lead generator.

**Ключевые слова**

renewable energy sources, inverter voltage source, isolated electric power system, control system, gas-turbine power plant



**For citation:** Revyakin E. E., Sushkov V. V., Khamitov R. N. Issledovanie sovmestnoi raboty avtonomnoi gazoturbinoi elektrostantsii i generiruyushchego uzla s vobnovlyaemyimi istochnikami elektroenergii [Research on Cooperative Working of Isolated Gas-Turbine Power Plant and Renewable Energy Sources Generation Node]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 14-23 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-14-23>.

## Введение

Продолжающаяся политика декарбонизации энергетического сектора обуславливает увеличение спроса на электроэнергию, произведённую возобновляемыми источниками электроэнергии (ВИЭ). Так, в соответствии с приказом Минэнерго России № 146, установленная мощность ВИЭ (без учета гидроэлектростанций) будет постепенно увеличиваться с 2 % в 2022 году до 4 % в 2028 году относительно общей установленной мощности всех электростанций [1]. Ввиду этого структура электроэнергетической системы (ЭЭС) будет претерпевать трансформацию, а ВИЭ станут заметной её частью.

С ростом числа внедряемых установок ВИЭ неизбежно появление участков ЭЭС, в которых генерация электроэнергии, осуществляемая этими установками, соизмерима с генерацией, осуществляемой классическими источниками. Такими участками могут быть энергообъединения в пределах одного промышленного предприятия параллельно работающей классической электростанции малой или средней мощности с установками на базе ВИЭ.

Для сопряжения установок ВИЭ с электрической сетью используются DC/AC преобразователи на базе силовой электроники — инверторные источники напряжения (ИИН). Ряд исследований посвящен параллельной работе ИИН с ЭЭС. В работе [2] исследуется влияние объектов солнечной энергетики на устойчивость ЭЭС с учетом настройки автоматических регуляторов возбуждения генераторов, а в работе [3] рассматривается влияние объектов ВИЭ на величину

токов короткого замыкания в ЭЭС. В приведенных работах ИИН подключается к шинам мощной ЭЭС. В работе [4] исследуется влияние величины коэффициентов усиления регуляторов блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) системы управления (СУ) ИИН на протекание переходных процессов (ПП) в ЭЭС. В качестве тестовой ЭЭС используется двухмашинная ЭЭС с отпайкой на ИИН, однако не уделяется внимание моделированию приводного двигателя синхронного генератора и его СУ, а также не учитывается общее первичное регулирование частоты.

В данной работе проводится исследование влияния объектов ВИЭ на протекание ПП в изолированной ЭЭС при возникновении коротких замыканий в ЭЭС. Особое внимание уделяется моделированию динамических моделей элементов ЭЭС и настройки их регуляторов с учетом действующих требований и стандартов.

## Тестовая ЭЭС

Схема электроснабжения тестовой ЭЭС представлена на рисунке 1.

В данной ЭЭС три синхронных генератора автономной электростанции работают на общие шины 10,5 кВ, от которых получают питание потребители. Такие ЭЭС характерны для нефтегазовых месторождений. Для того чтобы определить влияние ВИЭ на протекание ПП в системе, один из генераторов заменяется на узел с ИИН при аналогичной нагрузке (на тестовой схеме это осуществляется путём переключения ключа из положения 1 в положение 2). Таким образом будут сравниваться ПП в ЭЭС из трёх синхронных генераторов с ПП в ЭЭС из

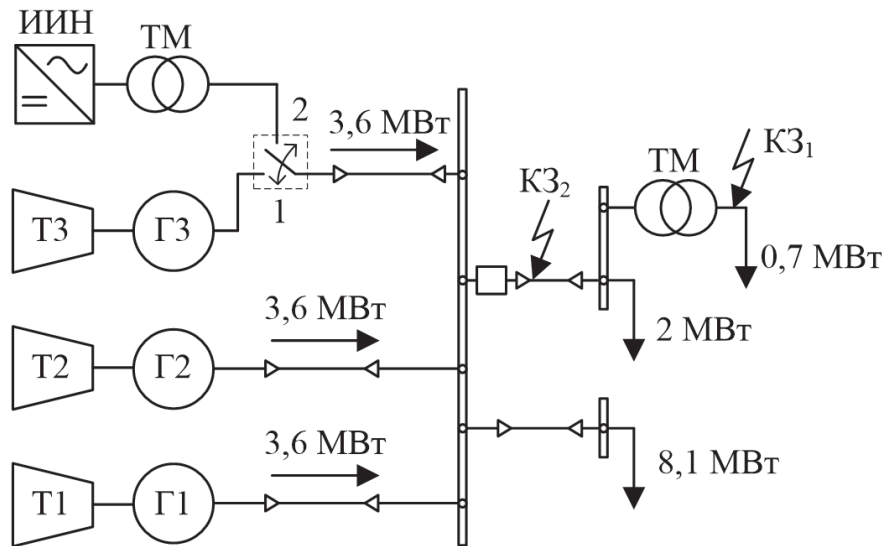


Рисунок 1. Схема электроснабжения тестовой ЭЭС

Figure 1. Test circuit of an isolated gas-turbine power plant

двух синхронных генераторов и узла с ИИН. Графики ПП получены путём математического имитационного моделирования в ПК Matlab/Simulink.

### Моделирование газотурбинной электростанции

При проектировании систем электроснабжения объектов нефтегазовых месторождений хорошо себя зарекомендовали газотурбинные электростанции (ГТЭС). Для моделирования синхронного генератора ГТЭС используется модель синхронной машины в форме Парка [5]. В отечественной практике проектирования газотурбинных электростанций в качестве генератора обычно используются неявнополюсные турбогенераторы. Для моделирования используется генератор Т-6-2УЗ, параметры которого представлены в таблице 1.

Для учета газовой турбины существует ряд моделей [6], отличных друг от друга используемыми параметрами и степенью детализации. Моделирование турбины в данной работе выполнено в соответствии с моделью CIGRE. В модели была изменена структура регулятора канала мощности и скорости турбины с ПИ на ПИД, а также его коэффициенты усиления, так как стандартные параметры регулятора не соответствуют требованиям устойчивости. Настройка новых параметров ПИД-регулятора выполнялась из соображения соблюдения требований к качеству вырабатываемой электроэнергии ГТЭС в соответствии со стандартом [7]. Значения коэффициентов усиления ПИД-регулятора следующие:  $K_p = 9,6$ ;  $K_i = 4,7$ ;  $K_d = 11$ ;  $K_n = 500$ .

Таблица 1. Параметры синхронного генератора

Table 1. Synchronous generator parameters

$P_{ном}$ , МВт	$U_{ном}$ , кВ	$\cos(\varphi_{ном})$	$n$ , об/мин	$x_d''$ , о.е.	$x_d'$ , о.е.	$x_d$ , о.е.	$x_s$ , о.е.
6	10,5	0,8	3000	0,119	0,172	1,71	0,112
$x_2$ , о.е.	$x_0$ , о.е.	$T_{d0}$ , с	$T_d'$ , с	$T_d''$ , с	$T_a^{(3)}$ , с	$J$ , т×м <sup>2</sup>	ОКЗ
0,145	0,058	7,26	0,726	0,091	1,132	1,3	0,692

В турбоагрегате данного типа используется возбудитель типа ВВД-40-30000-УХЛЗ. Это бесщеточный диодный возбудитель с вращающимся выпрямителем. В соответствии со стандартом IEEE 421.5 [8] данному типу возбудителя соответствует модель АС5А.

**Модель инверторного источника напряжения.** Силовая часть ИИН состоит из трёхфазного двухуровневого инвертора, источника постоянного напряжения и LC-фильтра [9]. СУ ИИН (рисунок 2) строится на основании системы дифференциальных уравнений в dq-координатах [10]:

$$\begin{cases} (L_\phi + L_c) \frac{di_{1d}}{dt} = (L_\phi + L_c) \omega_0 i_{1q} - (R_\phi + R_c) i_{1d} + U_{dinv} - U_{cd}, \\ (L_\phi + L_c) \frac{di_{1q}}{dt} = -(L_\phi + L_c) \omega_0 i_{1d} - (R_\phi + R_c) i_{1q} + U_{dinv} - U_{cq}, \\ \theta = \omega_0 t + \theta_0, \\ P(t) = \frac{3}{2} U_{cd} i_{1d}, \\ Q(t) = -\frac{3}{2} U_{cd} i_{1q}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_\phi$  — индуктивность дросселя фильтра, Гн;

$L_c$  — индуктивность между фильтром и точкой подключения к сети, Гн;

$R_\phi$  — активное сопротивление дросселя фильтра, Ом;

$R_c$  — активное сопротивление между фильтром и точкой подключения к сети, Ом;

$\theta$  — угол напряжения, рад;

$\omega_0$  — номинальная угловая частота сетевого напряжения, рад/с;

$i_{1dq}$  — выходной ток ИИН, А;

$U_{dinv}$  — напряжение, формируемое инвертором, В;

$U_c$  — напряжение сети, В.

СУ ИИН содержит ПИ-регуляторы в контурах регулирования тока, а также систему ФАПЧ [11]. Настройка коэффициентов этих регуляторов производилась в соответствии с [12]. Согласно требованию [13], объекты ВИЭ должны принимать участие в общем первичном регули-

ровании частоты (ОПРЧ) в соответствии с выражением:

$$\Delta P = -\Delta f \frac{100 P_{ном}}{K_{ст} f_{ном}}, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  — требуемая мощность, Вт;

$\Delta f$  — изменение частоты, Гц;

$P_{ном}$  — номинальная мощность ИИН, Вт;

$f_{ном}$  — номинальная частота, Гц;

$K_{ст}$  — коэффициент статизма, %.

В данном исследовании для реализации ОПРЧ канал регулирования активной мощности СУ ИИН дополняется блоком, реализующим выражение (2) (рисунок 2).

В работе моделируется генерирующий узел, составленный из 27 параллельно работающих установок ИИН единичной мощностью в 140 кВт, подключенный к шинам электростанции через повышающий трансформатор ТМ-4000/10. Значения параметров единичной установки ИИН и параметров ПИ-регуляторов его СУ показаны в таблице 2.

### Экспериментальная часть

Частота напряжения в изолированной ЭЭС должна поддерживаться на заданном номинальном значении в 50 Гц. Для этого один из турбоагрегатов (Г1) автономной электростанции работает в астатическом режиме регулирования частоты. Генераторы Г2 и Г3 работают в статическом режиме поддержания частоты. Для обеспечения резерва мощности генераторы работают в режиме недогрузки в диапазоне 50–75 % от номинальной мощности. Для тестовой ЭЭС принимается значение 60 %. Таким образом общая выдаваемая активная мощность электростанции составляет 10,8 МВт ( $3 \times 0,6 P_{ном.ген}$ ). Эквивалентная активная мощность генерирующего узла с ИИН составляет 3,6 МВт. Роль возмущающего воздействия в изолированной энергосистеме выполняет трёхфазное

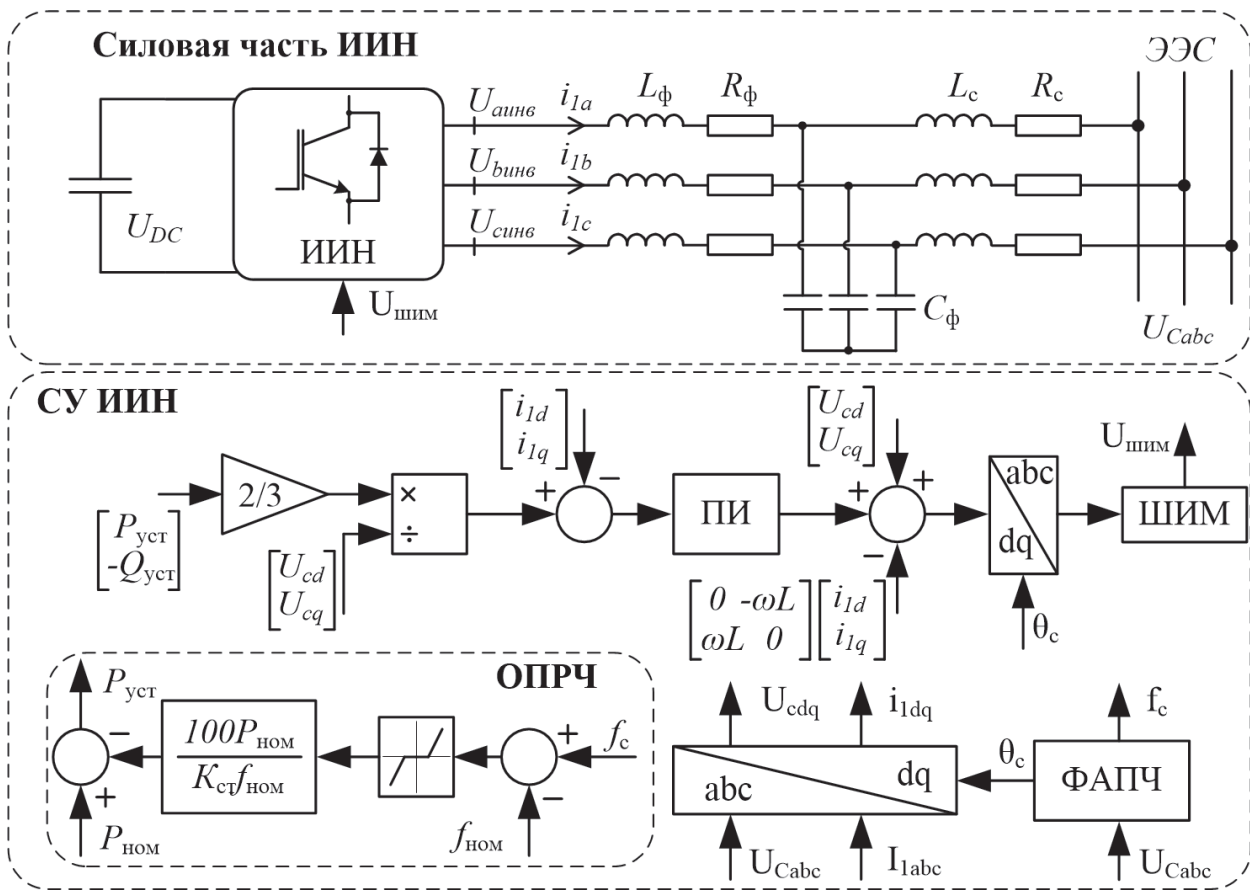


Рисунок 2. Структурная схема СУ ИИН

Figure 2. Control system block diagram of VSI

Таблица 2. Параметры ИИН

Table 2. VSI parameters

$U_{dc}$ , В	$R_\phi$ , Ом	$L_\phi$ , мГн	$C_\phi$ , мкФ	$R_c$ , Ом	$L_c$ , мГн	$Kp_{инв}$	$Ki_{инв}$	$K_{ct}$ , %	$P_{ном}$ , кВт
1000	0,1	5,5	200	0,03	0,5	6,03	2695	4	140

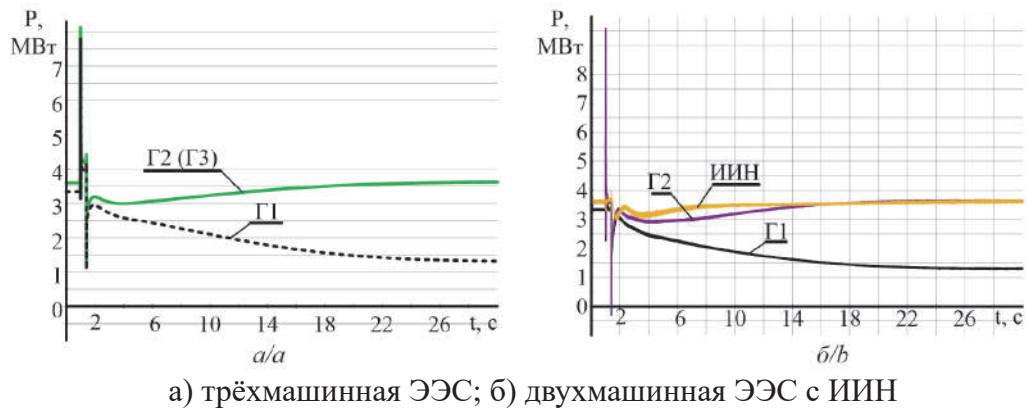
короткое замыкание (КЗ) длительностью 0,4 с с последующим отключением 25 % от общей нагрузки. Рассматриваются два варианта короткого замыкания. В первом варианте моделируется удалённое КЗ<sub>1</sub>. Во втором варианте моделируется КЗ<sub>2</sub> вблизи шин электростанции. В итоге проводится моделирование двух сценариев в двух вариантах:

- 1) отключение 25 % нагрузки после КЗ в трёхмашинной ЭЭС;
- 2) отключение 25 % нагрузки после КЗ в двухмашинной ЭЭС с ИИН.

Результаты имитационного моделирования представлены на рисунках 3–5.

### Анализ результатов эксперимента

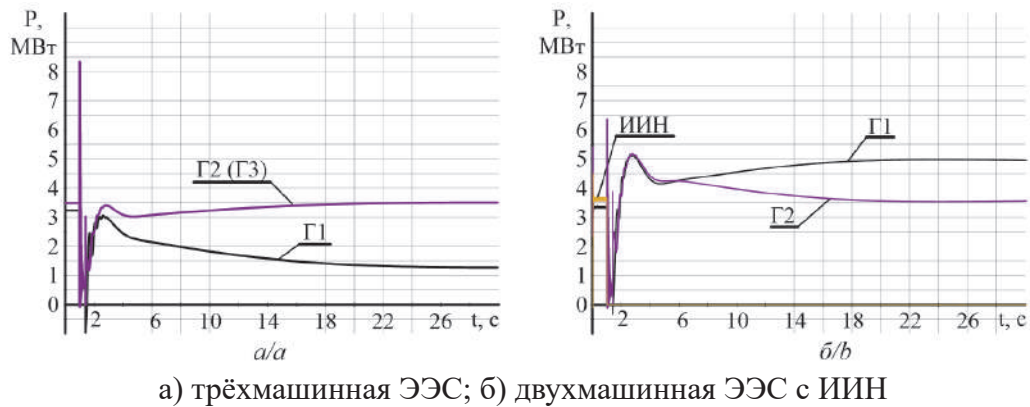
Из рисунка 3 видно, что в момент КЗ резко увеличивается мощность генераторов, а со стороны узла с ИИН пик мощности отсутствует. Это свидетельствует о том, что ИИН не участвует в подпитки места КЗ. Это, в свою очередь, компенсируется генераторами Г1 и Г2, что увеличивает величину токов, протекающих в их обмотках (на рисунке 3, а пик мощности достигает 8 МВт, на рисунке 3, б пик мощности достигает 10 МВт). При этом в момент устранения КЗ и отключения части нагрузки мощность генераторов Г1 и Г2 снижается до отрицательного значения (рисунок 3, б), что может



a) three generators at work; b) two generators and VSI at work

**Рисунок 3.** Изменение мощности генераторов ЭЭС после удалённого КЗ

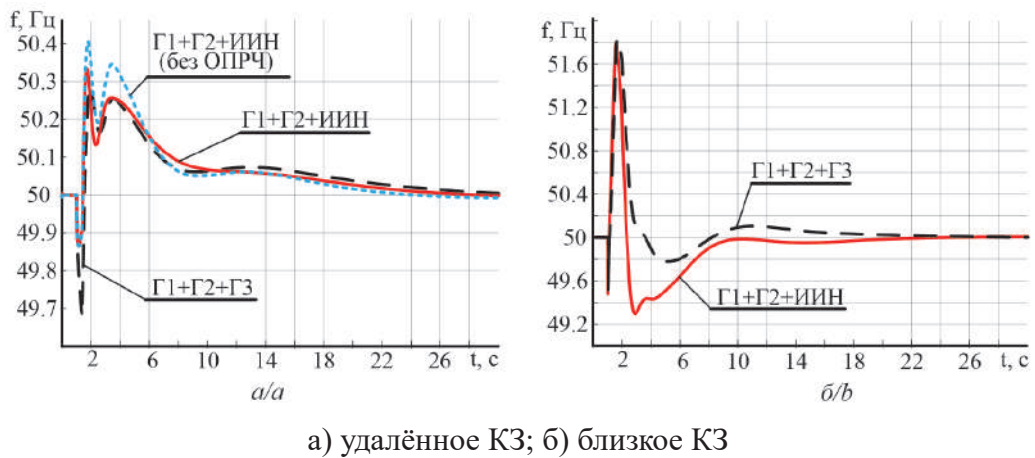
**Figure 3.** Power change of generators (remote short circuit)



a) three generators at work; b) two generators and VSI at work

**Рисунок 4.** Изменение мощности генераторов после близкого КЗ

**Figure 4.** Power change of generators (close short circuit)



a) remote short circuit; б) close short circuit

**Рисунок 5.** Изменение частоты в ЭЭС

**Figure 5.** Frequency change in power system

вызвать ложное срабатывание защиты от обратной мощности и привести к отключению электростанции. Также, так как узел с ИИН не участвует в подпитке места КЗ, чувствительность токовых защит в распределительной сети снизится, что отрицательно скажется на селективности этих защит. Если обратиться к рисунку 5, *a*, на котором показаны графики изменения частоты в ЭЭС, можно отметить, что пиковое отклонение частоты от номинального значения в двухмашинной ЭЭС с узлом ИИН меньше на 0,2 Гц, чем в трёхмашинной ЭЭС. Это объясняется тем, что канал регулирования мощности СУ ИИН работает в функции слежения за частотой. Также на рисунке 5, *a* показан график изменения частоты в двухмашинной ЭЭС с узлом ИИН без ОПРЧ. Видно, что максимальное отклонение частоты в двухмашинной ЭЭС с ИИН без ОПРЧ больше на 0,1 Гц, чем в аналогичной ЭЭС с ИИН с ОПРЧ. Таким образом, организация ОПРЧ в СУ ИИН снижает отклонения частоты во время ПП в ЭЭС.

Иная картина складывается при рассмотрении ПП после близкого КЗ. На рисунке 4, *a* показаны графики мощности генераторов трёхмашинной ЭЭС при КЗ на шинах электростанции. Видно, что после устранения КЗ и отключения части нагрузки генераторы Г2 и Г3, также как и в первом варианте (рисунок 3, *a*), восстанавливают заданную мощность, а генератор Г1 снижает мощность на величину мощности отключенной нагрузки. Из графиков двухмашинной ЭЭС на рисунке 4, *b* видно, что при близком КЗ узел с ИИН отключается. Это происходит вследствие глубокого снижения напряжения на шинах электростанции. Дело в том, что для функционирования ИИН его СУ должна отслеживать вектор напряжения сети. При исчезновении этого вектора или его сильном искажении контур ФАПЧ перестаёт корректно

определять угол вектора напряжения сети, а ИИН отключается своими защитами. Таким образом, после отключения узла ИИН в рассматриваемой системе будет дефицит генерируемой мощности, который восполнится за счёт оставшихся работающих генераторов Г1 и Г2, что видно из рисунка 4, *b*: генератор Г2 восстанавливает установленную мощность, а генератор Г1 восполняет образовавшийся дефицит мощности. В данном случае дефицит мощности относительно незначителен, так как вместе с генерирующим узлом ИИН (3,6 МВт) также отключился узел нагрузки (2,7 МВт). Однако КЗ может произойти внутри узла ИИН, что приведёт к отключению этого узла. Тогда образовавшийся дефицит мощности в ЭЭС составит 3,6 МВт, который должен принять на себя генератор Г1. Учитывая, что до аварии генератор работал при загрузке на 60 % (3,6 МВт), то после аварии, он будет работать в максимальном режиме при 120 % загрузке. В случае, если длительность восстановления резервов мощности электростанции займёт больше времени, чем время срабатывания защиты генератора от перегрузки, то произойдёт аварийное отключение электростанции.

Из графиков частоты (рисунок 5, *b*) видно, что в двухмашинной ЭЭС с узлом ИИН восстановление частоты в область допустимых значений происходит дольше. Однако в обоих случаях частота восстанавливается благодаря правильной настройке регуляторов частоты вращения машин электростанции.

### Выводы

При возникновении удалённых КЗ генерирующий узел с ИИН не участвует в подпитке места КЗ, что увеличивает токи, протекающие в генераторах ЭЭС. Также при моделировании ПП в ЭЭС с ИИН необходимо учитывать ОПРЧ со стороны ИИН, действие которого снижает

отклонения частоты от номинального значения во время переходного процесса.

При возникновении близких КЗ генерирующий узел с ИИН отключается своими защитами. Образовавшийся дефицит мощности восполняется за счёт резерва мощности оставшихся в работе генераторов изолированной ЭЭС. При этом, для устойчивой работы энергосистемы резерв мощности ведущего генератора электростанции, работающего по астатическому закону, должен составлять не менее 60 % от мощности генерирующего узла с ИИН.

#### Список источников

1. Приказ Минэнерго России от 28.02.2022 № 146 «Об утверждении схемы и программы развития единой энергетической системы России на 2022 — 2028 годы».

2. Круглыхин П.И., Уфа Р.А., Рудник В.Е., Васильев А.С. Оценка влияния объектов солнечной генерации на устойчивость энергорайона со слабыми связями // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 3(19). С. 79-99.

3. Малькова Я.Ю., Уфа А.А., Суворов Н.Ю. Влияние распределенной генерации на величину токов короткого замыкания // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2020. № 1-1. С. 119-122.

4. Рудник В.Е., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Исследование функционирования алгоритма синтетической инерции в электроэнергетических системах разной плотности // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 465-486.

5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.

6. Technical Report PES-TR1 «Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies» // IEEE Power & Energy Society. 2013.

7. СТО 59012820.27.100.003-2012. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЭЭС России. Нормы и требования [Электронный ресурс]. АО «СО ЕЭС»: [сайт] URL: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto\\_frequency\\_2012\\_izm\\_2014.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_frequency_2012_izm_2014.pdf) 2012 (дата обращения: 03.02.2023).

8. Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies // IEEE Std 421.5-2016 (Revision IEEE Std 421.5-2005), pp. 1–207, 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7553421.

Слабым звеном ИИН является система ФАПЧ в составе СУ, которая перестаёт функционировать при значительных провалах напряжения.

В данной работе рассматривалась классическая структура управления ИИН. Однако существует ряд работ [14], посвященных различным модификациям СУ ИИН. Поэтому в дальнейших исследованиях следует оценить влияние генерирующих узлов с ИИН на протекание ПП в изолированных ЭЭС с учетом этих систем управления.

9. Калачев Ю.Н., Александров А.Г. Преобразователи автономных источников электроэнергии. М.: ДМК Пресс, 2021. 80 с.

10. Wanlongo Ndiwulu G. Control and Stability Analysis of Islanded Microgrids Based on Inner Control Loops Approach: The Thesis for PhD Degree / Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering of the University of Louvain. Louvain-la-Neuve, 2020. 242 p.

11. Se-Kyo Chung. A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2000. Vol. 15, No. 3. P. 431-438.

12. Implementation and Design of PLL and Enhanced PLL Blocks // PowerSim. 2020. URL: <https://powersimtech.com/resources/tutorials/implementation-and-design-of-pll-and-enhanced-pll-blocks/> (дата обращения: 03.02.2023).

13. Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка [Электронный ресурс]. АО «СО ЕЭС»: [сайт] URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2021/tq\\_010121.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2021/tq_010121.pdf). (дата обращения: 03.02.2023).

14. Yashen Lin, Joseph Eto H., Johnson Brian B., Flicker Jack D., Lasseter Robert H., Villegas Pico Hugo N., Gab-Su Seo, Pierre Brian J., Ellis Abraham. Research Roadmap on Grid-Forming Inverters [Electronic Resource] // National Renewable Energy Laboratory — 2020. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf> (accessed 01.11.2022).

#### References

1. *Prkaz Minenergo Rossii ot 28.02.2022 № 146 «Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya edinoi energeticheskoi sistemy Rossii na 2022 — 2028 gody»* [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation 28.02.2022 No. 146 «On

Approval of the Scheme and Program for the Development of the Unified Energy System of Russia for 2022-2028»]. [in Russian].

2. Kruglykhin P.I., Ufa R.A., Rudnik V.E., Vasil'ev A.S. Otsenka vliyaniya ob'ektov solnechnoi generatsii na ustoichivost' energosistema so slabymi svyazyami [Assessing the Impact of Solar Generation Facilities on the Stability of an Energy District with Weak Connections]. *Intellektual'naya elektrotehnika — Intelligent Electrical Engineering*, 2022, No. 3 (19), pp. 79-99. [in Russian].

3. Mal'kova Ya.Yu., Ufa A.A., Suvorov N.Yu. Vliyanie raspredelennoi generatsii na velichinu tokov korotkogo замыканиya [Influence of Distributed Generation on the Value of Short-Circuit Currents]. *Sbornik izbrannykh statei nauchnoi sessii TUSUR* [Collection of Selected Articles of the TUSUR Scientific Session]. 2020, No. 1-1, pp. 119-122. [in Russian].

4. Rudnik V.E., Suvorov A.A., Ruban N.Yu., Andreev M.V., Bai Yu.D. Issledovanie funktsionirovaniya algoritma sinteticheskoi inertsii v elektroenergeticheskikh sistemakh raznoi plotnosti [Operation of Synthetic Inertia Units in Electric Power Systems of Various Densities]. *iPolytech Journal*, 2022, Vol. 26, No. 3, pp. 465-486. [in Russian].

5. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press, 2007. 288 p. [in Russian].

6. Technical Report PES-TR1 «Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies». *IEEE Power & Energy Society*, 2013.

7. *STO 59012820.27.100.003-2012. Regulirovanie chastoty i peretokov aktivnoi moshchnosti v EES Rossii. Normy i trebovaniya* [Organization Standard 59012820.27.100.003-2012. Regulation of Frequency and Active Power Flows in the UES of Russia. Norms and Requirements]. [Electronic Resource]. AO «SO EES». URL: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto\\_frequency\\_2012\\_izm\\_2014.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_frequency_2012_izm_2014.pdf) (accessed 03.02.2023). [in Russian].

8. Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Std 421.5-2016 (Revision IEEE Std 421.5-2005)*, pp. 1–207, 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7553421.

9. Kalachev Yu.N., Aleksandrov A.G. *Preobrazovateli avtonomnykh istochnikov elektroenergii* [Converters of Autonomous Power Sources]. Moscow, DMK Press, 2021. 80 p. [in Russian].

10. Wanlongo Ndiwulu G. *Control and Stability Analysis of Islanded Microgrids Based on Inner Control Loops Approach: The Thesis for PhD Degree* (Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering of the University of Louvain). Louvain-la-Neuve, 2020. 242 p.

11. Se-Kyo Chung. A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, Vol. 15, No. 3, pp. 431-438.

12. Implementation and Design of PLL and Enhanced PLL Blocks. *PowerSim*, 2020. URL: <https://powersimtech.com/resources/tutorials/implementation-and-design-of-pll-and-enhanced-pll-blocks/> (accessed 03.02.2023).

13. *Tekhnicheskie trebovaniya k generiruyushchemu oborudovaniyu uchastnikov optovogo rynka* [Technical Requirements for Generating Equipment of Major Market Participants]. [Electronic Resource]. AO «SO EES»: [website]. URL: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/markets/2021/tq\\_010121.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/markets/2021/tq_010121.pdf). (accessed 03.02.2023). [in Russian].

14. Yashen Lin, Joseph Eto H., Johnson Brian B., Flicker Jack D., Lasseter Robert H., Villegas Pico Hugo N., Gab-Su Seo, Pierre Brian J., Ellis Abraham. Research Roadmap on Grid-Forming Inverters [Electronic Resource]. *National Renewable Energy Laboratory — 2020*. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf> (accessed 01.11.2022).

Статья поступила в редакцию 08.02.2023; одобрена после рецензирования 16.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

The article was submitted 08.02.2023; approved after reviewing 16.02.2023; accepted for publication 20.02.2023.

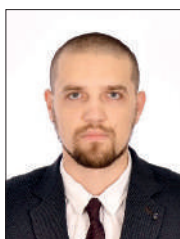


Научная статья

УДК 621.313.333.1

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ БАЛАНСА МГНОВЕННОЙ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

**Иван Витальевич Раков****Ivan V. Rakov***инженер I категории группы внедрения инноваций**и изобретательской деятельности,**ООО «Газпром трансгаз Томск»,**Томск, Россия*

### Актуальность

Автоматизированный электропривод (АЭП) — один из важнейших и наиболее часто встречающихся объектов управления в автоматических системах управления технологическими процессами (АСУ ТП). Контроль выходной координаты в АЭП для реализации обратной связи с АСУ ТП возможно осуществить как с помощью датчика скорости, так и без него, при помощи вычислительных мощностей преобразователя частоты входящего в состав АЭП. Для работы бездатчикового АЭП в составе АСУ ТП необходимо обеспечить адекватное восстановление вектора переменных состояния асинхронного двигателя (АД) в преобразователе частоты с помощью настраиваемой математической модели.

Для восстановления вектора переменных состояния необходимо в системе дифференциальных уравнений подобрать коэффициенты, которые с некоторой погрешностью соответствуют электрическим параметрам схемы замещения АД, т.е. осуществить процедуру идентификации. По сути своей процедура идентификации параметров АД представляет собой процесс нахождения экстремума целевой функции, построенной на основе данных, полученных в процессе работы АД. В электротехнике для идентификации параметров большое распространение получили численные методы нахождения экстремума целевой функции, однако у этих методов имеются существенные ограничения и недостатки.

Проблема применения численных методов нахождения экстремума целевой функции с двумя и более аргументами в микропроцессорных системах управления АЭП состоит в том, что необходимо вычислять частные производные в дискретном виде по каждому аргументу функции. Вычисление частных производных в идеальных системах без шумов и возмущений является отработанным и не представляющим трудностей для реализации процессом, однако в реальных микропроцессорных системах шумы и возмущения присутствуют. Из-за этого

### Ключевые слова

генетический алгоритм, асинхронный двигатель, оценивание параметров схемы замещения АД, динамическая идентификация параметров схемы замещения АД, оценивание параметров АД в процессе работы, динамическая идентификация, идентификация АД без останова, функция невязки, минимизация функции невязки, оптимизация, оценивание потребляемой мощности, полная потребляемая мощность, активная мощность, реактивная мощность, пример работы генетического алгоритма, GitHub

при вычислении частных производных по каждому аргументу увеличивается шанс возникновения точек разрыва первого и второго рода, борьба с которыми представляет определенную трудность. Одними из классов методов, которые позволяют определять экстремум целевой функции без нахождения частных производных, являются метаэвристические алгоритмы, и в частности — генетические алгоритмы.

#### **Цель исследования**

Экспериментальное исследование работоспособности генетического алгоритма в задаче динамической идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора без остановки и вывода из эксплуатации электротехнического комплекса.

#### **Методы исследования**

Метаэвристические алгоритмы, итерационные процедуры, генетический алгоритм, дискретные системы, методы оптимизации.

#### **Результаты**

Экспериментально опробована и подтверждена работоспособность генетического алгоритма в задаче динамической идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора без остановки и вывода из эксплуатации электротехнического комплекса.

**Для цитирования:** Раков И. В. Динамическая идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 24-48. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48>.

Original article

## **DYNAMIC ESTIMATION PARAMETERS OF THE ELIMINATION CIRCUIT OF INDUCTION MOTOR ON THE BASIS OF INSTANT FULL POWER BALANCE IN A STEADY-STATE MODE**

#### **The relevance**

Automated electric drive (AED) is one of the most important and most common control objects in automatic process control systems (ACS). The control of the output coordinate in the AED, for the implementation of feedback with an automated process control system, can be carried out both with the help of a speed sensor and without it, using the computing power of a frequency converter included in the AED. For the sensorless AED to work in an automated process control system, it is necessary to ensure adequate restoration of the vector of state variables of the induction motor (IM) in the frequency converter using a configurable mathematical model.

To restore the vector of state variables, it is necessary to select coefficients in the system of differential equations that correspond with some error to the electrical parameters of the BP replacement circuit, i.e. to carry out the identification procedure. In fact, the procedure for determining the parameters of the PS is the process of finding the extremum of the objective function, built on the basis of data obtained during the operation of the PS. In electrical engineering, numerical methods for finding the extremum of the objective function have become widely used to identify parameters, but these methods have significant limitations and disadvantages.

The problem of using numerical methods to find the extremum of an objective function with two or more arguments in AED microprocessor

#### **Ключевые слова**

genetic algorithm, induction motor, estimation of parameters of the IM replacement circuit, dynamic identification of parameters of the IM replacement circuit, estimation of parameters of IM during operation, dynamic identification, identification of IM without stopping, residual function, minimization of the residual function, optimization, estimation of power consumption, total power consumption, active power, reactive power, example of a genetic algorithm, GitHub

control systems is that it is necessary to calculate partial derivatives in discrete form for each argument of the function. Calculation of partial derivatives in ideal systems without noise and disturbances is a proven and easy-to-implement process, but noise and disturbances are present in real microprocessor systems. Because of this, when calculating partial derivatives for each argument, the probability of breakpoints of the first and second kind increases, the struggle with which presents a certain difficulty. One of the classes of methods that allow determining the extremum of an objective function without finding partial derivatives are metaheuristic algorithms, and in particular genetic algorithms.

#### **Aim of research**

Experimental study of the efficiency of a genetic algorithm in the problem of dynamic identification of parameters of an induction motor circuit with an open rotor winding without stopping and decommissioning an electrical complex.

#### **Research methods**

Metaheuristic algorithms, iterative procedures, genetic algorithm, discrete systems, optimization methods.

#### **Results**

The effectiveness of the genetic algorithm was experimentally tested and proved in the problem of dynamic identification of parameters of the induction motor replacement circuit with an open rotor winding without stopping and decommissioning the electrical complex.

**For citation:** Rakov I. V. Dinamicheskaya identifikatsiya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya na osnove balansa mgnovennoi polnoi moshchnosti v ustanovivshemsya rezhime [Dynamic Estimation Parameters of the Elimination Circuit of Induction Motor on the Basis of Instant Full Power Balance in a Steady-State Mode]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 24–48 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48>.

## **Введение**

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. в качестве одной из мер обеспечения энергетической безопасности страны предусматривает «введение в экономический оборот ... трудноизвлекаемых запасов (в том числе баженовской свиты), ... на основе инновационных отечественных технологий и оборудования» [1].

Баженовская свита — крупнейшая в мире нефтеносная формация, располагающаяся в Западной Сибири на площади около 1 млн км<sup>2</sup>. По оценкам Роснедр, в баженовской свите содержится 180–360 млрд баррелей извлекаемых запасов, а по мнению специалистов из US EIA (2013 г.), в свите суммарные запасы составляют около 1,2 трлн баррелей нефти, из которых 74 млрд баррелей

могут быть технически извлекаемыми. Учитывая эти данные, возрастающее внимание к «бажену» легко объяснимо. Несомненно, свою роль здесь сыграла сланцевая революция в США, наглядно показав потенциальные перспективы разработки подобных горизонтов и необходимость создания соответствующих технологических инструментов [2].

Интерес, проявленный к «бажену» крупнейшими нефтедобывающими компаниями «Сургутнефтегаз», «Роснефть», «РуссНефть», РИТЭК и «Газпром нефть», привел к созданию в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО) технологического центра «Бажен» [3]. Компанией «Газпром нефть» разработан паспорт федерального проекта «Освоение баженовской свиты в Западной Сибири» [3].

С технологических позиций баженовская свита по своему строению и геомеханическим свойствам пород является полным антиподом основного объекта сланцевой добычи — Среднего Бакена (Северная Дакота, США), на котором отрабатывались сланцевые технологии [3]. В частности, характерная особенность баженовской свиты — высокие пластовые температуры и давление, осложненные глубиной залегания пластов [4–10].

Указанная специфика «бажена» усугубляет проблему надежного и энергоэффективного извлечения продукции из скважины. Основной инструмент здесь — установки электроцентробежных насосов (УЭЦН). По данным ОАО «НК «Роснефть», работа группы из 223 скважин с высокой потребляемой мощностью на «традиционных» месторождениях, из-за тепловых потерь в кабельных линиях и погружных асинхронных электродвигателях в составе УЭЦН, привела к сверхнормативным потерям электроэнергии около 50 млн кВт·ч/год [7]. Эксплуатация УЭЦН в условиях «бажена», очевидно, существенно усугубит эту ситуацию [2]. Таким образом, разработка методов и технологий, которые позволят снизить потребление электроэнергии и увеличить рентабельность при добыче нефти, является актуальной задачей.

Одним из способов уменьшения потребления электроэнергии УЭЦН является перевод системы управления УЭЦН со скалярного режима на векторный с измерением токов и напряжений на выходе повышающего трансформатора. Для этого необходимо разработать настраиваемые математические модели погружного кабеля и электродвигателя, разработать методики оценивания параметров этой системы, реализовать наблюдатели полного порядка вектора переменных состояния электротехнического

комплекса «длинный кабель — асинхронный двигатель», реализовать на основе оцененных параметров и вектора переменных состояния обратную связь со станцией управления.

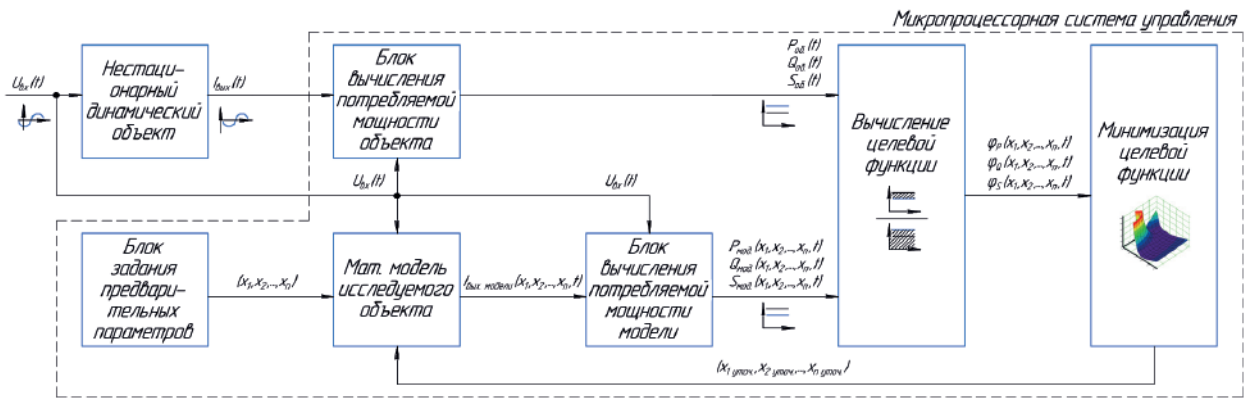
В рамках данной статьи рассмотрена методика динамического оценивания (идентификации) параметров асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора на основе баланса мгновенного значения потребляемой полной мощности без внесения в основной сигнал тестовых воздействий.

Причина опробования разработанной методики на асинхронном двигателе с разомкнутой обмоткой ротора заключается в том, что в этом объекте исследования имеется двумерное поисковое пространство ( $\hat{R}_1$  и  $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$ ) и вследствие этого возможно визуально определить значения параметров, при которых значение целевой функции будет минимальным. В свою очередь, сравнение результатов, полученных при визуальной оценке и полученных при помощи алгоритма оптимизации, позволит судить о правильной настройке алгоритма оптимизации и его работоспособности.

Описанная в данной статье методика оценивания параметров, только с изменением математической модели объекта исследования и размерности поискового пространства, в дальнейшем будет применяться для идентификации параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и длинного кабеля.

### **Описание методики динамической идентификации параметров электротехнического объекта исследования**

На рисунке 1 приведена функциональная схема динамической идентификации параметров электротехнического объекта исследования на основе баланса мгновенной потребляемой мощности.



**Рисунок 1.** Функциональная схема методики динамической идентификации параметров объекта исследования

**Figure 1.** Functional diagram of the method of dynamic identification of the parameters of the object of study

Согласно функциональной схеме (рисунок 1), на нестационарный динамический объект подается входное напряжение  $U_{вх}(t)$ . При помощи датчиков напряжения мгновенное значение величины напряжения передается в микропроцессорную систему управления. Измеряемым откликом нестационарного динамического объекта является мгновенное значение тока  $I_{вх}(t)$ , которое при помощи датчиков тока передается в микропроцессорную систему управления.

В микропроцессорной системе управления реализованы следующие логические блоки: настраиваемая математическая модель исследуемого объекта, блоки вычисления потребляемой мощности исследуемого объекта и его настраиваемой математической модели, блок задания предварительных параметров, блок вычисления целевой функции, блок минимизации целевой функции.

В микропроцессорной системе управления на настраиваемую математическую модель от блока задания предварительных параметров передаются значения  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — предварительные значения коэффициентов СДУ в настраиваемой математической модели.

Входным воздействием для настраиваемой математической модели является

мгновенное значение  $U_{вх}(t)$ , полученное от датчиков напряжения. Откликом настраиваемой математической модели является функция мгновенного значения тока  $I_{вх.модели}(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ .

Полученные отклики объекта исследования  $I_{вх}(t)$  и настраиваемой математической модели  $I_{вх.модели}(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$  и величину измеренного напряжения  $U_{вх}(t)$  передают на блоки вычисления потребляемой мощности объекта и модели соответственно. Потребляемая мгновенная мощность оценивается способом, указанным в [11, 12]. Выходным значением блока вычисления потребляемой мощности объекта исследования является мгновенное значение полной  $S_{об.}(t)$  потребляемой мощности. Выходным значением блока вычисления потребляемой мощности настраиваемой математической модели является мгновенное значение полной  $S_{мод.}(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$  потребляемых мощностей. Вычисленные значения потребляемой мощности объекта и модели передаются на блок вычисления целевой функции, где строится целевая функция  $\Psi_S(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ . Затем целевая функция передается на блок минимизации целевой функции, где при помощи методов оптимизации находится глобальный экстремум  $(x_{1\text{ уточ.}}, x_{2\text{ уточ.}}, \dots, x_{n\text{ уточ.}})$  целевой функции.

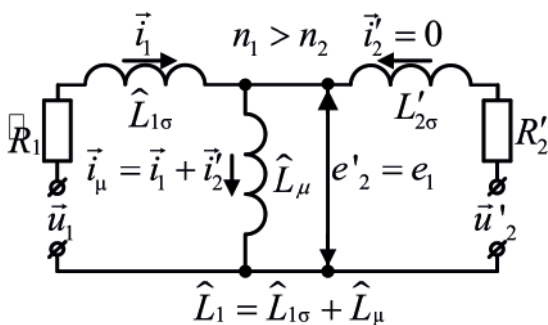
**Допущения, принятые при построении модели асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора**

При моделировании были приняты следующие допущения и упрощения [13]:

- магнитная система линейная;
- отсутствуют потери в стали, вызванные вихревыми токами и явлениями гистерезиса;
- отсутствует эффект вытеснения тока;
- обмотки статора и ротора считаются симметричными;
- воздушный зазор равномерный;
- изменение магнитной проводимости, обусловленное наличием пазов статора и ротора, не учитывается;
- распространение магнитных полей равномерное и синусоидальное.

**Описание настраиваемой математической модели асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора**

Объектом исследования в данной статье является асинхронный двигатель с разомкнутой обмоткой ротора. Схема замещения исследуемого объекта представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Схема замещения асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора

**Figure 2.** Equivalent circuit of an induction motor with an open winding of the rotor

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:  $\vec{i}_1$  — обобщенный вектор тока статора, А;  $\vec{i}'_2$  — обобщенный вектор тока ротора, приведенный к обмоткам статора, А;  $\vec{i}_\mu$  — обобщенный вектор намагничивающего тока, А;  $\vec{u}_1$  — обобщенный вектор входного напряжения обмотки статора, В;  $\vec{u}'_2$  — обобщенный вектор входного напряжения обмотки ротора, приведенный к обмоткам статора, В;  $\vec{e}_1$  — обобщенный вектор электродвижущей силы обмотки статора, В;  $\vec{e}'_2$  — обобщенный вектор электродвижущей силы обмотки ротора, приведенный к обмоткам статора, В;  $\hat{R}_1$  — оцениваемое активное сопротивление обмотки статора, Ом;  $R'_2$  — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмоткам статора, Ом;  $\hat{L}_{1\sigma}$  — оцениваемая индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн;  $\hat{L}_\mu$  — оцениваемая индуктивность главного контура намагничивания, Гн;  $\hat{L}_1 = \hat{L}_{1\sigma} + \hat{L}_\mu$  — оцениваемая эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн;  $n_1$  — число витков обмотки статора, ед.;  $n_2$  — число витков обмотки ротора, ед.

В качестве входного воздействия настраиваемой математической модели является синусоидальное трехфазное напряжение:

$$\begin{aligned}
 U_A(t) &= \sqrt{2} \cdot U_d \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + 0); \\
 U_B(t) &= \sqrt{2} \cdot U_d \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right); \\
 U_C(t) &= \sqrt{2} \cdot U_d \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right);
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $U_A(t), U_B(t), U_C(t)$  — мгновенные значения напряжения фаз, В;

$U_d$  — действующее значение напряжения, В;

$f$  — частота питающей сети, Гц.

Откликом настраиваемой математической модели является установившееся значение тока по каждой из фаз:

$$\hat{I}_A(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\sqrt{\hat{R}_1^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m))^2}} \times$$

$$\times \sin \left( 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + 0 + \operatorname{atan} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m)}{\hat{R}_1} \right) \right);$$

$$\hat{I}_B(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\sqrt{\hat{R}_1^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m))^2}} \times$$

$$\times \sin \left( 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \frac{2\pi}{3} + \operatorname{atan} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m)}{\hat{R}_1} \right) \right); \quad (2)$$

$$\hat{I}_C(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\sqrt{\hat{R}_1^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m))^2}} \times$$

$$\times \sin \left( 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t - \frac{2\pi}{3} + \operatorname{atan} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m)}{\hat{R}_1} \right) \right);$$

где  $\hat{I}_A(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$ ,  $\hat{I}_B(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$ ,  $\hat{I}_C(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$  — оцененное мгновенное значение токов фаз, А.

Так как в дальнейшем, при проведении эксперимента, в измерительном комплексе отсутствует прибор измерения фазового сдвига между синусоидами тока и напряжения, для определения мгновенной полной потребляемой мощности осуществим расчет без использования значения фазового сдвига. Для этого после определения установившихся значений токов необходимо определить по [11, 12] потребляемую активную и реактивную мощности. Для этого изначально переведем входные воздействия настраиваемой математической модели (трехфазное напряжение) и отклики настраиваемой математической модели (трехфазные токи) в двухфазную неподвижную систему  $\alpha\beta$ :

$$U_\alpha(t) = U_A(t); \quad (3)$$

$$U_\beta(t) = \frac{U_B(t) - U_C(t)}{\sqrt{3}};$$

$$\hat{I}_\alpha(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) = \hat{I}_A(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m);$$

$$\hat{I}_\beta(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) =$$

$$= \frac{\hat{I}_B(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) - \hat{I}_C(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{3}};$$

где  $\hat{I}_\alpha(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$  — оцененная проекция результирующего вектора тока статора

по оси  $\alpha$  ортогональной неподвижной системы координат  $\alpha\beta$ , А;

$U_\alpha(t)$  — проекция вектора напряжения статора по оси  $\alpha$  ортогональной неподвижной системы координат  $\alpha\beta$ , В;

$\hat{I}_\beta(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$  — оцененная проекция результирующего вектора тока статора по оси  $\alpha$  ортогональной неподвижной системы координат  $\alpha\beta$ , А;

$U_\beta(t)$  — проекция вектора напряжения статора по оси  $\beta$  ортогональной неподвижной системы координат  $\alpha\beta$ , В.

Затем путем скалярного произведения масштабированных векторов  $\bar{I} \left( \frac{\hat{I}_\alpha(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}}, \frac{\hat{I}_\beta(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}} \right)$  и  $\bar{U} \left( \frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}} \right)$ , заданных координатами в ортогональном базисе, можно вычислить активную мощность трехфазной цепи по формуле:

$$\hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) = m \left( \frac{\hat{I}_\alpha(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}} + \frac{\hat{I}_\beta(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}} \right). \quad (4)$$

Для вычисления реактивной мощности необходимо произвести векторное перемножение векторов  $\bar{I} \left( \frac{\hat{I}_\alpha(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}}, \frac{\hat{I}_\beta(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}} \right)$  и  $\bar{U} \left( \frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}} \right)$ , заданных координатами в ортогональном базисе:

$$\hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) = m \left( \frac{\hat{I}_\alpha(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}} - \frac{\hat{I}_\beta(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}} \right); \quad (5)$$

и полную потребляемую мощность:

$$\hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) =$$

$$= \sqrt{\left( \hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) \right)^2 + \left( \hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m) \right)^2}; \quad (6)$$

где  $\hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$  — активная мощность  $m$  фазной цепи, Вт;

$\hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$  — реактивная мощность  $m$  фазной цепи, Вар;

$\hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$  — полная мощность  $m$  фазной цепи, ВА;

$m$  — количество фаз, ед.

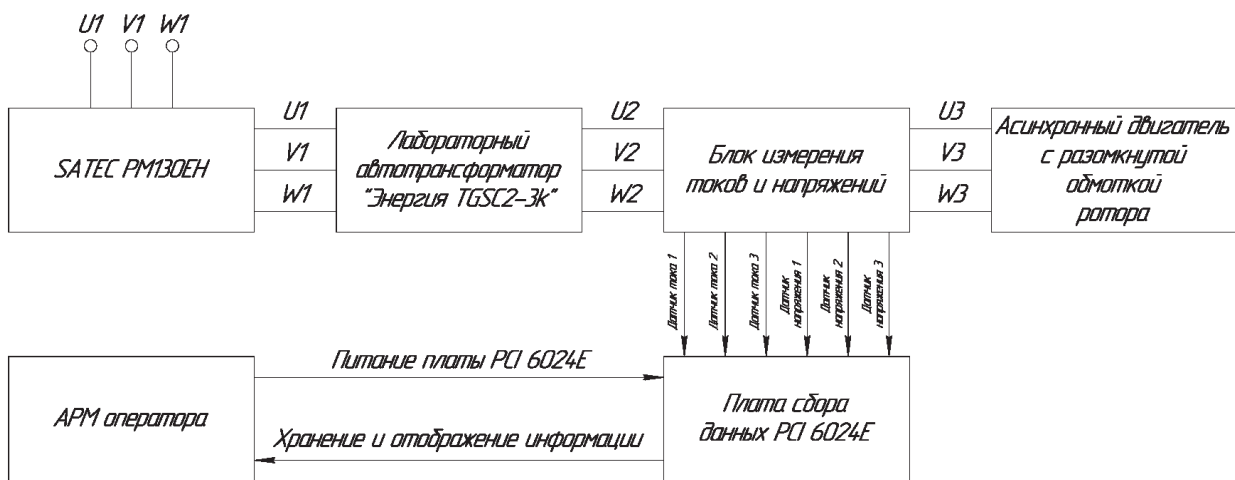
**Описание экспериментальной установки**

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

Экспериментальная установка состоит из многофункционального измерительного преобразователя SATEC PM130EH (Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 56490), после которого установлен лабораторный автотрансформатор Энергия TGSC2-3к. После автотрансформатора установлен блок измерения токов и напряжений, а к блоку измерений токов и напряжений подключен асинхронный двигатель с разомкнутой обмоткой ротора МТН011-6У1. Данные с блока измерения токов и напряжений передаются по проводному соединению на плату сбора данных PCI 6024E компании National

Instruments, которая установлена в процессорный блок автоматизированного рабочего места оператора.

Блок датчиков тока и напряжения содержит три измерительных преобразователя «ток — напряжение» и три измерительных преобразователя «напряжение — напряжение». Характеристики преобразователя «ток — напряжение» представлены в таблице 1. Характеристики преобразователя «напряжение — напряжение» представлены в таблице 2. Характеристики многофункционального измерительного преобразователя SATEC PM130EH представлены в таблице 3. Характеристики платы сбора данных PCI 6024E компании National Instruments представлены в таблице 4. Параметры асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора представлены в таблице 5.



**Рисунок 3.** Функциональная схема экспериментальной установки

**Figure 3.** Functional diagram of the experimental setup

**Таблица 1.** Характеристики измерительного преобразователя «ток — напряжение»

**Table 1.** Characteristics of the measuring transducer «current — voltage»

Характеристика	Параметр
Модель преобразователя	HMS 20-P
Преобразование	20 A / 2,5 В
Погрешность измерения	$\leq \pm 1 \%$
Время отклика	$\leq 5 \text{ мкс}$
Нелинейность регулировочной характеристики	$\leq \pm 0,5 \%$
Чувствительность	0,05 А



**Таблица 2.** Характеристики измерительного преобразователя «напряжение — напряжение»**Table 2.** Characteristics of the measuring transducer «voltage — voltage»

Характеристика	Параметр
Модель преобразователя	LV 25-1000
Преобразование	1000 В / 5 В
Погрешность измерения	$\leq \pm 0,8 \%$
Время отклика	$\leq 40$ мкс
Нелинейность регулировочной характеристики	$\leq 0,2 \%$
Чувствительность	0,2 В

**Таблица 3.** Характеристики многофункционального измерительного преобразователя SATEC PM130EH**Table 3.** Characteristics of the SATEC PM130EH multifunction transmitter

Величины	Предельные значения	Номинальные значения	Пределы допускаемой основной относительной погрешности
Линейное напряжение, В	3×828 или 3×144	3×400 или 3×120	$\pm 0,2 \%$
Ток, А	In = 5А –1–200 % In = 1А — 5–200 %	1 или 5	$\pm 0,2 \%$
Ток нейтрали	5–200 % номинала	ном.ток входного трансф.	$\pm 0,5 \%$
Частота, Гц	45–65	50, 60	0,02 %
		25, 400	0,04 %
Коэффициент мощности при токе более 2 % номинала	от –1 до +1		0,2 % для диапазонов от 0,5 до 1,0 и от –1 до –0,5
Активная мощность, ток 2–200 % номинала, $\cos \phi \geq 0,5$ ; потребление/генерация	$\pm 10\,000\,000$ кВт	–	$\pm 0,3 \%$
Реактивная мощность, ток 2–200 % номинала, $\cos \phi \leq 0,9$ ; потребление/генерация	$\pm 10\,000\,000$ кВАр	–	$\pm 0,3 \%$
Полная мощность, ток 2–200 % номинала, $\cos \phi \geq 0,5$	0–10 000 000 кВА	–	$\pm 0,3 \%$
Активная энергия (ток 2–200 % номинала), $\cos \phi \geq 0,5$ ; потребление/генерация	класс точности 0.5S согласно ГОСТ Р 52323-2005 (МЭК 62053-22:2003) $\pm 0,5 \%$		$\pm 0,5 \%$
Полная энергия (ток 2–200 % номинала), $\cos \phi \geq 0,5$			
Реактивная энергия (ток 2–200 % номинала), $\cos \phi \leq 0,9$ ; потребление/генерация	–		$\pm 0,5 \%$
Коэффициент искажения синусоидальности тока и напряжения относительно основной гармоники, ток и напряжение $\geq 10 \%$ номинала	0–99,9 %	–	$\pm 1,5 \%$
Коэффициент искажения синусоидальности тока относительно номинального тока, при токе $\geq 10 \%$ номинала	0–100 %	–	$\pm 2 \%$

**Таблица 4.** Характеристики платы сбора данных PCI 6024E компании National Instruments**Table 4.** National Instruments PCI 6024E Data Acquisition Board Specifications

Количество каналов	16 однопроводных и 8 дифференциальных
Тип АЦП	Последовательная аппроксимация
Разрешение	12 бит, 1 в 4096
Скорость сэмпирования	20000 сэмплов в секунду (гарантировано)
Диапазон входных сигналов	Только биполярный
Входная связь	Постоянный ток
Максимальное рабочее напряжение (сигнал + синфазный режим)	Каждый вход должен находиться в пределах $\pm 11$ В от земли
Размер буфера FIFO	512 сканов
Передача данных	DMA, прерывания, программируемый ввод/вывод
Режим DMA	Сбор вразброс (одна передача, запрос на передачу)
Размер памяти конфигурирования	512 слов

**Таблица 5.** Параметры асинхронного двигателя МТН011-6У1**Table 5.** Parameters of the asynchronous motor MTN011-6U1

$P_{\text{ном}}$ кВт	$n_{\text{синх}}$ об/мин	$n_{\text{ном}}$ об/мин	$I_{\text{ном}}$ А	$\eta_{\text{ном}}$ %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$ о.е.
1,4	1000	890	4,9	65	0,67

Так как модуль ввода информации имеет диапазон измерений от  $-11$  до  $+11$  В и 12 разрядный АЦП, то этот модуль может различить два входных сигнала, отличающихся на  $22/2^{12} = 5,37$  мВ. Также стоит отметить, что постоянная времени АЦП составляет  $1/20000$  Гц = 50 мкс, что на порядок меньше электромагнитной постоянной времени любой из электрических машин. Это в свою очередь означает, что АЦП способен полностью зарегистрировать информацию о всех переходных и постоянных электромагнитных процессах, происходящих в этой подсистеме электрической машины, при наличии высокочувствительных измерительных датчиков.

Разница в показаниях между двумя выходными значениями датчика тока равняется  $0,05 \text{ А} \cdot 2,5 \text{ В} / 20 \text{ А} = 6,25$  мВ. Иными словами, разрешающая способ-

ность платы сбора данных PCI 6024E в  $6,25 \text{ мВ} / 5,37 \text{ мВ} = 1,16$  о.е. раза выше, чем чувствительность датчика тока. Это означает, что разрешающая способность АЦП позволяет обработать сигнал, принятый от датчика тока в полном объеме. И в случае применения компоновки «датчик тока HMS 20-P и плата сбора данных PCI 6024E» можно сказать, что с помощью датчика тока можно зафиксировать входной сигнал тока, отличающийся от истинного только на величину погрешности измерения датчика и шумовую составляющую, присутствующую во всех каналах измерения.

Разница в показаниях между двумя выходными значениями датчика напряжения равняется  $0,2 \text{ В} \cdot 5 \text{ В} / 1000 \text{ В} = 1$  мВ. Иными словами, разрешающая способность платы сбора данных PCI 6024E в  $5,37 \text{ мВ} / 1 \text{ мВ} = 5,37$  о.е. раза ниже, чем чувствительность датчика напряжения.

Таким образом, компоновка «датчик напряжения LV 25-1000 и плата сбора данных PCI 6024E» позволяет регистрировать изменение напряжения на  $0,2В \cdot 5,37 \text{ о.е.} = 1,074 \text{ В}$ , что является грубой чувствительностью для идентификации параметров при регистрации переходных процессов, но достаточной для установившегося режима.

Таким образом, исходя из вышесказанного примем допущение, что измерительные каналы являются идеальными и не вносят искажений в полученные результаты измерения.

Для получения экспериментальных данных тока и напряжения, снятых с клемм статорной обмотки асинхронного двигателя с разомкнутой обмоткой ротора, были выполнены следующие действия:

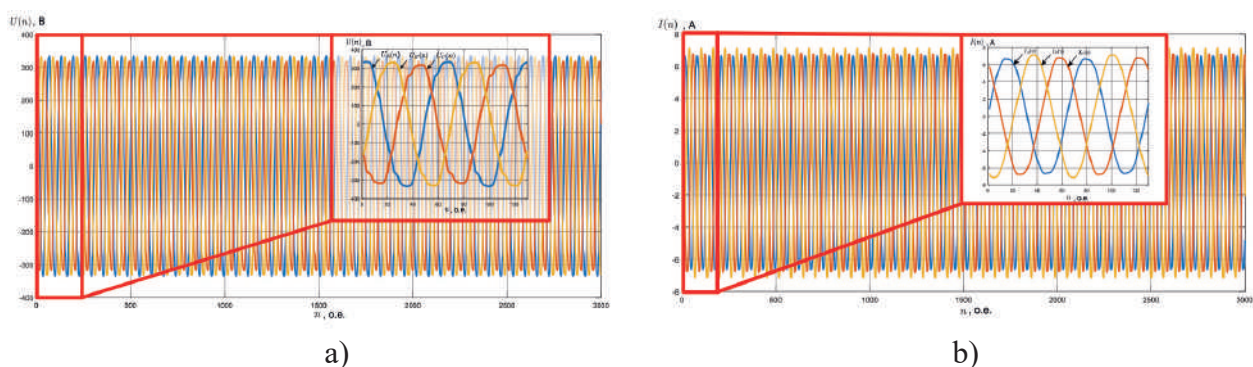
- запуск программы LABView и запуск интерфейса считывания и записи сигналов с блока измерения токов и напряжений;
- установка ручного регулятора лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) на минимальное значение выходного напряжения;
- подача напряжения от промышленной сети на вход ЛАТР;
- повышение выходного напряжения ЛАТР ручным регулятором с одновременным контролем действующего

значения тока в цепи на многофункциональном измерительном преобразователе SATEC PM130EH (SATEC PM130EH) до тех пор, пока действующее значение тока в цепи не установится на уровне номинального тока двигателя равного 4,9 А;

— фиксация значений частоты питающей сети, активной, реактивной и полной потребляемой мощности на SATEC PM130EH и мгновенных значений тока и напряжения в программе LABView.

В результате эксперимента были изменены значения частоты питающей сети, действующие значения активной, реактивной и полной мощности равные 50,02 Гц, 455 Вт, 3496 ВАр, 3525 ВА соответственно. Также получены мгновенные значения токов и напряжений, представленные на рисунке 4.

Как видно на рисунке 4, а, каждая фаза в сети предприятия на момент проведения экспериментальных исследований имеет несимметричную форму по амплитуде и фазе относительно друг друга. Величина несимметрии напряжений по обратной последовательности равняется 1,641 %, что находится в нормально допустимых значениях, регламентируемых ГОСТ 13109-97. Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения равняется 0,551 %, что находится в нормально допустимых значениях, регламентируе-



**Рисунок 4.** Мгновенные значения напряжения (а) и тока (б) при действующем значении тока в цепи измерения, равным 4,9 А

**Figure 4.** Instantaneous values of voltage (a) and current (b) at an effective value of current in the measurement circuit equal to 4,9 А

мых ГОСТ 13109-97. В свою очередь, на рисунке 4, *b* заметно, что ток в каждой обмотке фазы статора имеет синусоидальную форму, однако несимметричность по фазам и амплитудам сохраняется.

После проведения эксперимента и фиксации данных был произведен перевод экспериментальных трехфазных мгновенных значений напряжения и тока в двухфазную систему координат  $\alpha\beta$  (3), а затем выполнен расчет мгновенной потребляемой активной, реактивной и полной мощности по методике, описанной в (4)–(6). Результаты расчёта мгновенных значений мощностей представлены на рисунке 5.

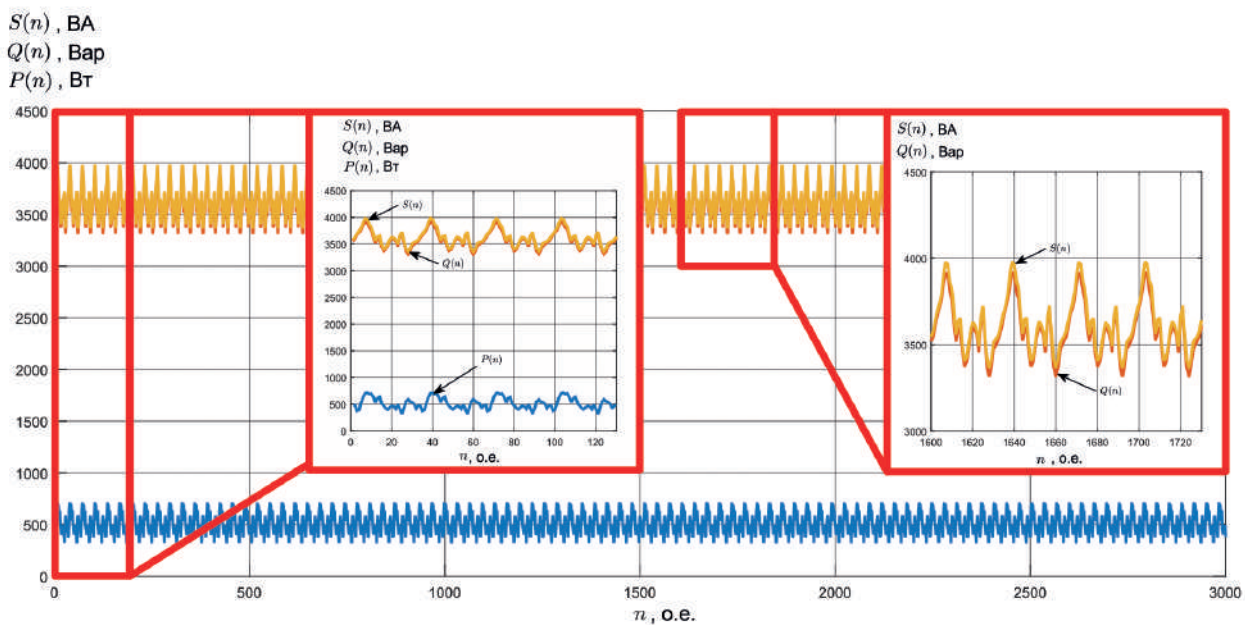
Как видно на рисунке 5, значения потребляемых активных, реактивных мощностей имеют установившийся колебательный характер, который отличается от прямолинейного характера потребляемых мощностей, приведенных в патентах [11, 12]. Такое отклонение от идеальной прямой объясняется тем, что в патентах [11, 12] для вычисления активной и

реактивной мощностей использовались синусоидальные, симметричные токи и напряжения, тогда как в данной статье используются реальные значения с имеющейся несимметрией. Также стоит отметить, что при увеличении несимметрии напряжений и токов возрастает и амплитуда колебаний мгновенных потребляемых мощностей.

После проведения эксперимента и получения мгновенных значений потребляемой мощности можно переходить к постановке задачи оптимизации, выбору способа ее решения и апробации выбранного способа.

### Задача оптимизации

Общая задача многомерной оптимизации формулируется следующим образом [14]: необходимо найти вектор параметров  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  таким образом, чтобы обеспечить минимизацию или максимизацию выбранной целевой функции  $f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)] \rightarrow \min/\max$ , определенную на  $n$ -мерном евклидовом



**Рисунок 5.** Мгновенные значения потребляемой активной, реактивной и полной мощности при действующем значении тока в цепи измерения равным 4,9 А

**Figure 5.** Instantaneous values of consumed active, reactive and apparent power at the current value of the current in the measurement circuit equal to 4,9 А

пространстве  $\mathbb{R}^n$ , заданной ограничениями области  $g(X) = [g_1(X), g_2(X), \dots, g_j(X)]$ .

### Целевая функция и ее исследование визуальным способом

Избавиться от знака невязки и произвести расчет значений целевой функции можно с двух фундаментальных позиций: избавление от знака невязки при помощи возведения в квадрат (МНК), либо избавлением от знака невязки при помощи взятия модуля (МНМ) [15–17]. И тот, и другой способы имеют свои преимущества и недостатки, описанные в [13–21], однако для чистоты эксперимента и дополнительной отработки алгоритма оптимизации составим две целевые функции и в дальнейшем сравним результаты, полученные при их оптимизации. Физический смысл представленных целевых функций заключается в оценке возможных вариантов решений  $\hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$  с последующим выбором наилучшего решения.

$$\Psi_{S\_sq} (t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m) = \int_0^t (S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m))^2 dt, \quad (8)$$

$$\Psi_{S\_mod} (t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m)| dt, \quad (9)$$

где  $S(t)$  — мгновенная полная потребляемая мощность АД с разомкнутым ротором, ВА;

$S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m)$  — мгновенная полная потребляемая мощность модели АД с разомкнутым ротором, ВА;

$\Psi_{S\_sq}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m)$  — значение целевой функции при избавлении от знака невязки при помощи возведения в квадрат, о.е.;

$\Psi_{S\_mod}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m)$  — значение целевой функции при избавлении от знака невязки при помощи взятия модуля, о.е.

После того как поставлена задача оптимизации и составлены уравнения целевых функций (8), (9), можно перейти

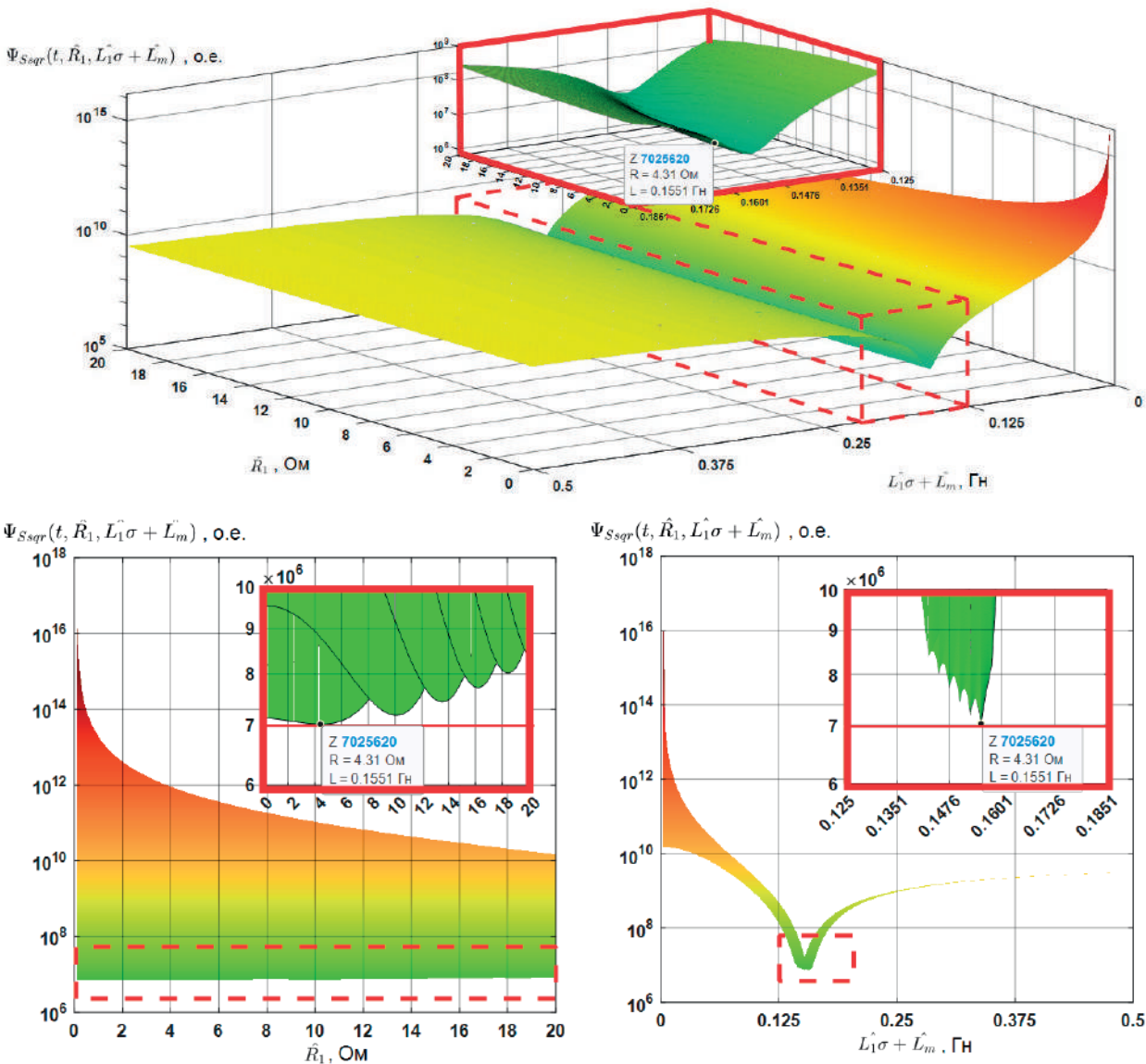
к решению задачи оптимизации при помощи какого-либо поискового алгоритма. Однако для того чтобы определиться с тем, насколько точно поисковый алгоритм нашел координаты глобального экстремума целевой функции и не попал ли он в локальный экстремум, необходимо выбрать эталонное значение, с которым будут сравниваться полученные результаты. Эталонным значением в данной статье будут являться координаты глобального экстремума целевых функций (8), (9), найденные визуальным способом.

Для получения графика целевых функций составим матрицу  $200 \times 200$  при изменении параметров  $\hat{R}_1 = 0, 0,1, \dots, 20$  и  $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m = 0, 0,0025, \dots, 0,5$ .

В результате составления матрицы значений целевых функций (8), (9) были получены графики, представленные на рисунках 6 и 7 с количеством точек в поисковом пространстве, равным  $4 \cdot 10^4$  единиц.

Полученные графики строились в среде MATLAB 2021 и отображены как отдельные объекты, ограниченные диапазоном изменения параметров  $\hat{R}_1$  и  $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$ . Такое представление целевой функции позволило при помощи встроенного инструментария MATLAB показать общий вид целевой функции, вид спереди и вид справа без фиксации параметров на одном значении.

В результате построения графиков целевой функции и их исследования можно заметить, что график имеет один глобальный экстремум. Дополнительные четыре гребенчатых выступа, наблюдаемые на рисунках 6, *b*, *c* и 7, *b*, *c*, образованы по причине большого шага изменения переменных  $\hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$  и особенностей визуализации данных пакетом MATLAB. Выступы пропадут, если уменьшить шаг изменения переменных, либо интерполировать полученную поверхность при помощи кубических сплайнов.



**Рисунок 6.** Графики значений целевой функции по МНК (8), при изменении  $\hat{R}_1$  и  $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$  (общий вид (а), вид спереди (б), вид сбоку (с))

**Figure 6.** Graph of the objective function values according to LSM (8), when changing  $\hat{R}_1$  and  $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$  (general view (a), front view (b), side view (c))

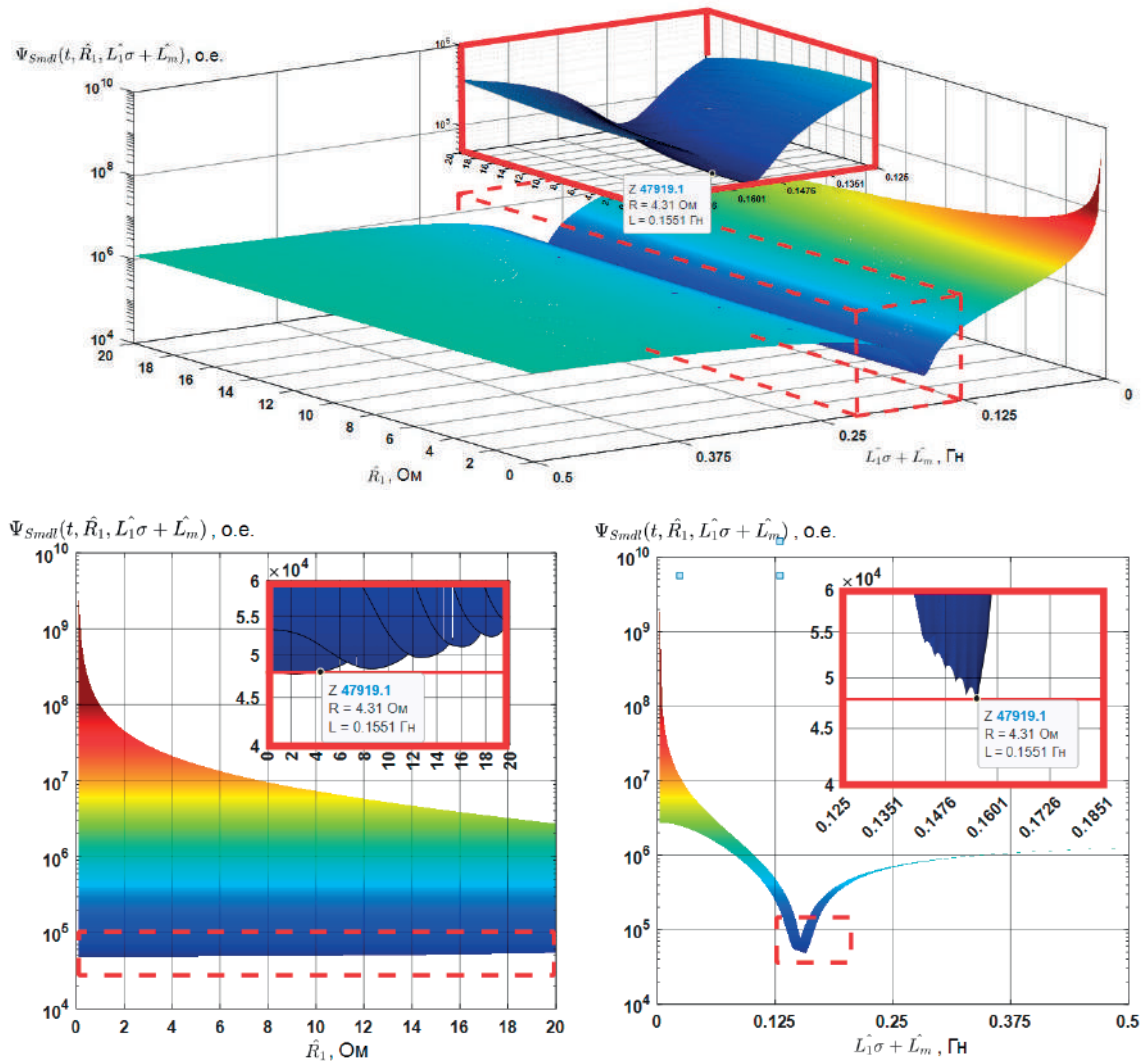
Значение глобального экстремума при построении функции по МНК равняется  $\Psi_{S\_sqr}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m) = 7025620$  о.е., по МНМ равняется  $\Psi_{S\_mal}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m) = 47919,1$  о.е., координаты глобального экстремума в том и другом случаях находятся в точке, где  $\hat{R}_1 = 4,31$  Ом,  $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m = 0,1551$  Гн.

**Выбор и описание работы метода решения поставленной задачи**

Существует множество методов решения задачи минимизации целевой функции. К классическим методам решения

задач оптимизации, которые возможно применять при решении задач минимизации целевой функции, относятся [13, 14]:

- метод градиентного спуска с постоянным шагом;
- метод наискорейшего градиентного спуска;
- метод покоординатного спуска;
- метод Флетчера-Ривса;
- метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла;
- метод Ньютона-Рафсона;
- метод Левенберга-Марквардта.



**Рисунок 7.** График значений целевой функции МНМ (9), при изменении  $\hat{R}_1$  и  $\hat{L}_1\sigma + \hat{L}_m$  (общий вид (а), вид спереди (б), вид сбоку (с))

**Figure 7.** Graph of the objective function values according to LMM (8), when changing  $\hat{R}_1$  and  $\hat{L}_1\sigma + \hat{L}_m$  (general view (a), front view (b), side view (c))

К положительным качествам данной группы методов можно отнести высокие скорости сходимости и небольшое потребление вычислительных ресурсов микроконтроллера. Однако для реализации данной группы методов необходимо обеспечить вычисление частных производных по каждому аргументу целевой функции, что при увеличении поискового пространства приведет к увеличению времени поиска всех экстремумов целевой функции, чтобы в дальнейшем зафиксировать глобальный экстремум.

Существуют также метаэвристические методы минимизации целевой функции, представленные на рисунке 8 [22–24].

Особенностью метаэвристических методов оптимизации, и в частности — эволюционных алгоритмов, является представление некоторого количества случайно выбранных решений, популяции, и проведение над ней определенных действий, таких как мутация и скрещивание, направленных на нахождение экстремума функции [13]. К положительным качествам данной группы методов можно отнести возможность минимизации недифференцируемых целевых функций, а также возможность избавления от знака невязки не только возведением в квадрат [14], но и взятием модуля невязки [22, 25, 26]. К отрицательным качествам данной

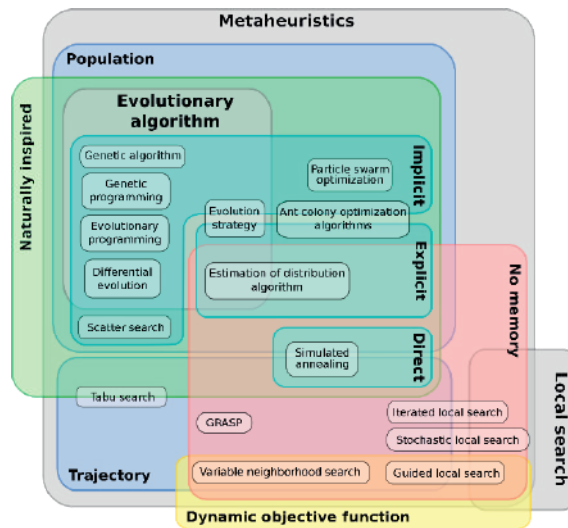


Рисунок 8. Классификация метаэвристических алгоритмов [25]

Figure 8. Different classifications of metaheuristics [25]

группы методов можно отнести значительные вычислительные мощности, требуемые для расчета алгоритма.

В предыдущей работе по данной тематике [27] для минимизации целевой функции был использован метод Ньютона, который показал свою работоспособность и высокую скорость сходимости. Однако при реализации данного способа на микроконтроллере были выявлены сложности при организации вычисления частных производных из дискретных данных. В связи с этим в данной работе для избавления от недостатков классических алгоритмов будет использован генетический алгоритм (ГА), который позволит только при

помощи логических операций оптимизировать целевую функцию необходимой размерности без избыточного увеличения времени работы программного обеспечения в микроконтроллере. Также применение генетического алгоритма позволит оптимизировать обе целевые функции (8), (9).

Поставим поисковую задачу генетическому алгоритму. Пусть необходимо найти глобальный экстремум функции  $f(X)$  в пространстве поиска  $g(X)$ , где  $\hat{x} = argminf(X)/argmaxf(X)$ ,  $\hat{x} \in X$ . Для нахождения экстремума целевой функции (8), (9) с помощью генетического алгоритма необходимо реализовать представленный на рисунке 9 алгоритм [25].

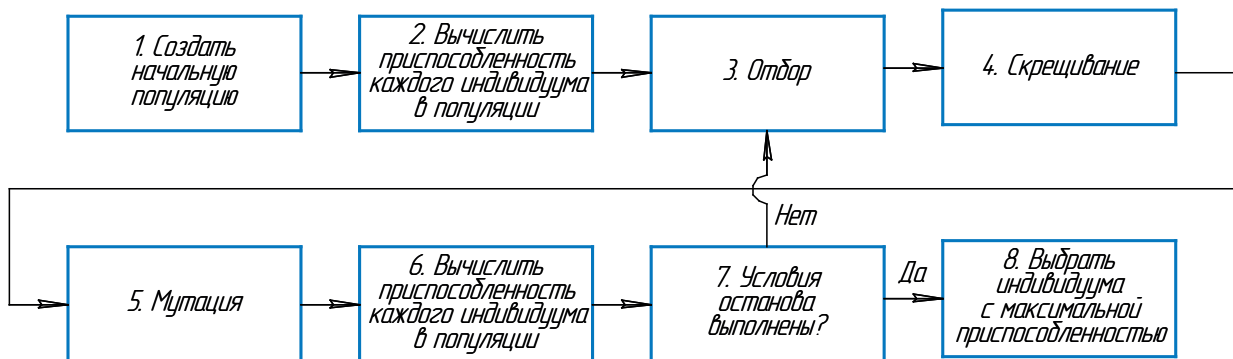


Рисунок 9. Функциональная схема работы генетического алгоритма

Figure 9. Functional diagram of the genetic algorithm



### 1. Создать начальную популяцию.

Для минимизации целевой функции  $f(X)$  и инициализации работы генетического алгоритма первым шагом необходимо создать начальную популяцию особей из количества случайно подобранных особей в популяции, чтобы в итоге иметь вектор-строку  $P^1 = \{p_1^1, p_2^1, \dots, p_n^1\}$ , где  $p_i^1 \in X$  (первое поколение,  $n$  — размер популяции).

### 2. Вычислить приспособленность каждого индивидуума в популяции.

Вычисление приспособленности особей в популяции состоит в расчете целевой функции  $f(X)$  для каждой особи этой популяции. Чем меньше значение этой целевой функции, тем вероятнее произойдет отбор этой особи при выполнении шага 3. Вычисляют приспособленность каждой особи в популяции следующим образом:  $F^k = \{f_1^k, f_2^k, \dots, f_n^k\}$ , где  $f_i^k = f(p_i^k)$ .

### 3. Отбор.

Существует множество методов отбора наилучшей особи в популяции, но одним из наиболее отработанных и часто применяемых методов является отбор по правилу рулетки, или отбор пропорциональной приспособленности. Суть этого метода заключается в том, что чем выше приспособленность особи (чем меньше значение целевой функции  $f(p_i^k)$ ), тем больше ее шанс оказаться в родительской выборке относительно других особей. Каждая особь получает шанс оказаться в родительском наборе по выражению  $\varepsilon(p_i^k) = P_r(p_i^k) \cdot n$ , где  $n$  — размер популяции, а  $P_r(p_i^k) = \frac{f(p_i^k)}{\sum_{i=1}^n \Psi_S(p_i^k)}$ .

### 4. Скрещивание.

Операция скрещивания (кроссовера) используется для комбинирования информации двух особей, имеющих наибольшую приспособленность и выбранных на предыдущем этапе 3 в качестве родителей.

Существует одноточечное, двухточечное,  $k$ -точечное, равномерное, упорядоченное скрещивание, скрещивание смешением и т.д. В данной статье использовалось скрещивание смешением. Основная идея этого смешения состоит в том, что выбираются две популяции родителей с набором особей  $p_1$  и  $p_2$ , затем последовательно перебираем каждую пару особей из наборов  $p_1$  и  $p_2$  для последующей генерации случайных особей на промежутке, который определяется формулой  $[p_{1i} - \alpha \cdot (p_{2i} - p_{1i}); p_{2i} + \alpha \cdot (p_{2i} - p_{1i})]$ , где  $p_{1i}, p_{2i}$  — особь первой и второй популяции родителей,  $\alpha$  — коэффициент приращения промежутка в диапазоне от 0 до 1.

### 5. Мутация.

Мутация — последний процесс в задаче создания нового поколения. Операция мутации применяется к потомку, созданному в результате процесса отбора и скрещивания. Операция мутации вероятностная и выполняется изредка с очень низкой вероятностью, для предотвращения эффекта вырождения популяций.

### 6. Вычислить приспособленность каждого индивидуума в популяции.

На 6 шаге повторно проводим определение приспособленности каждой особи в популяции, аналогично шагу 2.

### 7. Условия останова выполнены?

На 7 шаге проверяется условие останова по величине приспособленности особей в популяции, либо по критерию количества итерационных процедур. Если условие выполняется, то переходим к шагу 3, если нет то переходим к шагу 8.

### 8. Выбрать особь с максимальной приспособленностью.

На 8 шаге выбирается особь с максимальной приспособленностью относительно целевой функции.

Пример реализованного генетического алгоритма представлен в [24]. Основные параметры и настройки генетического алгоритма представлены в таблице 6.

Данные параметры устанавливались исходя из эмпирических опытов решения задачи оптимизации скриптами MATLAB и подбирались поэтапно, пока генетический алгоритм не стал давать стабильный результат на целевых функциях (8), (9), примерно находящийся в области результатов, полученных ранее при визуальном оценивании. Также стоит отметить важные особенности настройки генетического алгоритма:

— при ограничении области поиска ГА необходимо быть уверенным, что в данной области находится глобальный экстремум целевой функции;

— в отрицательной области имеется идентичный экстремум целевой функции, который может найти ГА, если задать область поиска в отрицательной области, однако найденные параметры не будут иметь физического смысла;

— при расширении диапазона поиска в параметрах № 3 и № 4 увеличивается количество точек решения в параметре № 13. Для стабильной работы ГА в таком случае необходимо увеличивать параметры № 6, № 7, № 11;

— при избыточном увеличении параметров № 6, № 7, № 9, № 11 ГА будет находить ближайший локальный экстремум и принимать его за решение, т.к. потомки, полученные при мутации и сортировке, будут пытаться «уходить» в околограничные области и всегда будут

**Таблица 6.** Параметры и настройки генетического алгоритма

**Table 6.** Parameters and settings of the genetic algorithm

№ п/п	Наименование параметра и настройки	Значение	
1	Используемые целевые функции	$\Psi_{S\_sqf} \left( \begin{matrix} t, \hat{R}_1, \\ \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m \end{matrix} \right)$	$\Psi_{S\_mdl} \left( \begin{matrix} t, \hat{R}_1, \\ \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m \end{matrix} \right)$
2	Размерность поискового пространства (количество генов, переменных) целевых функций, ед.	2	
3	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{R}_1$ , Ом	от 1 до 40	
4	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$ , Гн	от 0,0001 до 1	
5	Распределение значений для каждой поисковой особи	Случайное, в пределах ограничений поискового пространства	
6	Количество итераций, ед.	100	
7	Количество поисковых особей, ед.	100	
8	Количество потомков, ед.	2	
9	Вероятность отбора лучшей особи, %	40	
10	Приращение значения к родителю при отборе лучшей особи, о.е.	0,001	
11	Вероятность мутации, %	2,5	
12	Приращение значения к родителю при мутации лучшей особи, о.е.	0,001	
13	Количество точек решений в поисковом пространстве, ед.	38,9961 · 10 <sup>30</sup>	

давать результат хуже, чем результат, полученный в локальном экстремуме;

— от настройки параметров № 10 и № 12 зависит величина приращения потомков по отношению к родителям при мутации, либо сортировке. Большие значения параметров № 10 и № 12 приведут к большому отклонению потомка от родителя, что в большинстве случаев приводит к тому, что потомок получается с более плохим результатом, чем родитель.

### Результаты расчетов и их обсуждение

Применив описанный выше генетический алгоритм для оптимизации целевых функций, представленных в (8), (9), при настройках, указанных в таблице 6, получены значения идентифицируемых параметров и значение целевой функции при этих параметрах. Разница между визуальным оцениванием (ВО), представленным выше, и решением с помощью генетического алгоритма представлена в таблице 7.

Как видно из таблицы 7, генетический алгоритм нашел значения, при которых

значение целевой функции меньше значения целевой функции при параметрах, найденных при визуальном оценивании на 220 и 323,6 соответственно. Это говорит о том, что генетический алгоритм позволил найти более хорошее решение из-за большего количества точек в поисковом пространстве. Иными словами, эти значения можно принять как более предпочтительные для дальнейшего использования.

Проследим, как менялись значения, найденные генетическим алгоритмом, в процессе работы из таблицы 7 в зависимости от итерации на рисунке 10.

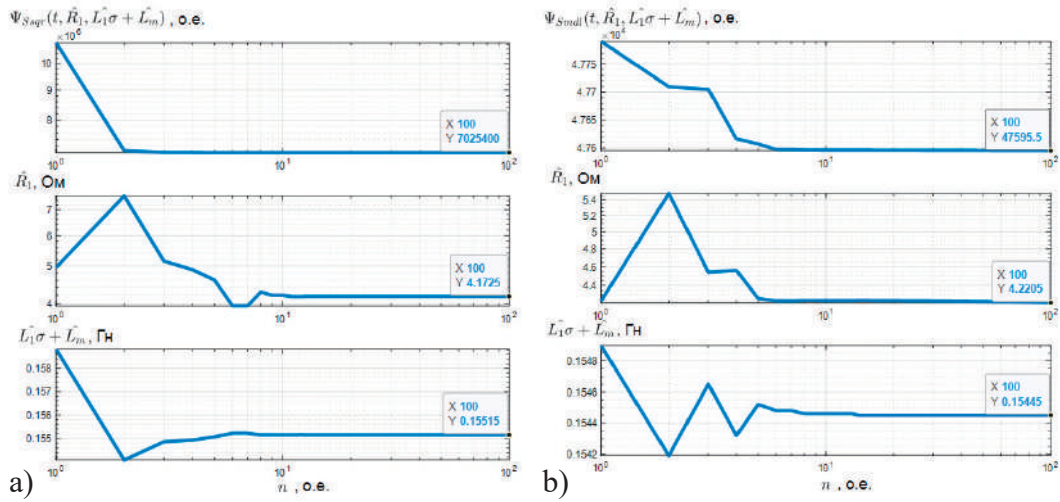
Анализируя рисунок 10, можно заметить, что итерационный процесс идентификации параметров АД с разомкнутым ротором на рисунке 10,  $a$  и  $b$  имеет установившийся характер в конечной части графика, что говорит о завершении итерационного процесса.

Для того чтобы определиться, какие же оцененные параметры наиболее подходят для использования их в качестве параметров настраиваемой математической модели, построим графики мгновенных

**Таблица 7.** Результаты работы генетического алгоритма в задаче оптимизации целевых функций и разница ( $\Delta$ ) между визуальным оцениванием (ВО) и решением при помощи генетического алгоритма (ГА)

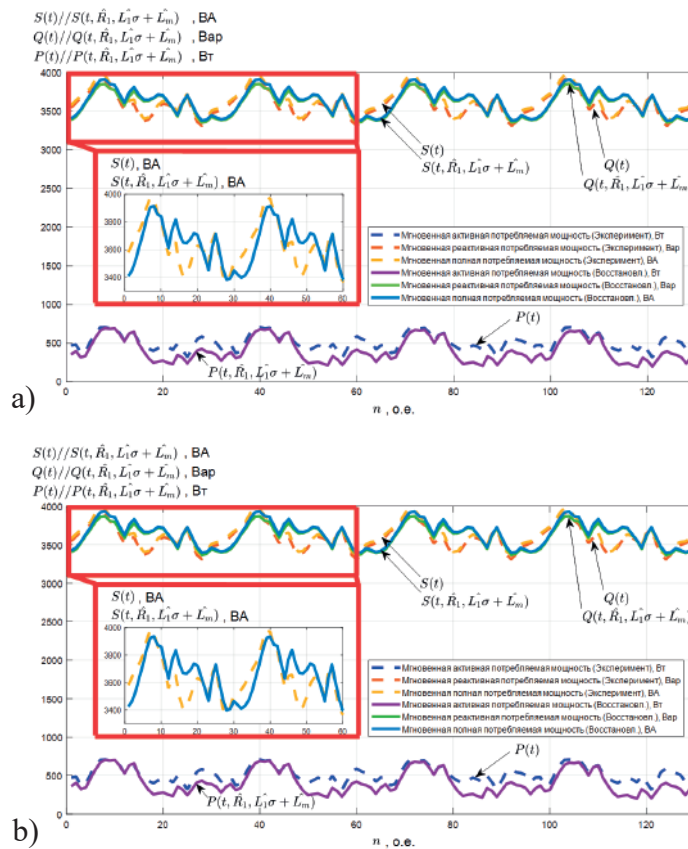
**Table 7.** The results of the genetic algorithm in the objective function optimization problem and the difference ( $\Delta$ ) between the graphical solution (BO) and the solution using the genetic algorithm (GA)

Метод избавления от знака невязки для построения целевой функции	Возведение в квадрат			Взятие модуля		
	ВО	ГА	$\Delta$	ВО	ГА	$\Delta$
Значение целевой функции в точке найденного решения, [о.е.]	7025620	7025400	220	47919,1	47595,5	323,6
Оцененное значение активного сопротивления статорной обмотки $\hat{R}_1$ , [Ом]	4,31	4,1725	0,1375	4,31	4,2205	0,0895
Оцененное значение эквивалентной индуктивности статорной обмотки $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m$ , [Гн]	0,1551	0,15515	0,00005	0,1551	0,15445	0,00065



**Рисунок 10.** Итерационный процесс работы генетического алгоритма: при избавлении от знака невязки возведением в квадрат (а), при избавлении от знака невязки взятием модуля (б)

**Figure 10.** Iterative process of the genetic algorithm: when getting rid of the sign of the residual by squaring (a), when getting rid of the sign of the residual by taking the modulo (b)



**Рисунок 11.** Экспериментальное и восстановленное значение мгновенной полной потребляемой мощности: при параметрах, найденных генетическим алгоритмом при использовании целевой функции с избавлением от знака невязки возведением в квадрат (а); при параметрах, найденных генетическим алгоритмом при использовании целевой функции с избавлением от знака невязки путем взятия модуля (б)

**Figure 11.** Experimental and restored value of the instantaneous total power consumption: when getting rid of the residual sign by squaring (a), when getting rid of the residual sign by taking the modulo (b)

венной полной потребляемой мощности при использовании двух наборов оцененных параметров относительно экспериментального значения на рисунке 11.

Анализируя рисунок 11, стоит обратить внимание на то, что форма сигнала полной потребляемой мощности модели приблизительно равна форме экспериментального сигнала. Из этого можно сделать вывод о том, что принятые допущения при составлении настраиваемой математической модели объекта исследования правомерны, и составленная математическая модель позволяет моделировать реальные физические процессы, происходящие в АД с разомкнутой обмоткой ротора. Между рисунками 11, *a* и *b* визуально не наблюдается значительных различий, из-за чего не представляется возможным определить, какой набор оцененных параметров схемы замещения предпочтительнее использовать. Для определения предпочтительного набора оцененных параме-

тров проанализируем погрешность при восстановлении сигнала полной потребляемой мощности по формуле (результаты приведены в таблице 8):

$$\varepsilon_S = \sqrt{\frac{\int_0^t (S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m))^2 dt}{\int_0^t S(t)^2 dt}} \cdot 100. \quad (10)$$

Как видно из таблицы 8, наименьшая погрешность восстановления сигнала потребляемой полной мощности, полученная при использовании параметров, найденных генетическим алгоритмом с целевой функцией  $\Psi_{S\_mal}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m)$ , составляет 3,4239 %, что позволяет сделать формальный вывод о том, что предпочтительнее использовать значения, полученные с применением МНМ. Однако разница между двумя погрешностями составляет менее 0,1 %, что не позволяет гарантированно сказать, какой способ избавления от знака невязки предпочтительнее.

**Таблица 8.** Погрешность восстановления сигнала полной потребляемой мощности относительно экспериментального сигнала

**Table 8.** Error of reconstruction of the total power consumption signal relative to the experimental signal

Метод избавления от знака невязки для построения целевой функции	Возведение в квадрат	Взятие модуля
Значение погрешности восстановления сигнала мгновенной полной потребляемой мощности настраиваемой математической модели относительно экспериментального значения, %	3,5181	3,4239

### Выводы

В статье исследованы и показаны результаты работы динамической идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме, при помощи которой удалось восстановить сигнал мгновенной потребляемой полной мощности. В результате исследования было выявлено, что параметры схемы

замещения равняются  $\hat{R}_1 = 4,2205$  Ом,  $\hat{L}_{1\delta} + \hat{L}_m = 0,15445$  Гн. При таких значениях настраиваемая математическая модель позволяет восстановить сигнал полной потребляемой мощности с погрешностью, равной  $\varepsilon_S = 3,4239$  %.

Максимальная погрешность при восстановлении сигнала потребляемой полной мощности не превышает 5 %. Это, в свою очередь, говорит о том, что оцененные параметры АД с разомкнутой обмот-

кой ротора являются достоверными, а сам генетический алгоритм возможно применять для оценки параметров электротехнических систем.

Также исследована работа генетического алгоритма в задаче оптимизации целевой функции в заданном ограничениими диапазоне. Использование генетического алгоритма дало следующие преимущества перед использованием метода Ньютона, а именно:

1) отсутствует необходимость вычислять частные производные по каждой искомой переменной;

2) возможно применять способ избавления от знака невязки при помощи взятия модуля разности;

3) отсутствует необходимость выбора первоначальных приближений.

В будущем методика динамической идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности ляжет в основу процесса идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, которая, в свою очередь, станет частью подсистемы идентификации параметров электротехнического комплекса «длинный кабель — асинхронный двигатель» в составе УЭЦН.

#### Список источников

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. М.: Юрид. лит., 2020. 93 с.

2. Глазырин А.С., Исаев Ю.Н., Кладиев С.Н., Леонов А.П., Раков И.В., Колесников С.В., Ланграф С.В., Филипас А.А., Копырин В.А., Хамитов Р.Н., Ковалев В.З., Лавринович А.В. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 6. С. 186-197.

3. Глухманчук Е.Д., Крупицкий В.В., Леонтьевский А.В. Баженовская нефть — «сланцевые технологии» и отечественный опыт добычи // Недрапользование XXI век. 2015. № 7. С. 32-37.

4. Рыжкова С.В., Бурштейн Л.М., Ершов С.В., Казаненков В.А., Конторович А.Э., Конторович В.А., Нехаев А.Ю., Никитенко Б.Л., Фомин М.А., Шурыгин Б.Н., Бейзель А.Л., Борисов Е.В., Золотова О.В., Калинина Л.М., Пономарева Е.В. Баженовский горизонт Западной Сибири: строение, корреляция и толщины // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 7. С. 1053-1074.

5. Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Казаненков В.А., Конторович В.А., Костырева Е.А., Пономарева Е.В., Рыжкова С.В., Ян П.А. Баженовская свита — главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2014. № 2 (10). С. 2-10.

6. Конторович А.Э. За нефтью и газом нужно идти в Арктику. На баженовскую свиту и на мелкие месторождения... // Нефтегазовая вертикаль. 2019. № 14 (458). С. 12-17.

7. Якимов С.Б. Современное состояние и перспективные направления снижения тепловых потерь в кабельных линиях УЭЦН большой мощности в ОАО «НК «Роснефть» // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. № 3. С. 40-46.

8. Liang X., He J., Du L. Electrical Submersible Pump System Grounding: Current Practice and Future Trend // IEEE Trans. Ind. Appl. 2015. Vol. 5. P. 5030-5037.

9. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Trans. Ind. Appl. 2017. Vol. 53. P. 3164-3174.

10. Bremner C., Harris G., Kosmala A., Nicholson B., Ollre A., Percy M. e.a. Evolving Technologies: Electrical Submersible Pumps // Oilfield Rev. 2006. Vol. 18. P. 30-43.

11. Пат. 2689994 РФ, МПК G 01 R 21/06 (2006.01), G 01 R 21/08 (2006.01). Способ измерения активной мощности в трехфазной симметричной сети / В.В. Тимошкин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, О.С. Качин. 2018130953; Заявлено 27.08.2018; Опубл. 30.05.2019. Бюл. 16. 12 с.

12. Пат. 2629907 РФ, МПК G 01 R 21/06 (2006.01). Способ измерения реактивной мощности в трехфазной симметричной электрической цепи / А.С. Глазырин, В.И. Полищук, В.В. Тимошкин. 2016137424; Заявлено 19.09.2016; Опубл. 04.09.2017. Бюл. 25. 14 с.

13. Буньков Д.С. Алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения регулируемой асинхронной машины по кривым затухания фазных токов: дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2022. 166 с.
14. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. СПб.: Лань, 2021. 512 с.
15. Fung R.F. e.a. Adaptive Real-Coded Genetic Algorithm for Identifying Motor Systems // *Modern Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 5.No. 03. P. 69.
16. Huang K.S. e.a. Parameter Identification for FOC Induction Motors Using Genetic Algorithms with Improved Mathematical Model // *Electric Power Components and Systems*. 2001. Vol. 29. No. 3. P. 247-258.
17. Alonge F. e.a. Parameter Identification of Induction Motor Model Using Genetic Algorithms // *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*. 1998. Vol. 145. No. 6. P. 587-593.
18. Шубин С.С., Ямалиев В.У., Глазырин А.С., Буньков Д.С., Кладиев С.Н., Раков И.В., Боловин Е.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 1. С. 204-214.
19. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. М.: ДМК Пресс, 2020. 1002 с.
20. Bajrektarevic E. Parameter Identification of Induction Motor Using a Genetic Algorithm: Graduate Theses, Dissertations. 2002. 121 p.
21. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. 2-е изд. М.: Горячая линия — Телеком, 2013. 384 с.
22. Storn R., Price K., Lampinen J. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2005. 285 p.
23. Naredo E. *Genetic Programming Based on Novelty Search*: Diss. ИТТ. Instituto tecnologico de Tijuana, 2016. 233 p.
24. Результаты экспериментов для статьи «Генетический алгоритм в задаче динамической идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя» [Персональная страница И. В. Ракова]. URL: <https://github.com/rivscience/2-Adaptive-estimation-parameters-of-induction-motor-with-using-GA.git> (дата обращения: 30.06.2022).
25. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. М.: МАИ, 2009. 160 с.
26. Storn R., Price K. Differential Evolution — A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces // *Journal of Global Optimization*. 1995. No. 23(1). P. 1–12.
27. Раков И.В. Экспериментальное исследование работоспособности методики адаптивной идентификации электрических параметров асинхронной машины с разомкнутой обмоткой ротора в установившемся режиме на основе баланса мощностей // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2022. Т. 18, № 1. С. 63-76.

## References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2035 goda* [Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035]. Moscow, State Publ. House of Legal Literature, 2020. 93 p. [in Russian].
2. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Lavrinovich A.V. Opredelenie pogonnykh elektro-tekhnicheskikh parametrov neftepogruzhnogo kabelya [Determination of Running Electrical Characteristics of Oil Submersible Cable]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, Vol. 332, No. 6, pp. 186-197. [in Russian].
3. Glukhmanchuk E.D., Krupitskii V.V., Leont'evskii A.V. Bazhenovskaya neft' — «slantsevye tekhnologii» i otechestvennyi opyt dobychi [Bazhenov Oil — «Shale Technologies» and Domestic Production Experience]. *Nedropol'zovanie XXI vek — Subsoil Use of the XXI Century*, 2015, No. 7, pp. 32-37. [in Russian].
4. Ryzhkova S.V., Burshtein L.M., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Nekhaev A.Yu., Nikitenko B.L., Fomin M.A., Shurygin B.N., Beizel' A.L., Borisov E.V., Zolotova O.V., Kalinina L.M., Ponomareva E.V. Bazhenovskii gorizont Zapadnoi Sibiri: stroenie, korrelyatsiya i tolshchiny [Bazhenov Horizon of Western Siberia: Structure, Correlation and Thickness]. *Geologiya i geofizika — Geology and Geophysics*, 2018, Vol. 59, No. 7, pp. 1053-1074. [in Russian].
5. Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Kazanenkov V.A., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Ponomareva E.V., Ryzhkova S.V., Yan P.A. Bazhenovskaya svita — glavnyi istochnik resursov netraditsionnoi nefti v Rossii [Bazhenov Formation — the Main Source of Unconventional Oil Resources in Russia]. *Georesursy, geoenergetika,*

*geopolitika — Georesources, Geoenergy, Geopolitics*, 2014, No. 2 (10), pp. 2-10. [in Russian].

6. Kontorovich A.E. Za neft'yu i gazom nuzhno idti v Arktiku. Na bazhenovskuyu svitu i na melkie mestorozhdeniya... [For Oil and Gas You Need to Go to the Arctic. To the Bazhenov Suite and Small Deposits ...]. *Neftegazovaya vertikal' — Oil and Gas Vertical*, 2019, No. 14 (458), pp. 12-17. [in Russian].

7. Yakimov S.B. Sovremennoe sostoyanie i perspektivnye napravleniya snizheniya teplovykh poter' v kabel'nykh liniyakh UETsN bol'shoi moshchnosti v OAO «NK "Rosneft"» [Current State and Promising Directions for Reducing Heat Losses in Cable Lines of High-Power ESP in OAO NK Rosneft]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex*, 2016, No. 3, pp. 40-46. [in Russian].

8. Liang X., He J., Du L. Electrical Submersible Pump System Grounding: Current Practice and Future Trend. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2015, Vol. 5, pp. 5030-5037.

9. Liang X., Ghoreishi O., Xu W. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, Vol. 53, pp. 3164-3174.

10. Bremner C., Harris G., Kosmala A., Nicholson B., Ollre A., Pearcy M. e.a. Evolving Technologies: Electrical Submersible Pumps. *Oilfield Rev.*, 2006, Vol. 18, pp. 30-43.

11. Timoshkin V.V., Glazyrin A.S., Kladiyev S.N., Kachin O.S. Sposob izmereniya aktivnoi moshchnosti v trekhfaznoi simmetrichnoi seti [Method of Measuring Active Power in a ThreePhase Symmetrical Network]. Patent RF, No. 2689994, 2019. [in Russian].

Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V. Sposob izmereniya reaktivnoi moshchnosti v trekhfaznoi simmetrichnoi elektricheskoi tsepi [Method for Measuring Reactive Power in Three-Phase Symmetric Electrical Circuit]. Patent RF, No. 2629907, 2017. [in Russian].

13. Bun'kov D.S. *Algoritmy predvaritel'noi identifikatsii pa-rametrov skhemy zameshcheniya reguliruemoi asinkhronnoi mashiny po krivym zatukhaniya faznykh tokov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Algorithms for Preliminary Identification of the Parameters of the Equivalent Circuit of an Adjustable Asynchronous Machine according to the Decay Curves of Phase Currents: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Tomsk, 2022. 166 p. [in Russian].

14. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization

Methods in Examples and Tasks]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2021. 512 p. [in Russian].

15. Fung R.F. e.a. Adaptive Real-Coded Genetic Algorithm for Identifying Motor Systems. *Modern Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 5, No. 03, pp. 69.

16. Huang K.S. e.a. Parameter Identification for FOC Induction Motors Using Genetic Algorithms with Improved Mathematical Model. *Electric Power Components and Systems*, 2001, Vol. 29, No. 3, pp. 247-258.

17. Alonge F. e.a. Parameter Identification of Induction Motor Model Using Genetic Algorithms. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 1998, Vol. 145, No. 6, pp. 587-593.

18. Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bun'kov D.S., Kladiyev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya pogruzhnogo elektrodvigatelya na osnovanii dannykh ispytaniy [Estimation of Submersible Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Based on Test Data]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, Vol. 332, No. 1, pp. 204-214. [in Russian].

19. Saimon D. *Algoritmy evolyutsionnoi optimizatsii* [Evolutionary Optimization Algorithms]. Moscow, DMK Press Publ., 2020. 1002 p. [in Russian].

20. Bajrektarevic E. *Parameter Identification of Induction Motor Using a Genetic Algorithm: Graduate Theses, Dissertations*. 2002. 121 p.

21. Rutkovskaya D. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i ne-chetkie sistemy* [Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems]. Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2013. 384 p. [in Russian].

22. Storn R., Price K., Lampinen J. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2005. 285 p.

23. Naredo E. *Genetic Programming Based on Novelty Search: Diss. ITT*. Instituto tecnologico de Tijuana, 2016. 233 p.

24. *Rezultaty eksperimentov dlya stat'i «Geneticheskii algoritm v zadache dinamicheskoi identifikatsii parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya»* [Results of Experiments for the article «Genetic Algorithm in the Problem of Dynamic Identification of the Parameters of the Equivalent Circuit of an Induction Motor»]. [Personal site of I.V. Rakov]. URL: <https://github.com/rivscience/2-Adaptive-estimation-parameters->



of-induction-motor-with-using-GA.git (accessed 30.06.2022). [in Russian].

25. Panteleev A.V. *Metaevristicheskie algoritmy poiska global'nogo ekstremuma* [Metaheuristic Algorithms for finding the Global Extremum]. Moscow, MAI, 2009. 160 p. [in Russian].

26. Storn R., Price K. Differential Evolution — A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 1995, No. 23 (1), pp. 1-12.

27. Rakov I.V. Eksperimental'noe issledovanie rabotosposobnosti metodiki adaptivnoi identifikatsii elektricheskikh parametrov asinkhronnoi mashiny s razomknutoi obmotkoi rotora v ustanovivshemsya rezhime na osnove balansa moshchnosti [Experimental Research Method of Adaptive Estimation Parameters Open Wound-Rotor Induction Motor in a Steady State Mode]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2022, Vol. 18, No 1, pp. 63-76. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.*

*The article was submitted 10.01.2023; approved after reviewing 17.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.*

Научная статья

УДК 621.928

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-49-57

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ



**Виктор Иванович Чарыков**  
**Viktor I. Charykov**

доктор технических наук, профессор, профессор структурного подразделения высшего образования «Курганский институт железнодорожного транспорта» — филиал Уральского государственного университета путей сообщения, Курган, Россия



**Александр Андреевич Евдокимов**  
**Alexander A. Evdokimov**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и электроэнергетика», Сургутский государственный университет, Сургут, Россия



**Роберт Радикович Саттаров**  
**Robert R. Sattarov**

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



**Игорь Иванович Копытин**  
**Igor I. Kopytin**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровая энергетика», Курганский государственный университет, Курган, Россия

### Актуальность

Очистка сыпучих сельскохозяйственных продуктов от металломагнитных примесей на сегодняшний день представляет актуальную проблему, которую необходимо решать, так как она приводит к значительным материальным и экономическим потерям. Магнитные и электромагнитные методы очистки основаны на различии в магнитных свойствах разделяемых продуктов, главным образом на различии в их магнитной восприимчивости. В рабочей зоне сепаратора различают зону притяжения магнитных частиц, высота которой определяется минимальным расстоянием между рабочим органом и поверхностью

### Ключевые слова

конструирование, электромагнитный сепаратор, параметризация, номограмма, металломагнитная частица

неподвижного полюса, и зону транспортирования магнитного продукта к месту разгрузки. Магнитное поле в рабочей зоне сепаратора создается системами из постоянных магнитов или электромагнитными системами с обмоткой. Параметрическое конструирование является основой для ведения проектно-конструкторских работ при разработке электромагнитного сепаратора и позволяет уточнить конечную цель установки уже на ранних стадиях реализации проекта.

#### **Цель исследования**

В данной статье рассматривается оптимизация конструктивных и режимных параметров электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами.

#### **Методы исследования**

В данном исследовании предлагается использовать номограммно-параметрическое конструирование как электромагнитного сепаратора, так и его режимных параметров. Номограммная параметризация заключается в создании номограммы для определения режимных параметров электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами.

#### **Результаты**

На основе установленной взаимосвязи конструктивных и режимных параметров сепарации в рабочей зоне сепаратора разработана номограмма, позволяющая по заданной высоте рабочей зоны определить показатели электромагнитной системы, величину магнитной индукции в зависимости от неоднородности магнитного поля, а также решить обратную задачу, определить конструктивные параметры рабочей зоны при заданных показателях электромагнитной системы.

**Для цитирования:** Чарыков В. И., Евдокимов А. А., Саттаров Р. Р., Копытин И. И. Оптимизация конструктивных параметров электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 49-57. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-49-57>.

Original article

## **OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF AN ELECTROMAGNETIC SEPARATOR WITH PERMANENT MAGNETS**

#### **The relevance**

Cleaning of bulk agricultural products from metallomagnetic impurities is an urgent problem that needs to be solved today, as it leads to significant material and economic losses. Magnetic and electromagnetic purification methods are based on the difference in the magnetic properties of the separated products, mainly on the difference in their magnetic susceptibility. In the working area of the separator, there is a zone of attraction of magnetic particles, the height of which is determined by the minimum distance between the working body and the surface of the fixed pole, and the zone of transportation of the magnetic product to the unloading site. The magnetic field in the working area of the separator is created by systems of permanent magnets or electromagnetic systems with winding. Parametric design is the basis for conducting design work during the development of an electromagnetic separator and allows you to clarify the final purpose of the installation already at the early stages of the project.

#### **Ключевые слова**

construction, electromagnetic separator, parametrization, nomogram, metallomagnetic particle

**Aim of research**

This article deals with optimization of design and mode parameters of electromagnetic separator with permanent magnets.

**Research methods**

In this study it is proposed to use nomogram-parametric design, both electromagnetic separator and its mode parameters. Nomogram parametrization consists in creating a nomogram to determine the mode parameters of electromagnetic separator with permanent magnets.

**Results**

Based on the established relationship of design and mode parameters of separation in the separator's working zone, a nomogram was developed that allows to determine the parameters of the electromagnetic system, the value of magnetic induction, depending on the heterogeneity of the magnetic field, as well as solve the inverse problem, determine the design parameters of the working zone with the given indicators of the electromagnetic system.

**For citation:** Charykov V.I., Evdokimov A.A., Sattarov R. R., Kopytin I.I. Optimizatsiya konstruktivnykh parametrov elektromagnitnogo separatora s postoyannymi magnitami [Optimization of Design Parameters of an Electromagnetic Separator with Permanent Magnets]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 49-57 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-49-57>.

**Введение**

Сельскохозяйственная продукция, обладающая сыпучестью (мука, комбикорм, семена масличных культур), может содержать большое количество различных включений. Эти включения состоят в основном из черных металлов, таких как чугун, стальные детали, детали из железа. Кроме того, эти включения часто называют металлическими магнитными примесями, ферропримесями или просто металлическими частицами с магнитными свойствами.

Параметры и геометрические размеры существующих металлических включений в виде деталей размером менее 0,001 мм и элементов размером в несколько десятков сантиметров в разы больше размеров сыпучей смеси. Причиной появления металлических частиц в сыпучей смеси является как рабочий износ элементов машины, так и случайное попадание в сельскохозяйственную продукцию различных болтов, гвоздей, гаек, игл и деталей машин.

Частицы металлических элементов, попадающие в рабочие органы перераба-

тывающей сельскохозяйственной техники, могут повредить рабочие детали, привести к физическому износу вращающихся деталей, а также к авариям и неисправностям. В некоторых случаях эти частицы вызывают образование искр, что впоследствии приводит к взрывам и воспламенению на перерабатывающих заводах. Металлические сита сепараторов, самотечные трубы, бичи и рабочие поверхности обочных и щеточных машин значительно быстрее изнашиваются при переработке зерна, засоренного металлическими примесями [1, 2]. Металлические сита сепараторов, самотечные трубы, рабочие элементы обочных машин подвергаются более быстрому износу в процессе обработки зерна, которое содержит металлические примеси.

Элементы молотковых дробилок, имеющих острые грани, рабочие элементы вальцевых станков становятся не такими острыми, как это требует технология, их режущие кромки закругляются, что не только засоряет продукт металлическими примесями, но и резко снижает технологическую эффективность работы ма-

шины, снижается ее производительность и повышается расход электроэнергии.

Следовательно, совершенно недопустимым является наличие металлических примесей в сыпучей сельскохозяйственной продукции, предназначенной для продовольственных и кормовых целей. Соприсутствие металлопримесей в агропромышленном сырье, наличие их в готовой продукции или полуфабрикате не должно быть по следующим причинам:

— продукты, получаемые в результате переработки зерна, предназначены для пищевых целей; а также для производства комбикорма;

— наличие металлопримесей в сельскохозяйственной смеси приводит к повреждению, выходу из строя рабочих органов перерабатывающих машин и аппаратов;

— во время взаимодействия металлических частиц с работающими органами машин происходит искрообразование, что не исключает пожары и взрывы [3].

Для отделения металлопримесей от зерна и продуктов переработки на предприятиях — мельницах, элеваторах и крупозаводах — применяются железоотделители — магнитные и электромагнитные сепараторы. На предприятиях по производству муки сепараторы ставятся в начале и в конце технологической линии, в зерноочистительное и размольное отделения, перед машиной, осуществляющей мокрое шелушение, обочной машиной, вальцевыми станками и молотковыми дробилками.

Принцип сепарирования заключается в разнице магнитных свойств, которыми обладают рабочая смесь и металлические частицы. Процесс сепарирования заключается в отделении от потока сыпучей смеси, движущейся с определенной скоростью, металломагнитных частиц. Металлические частицы изменяют свою траекторию движения под действием магнитной силы. Процесс сепарирования

разделяется на два этапа: движение металломагнитной частицы к полюсу и удержание частицы на концентраторе магнитного поля сепаратора. Продукт, содержащий металлопримеси, заставляют протекать в непосредственной близости от системы магнитов, электромагнитов. При этом металлические частицы, оказавшиеся в магнитном поле, притягиваются к концентраторам магнитного поля, в то время как остальная часть продукта продолжает свое движение. Крупные металломагнитные примеси отделяют от основного продукта с помощью просеивания на различных ситах. Для очистки сельскохозяйственной продукции от примесей, геометрические размеры которых примерно одинаковые или значительно меньше размеров зерен, используют магнитные или электромагнитные сепараторы-железоотделители [4–6].

Конструкции сепараторов классифицируются по способу получения и образования неоднородного магнитного поля: сепараторы-железоотделители с постоянными магнитами и сепараторы-железоотделители с электромагнитами. К основным недостаткам сепараторов с постоянными магнитами можно отнести ручную очистку, необходимость периодически восстанавливать технические характеристики постоянных магнитов. Электромагнитные сепараторы данных недостатков не имеют, но являются источниками опасности и отличаются значительно более сложной конструкцией.

Очистка продукции агропромышленного комплекса от металломагнитных примесей на сегодняшний день представляет актуальную проблему, которую необходимо решать, так как она приводит к значительным материальным потерям и экономическим затратам.

### **Материалы и методы**

В качестве основного способа конструирования электромагнитных сепара-

торов с постоянными магнитами предлагается метод параметризации. Параметризация, параметрическое конструирование взяты за основу при проектировании электромагнитных сепараторов-железоотделителей и позволяют увидеть конечную цель проектирования уже на ранних стадиях.

Существует несколько видов параметризации. Основные виды: табличная, иерархическая, вариационная и геометрическая параметризации.

В первом случае создается таблица параметров типовых деталей и далее выбирается новый экземпляр. Недостатки: ограниченные возможности, поскольку задание новых параметров и геометрических отношений не всегда возможно.

Сущность иерархической параметризации или параметризации на основе истории построений сводится к тому, что в ходе построения модели вся последовательность конструирования отображается в виде имитационного моделирования. Недостатки: имитационная модель может быть очень сложной, пересчет модели потребует значительное количество времени.

В третьем случае в основе параметризация лежит методика построения эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложения ограничений конструктором в виде системы дифференциальных уравнений, определяющих зависимости между параметрами. Недостатки: ограниченность при выборе примитивов, определенные затруднения при структурном синтезе.

Под геометрической параметризацией понимают моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта рассчитывается от параметров родительских объектов и в зависимости от их положения. Применение технологии параметрического конструирования

дает возможность легко варьировать формой модели и, как следствие, у конструктора появляется возможность быстро и эффективно получать альтернативные модели или конструкции, а также пересмотреть концепцию электромагнитного сепаратора в целом [7–10].

Нами предлагается использовать номограммно-параметрическое конструирование как электромагнитного сепаратора, так и его режимных параметров. Номограммная параметризация заключается в создании номограммы для определения режимных параметров электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами (рисунок 1).

### Результаты и обсуждение

Для очистки сельскохозяйственной продукции от примесей металлов к электромагнитным сепараторам предъявляется ряд требований, что приводит к надежной работе сепараторов при невысоких эксплуатационных расходах. Наиболее важными из этих требований являются: бесперебойная работа конструкций и повышенная надежность; соблюдение требований пожарной и промышленной безопасности, экономическая эффективность сепараторов.

Технические требования применяются к конструкциям сепараторов. Эти требования указаны в технических, нормативных документах в установленном порядке.

Для железоотделителей разных конструкций необходимо выполнить следующие требования:

1. должна осуществляться очистка металломагнитных частиц с рабочей поверхности сепаратора;
2. возможность установки на сепаратор систем дистанционного и автоматического управления;
3. возможность проверить сепарированную продукцию на наличие металлических частиц;

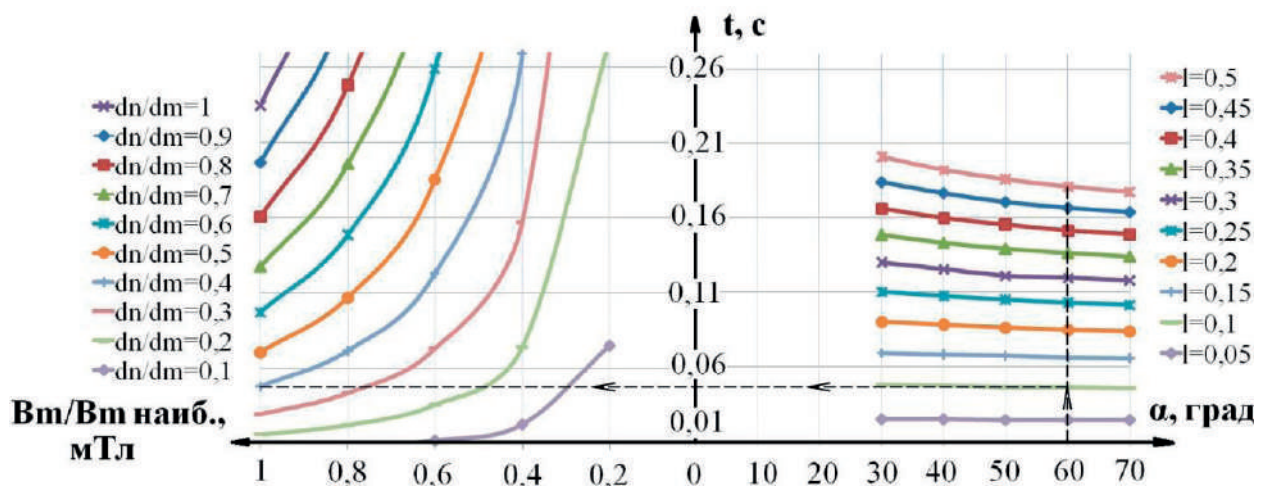


Рисунок 1. Номограмма для определения режимных параметров электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами

Figure 1. Nomogram for determining the operating parameters of an electromagnetic separator with permanent magnets

4. возможность осуществить замену или ремонт поврежденных деталей, элементов конструкции в условиях производства;

5. возможность проверять конструкцию и устройства сепараторов во время технологических перерывов; проводить осмотры основных элементов сепараторов, таких как концентраты, приводов во время работы сепаратора;

6. защита от попадания посторонних тел в рабочую зону сепаратора;

7. возможность проводить разбор узлов с подшипниками, проводить их техническое обслуживание, смазывать, не прибегая к съему или разбору вала, ротора, барабана;

8. защита от попадания пыли, грязи, мусора, посторонних частиц в подшипник, а также защита его от вытекания смазки.

Для сепарирования сыпучих продуктов сельскохозяйственного назначения применяют железотделители, различные по типу и конструкции.

По конструкции сепараторы могут быть подвесные или просыпные, которые без дополнительного оборудования устанавливаются в любую технологиче-

скую линию. Тип сепаратора определяется наличием постоянных магнитов, электромагнитов или комбинированные.

Сепараторы на электромагнитах и постоянных магнитах — это устройства, отделяющие металломагнитные примеси, частицы от немагнитного продукта: муки, комбикорма, семени подсолнуха. Слабомагнитные примеси, которые также отрицательно влияют на качество исходного сырья и переработанной конечной продукции, извлекаются в основном сепараторами с комбинированной системой получения неоднородного магнитного поля.

На сегодняшний день для очистки семян масличных культур применяют в основном сепараторы на постоянных магнитах, которые не обеспечивают требуемое качество очистки. Отклонение от действующих норм на наличие металломагнитных примесей в масличных культурах было выявлено на маслоперерабатывающих заводах Курганской области. Содержание металломагнитных примесей размерами более 2 мм составило 50–100 мг на 1 кг, а примесей меньше 2 мм — 150–170 мг на 1 кг, что недопустимо превышает действующие нормы.

Очистка сыпучей сельскохозяйственной смеси происходит в технологической зоне сепаратора-железоотделителя. Степень очистки зависит от величины неоднородности магнитного поля в этой зоне. Недостаточные исследования в этом направлении сдерживают разработки способов и устройств, обеспечивающих качественную очистку семян сыпучих масличных культур, поэтому разработка сепаратора по методу номограммно-параметрического конструирования решает задачи по высокой степени очистки и по исследованию режимов сепарирования семян сыпучих масличных культур [7, 10, 11].

При номограммно-параметрическом конструировании предлагается ввести величину постоянной магнитной системы.

$$d_n = 1/c, \text{ м.} \quad (1)$$

Параметр  $d_n$  является характеристикой неоднородности магнитного поля, имеет размерность и характеризует расстояние, на котором магнитная индукция изменяется в  $e$  раз. Другими словами, параметр  $d_n$  характеризует неоднородность магнитного поля в технологической (рабочей) зоне сепаратора. Следует отметить, что чем меньше  $d_n$ , тем выше степень неоднородности магнитного поля. При этом должно соблюдаться неравенство:

$$d_n < d_i. \quad (2)$$

Таким образом, значение магнитной индукции в зоне сепарации предлагается определять как:

$$B = B_{max} \cdot e^{-\frac{d_i}{d_n}}, \text{ Тл} \quad (3)$$

где  $B_{max}$  — максимальное значение магнитной индукции, Тл;

$d_i$  — расстояние  $i$ -ой точки от полюса магнитной системы, м;

$d_n$  — параметр неоднородности магнитного поля, зависит от свойства магнитной системы, м.

Суть данного способа проектирования заключается в том, что для определения

необходимого значения максимальной индукции на полюсе магнита разработана номограмма.

На рисунке 1 для наглядности приведены зависимости при  $d_n/d_m = 0,1, \dots, 1$ . Например, при величине рабочей зоны 0,1 м рассматривать показатель  $d_n$  больше 0,4 не имеет смысла, поскольку время притяжения металлической части будет превышать  $t_1 = 0,0456$  с.

Применение номограммы (рисунок 1) дает возможность определять необходимые конструктивные и режимные параметры сепаратора-железоотделителя при его последующей эффективной работе при очистке сыпучих масличных культур от металломагнитных примесей. Например, при естественном угле сыпучести материалов  $\alpha = 60^\circ$  время нахождения металломагнитной частицы в рабочей зоне длиной 100 мм составляет около 0,0456 с. Тогда для обеспечения времени притяжения частицы за время  $t_2 < t_1$  требуется магнитная система с магнитной индукцией на полюсе не менее 0,7 от наибольшего  $B_{m.наиб}$  и создающая неоднородное магнитное поле с параметром  $d_n/d_m = 0,3$  или не менее 0,95  $B_{m.наиб}$  при  $d_n/d_m = 0,4$  и т.д. [12].

Для работы с данной номограммой в правой части задается угол сыпучести сепарируемого материала, выбирается длина рабочей зоны сепаратора и определяется время нахождения металломагнитной частицы в рабочей зоне сепаратора.

Ориентируясь на время нахождения металломагнитной частицы в рабочей зоне сепаратора, в левой части номограммы подбираются конструктивные и режимные параметры магнитной системы, такие как  $B_{max}$  — максимальное значение магнитной индукции и  $d_n$  — параметр неоднородности магнитного поля.

В левой части номограммы даны кривые, позволяющие выбрать наиболее



приемлемые параметры магнитной системы, необходимые для технологического процесса [13–15].

### Выводы

На основе установленной взаимосвязи конструктивных и режимных параметров сепарации в рабочей зоне сепаратора разработана номограмма, позволяющая по заданной высоте рабочей зоны определить показатели электромагнитной

системы, величину магнитной индукции в зависимости от неоднородности магнитного поля, а также решить обратную задачу, определить конструктивные параметры рабочей зоны при заданных показателях электромагнитной системы.

При конструировании электромагнитных сепараторов просыпного типа предложена номограммная параметризация, позволяющая определять режимные параметры электромагнитной системы.

### Список источников

1. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин А.М. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
2. Евдокимов А.А., Копытин И.И., Чарыков В.И. Инновационные решения при конструировании электромагнитных сепараторов. Курган: Изд-во Курганского ГУ, 2015. 182 с.
3. Блинов Ю.И., Васильев А.С., Никаноров А.Н. и др. Современные энергосберегающие электротехнологии. СПб: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2000. 564 с.
4. Зуев В.С., Чарыков В.И. Электромагнитные сепараторы: теория, конструкция. Курган: Зауралье, 2002. 178 с.
5. Separation Technology / Cogelme Metal Separation Technology [Website]. URL: <https://www.cogelme.com> (дата обращения: 15.12.2022).
6. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железотделители. М.: Машиностроение, 1981. 212 с.
7. Чарыков В.И., Копытин И.И. Конкурентоспособность электромагнитных сепараторов серии УСС // Проблемы экономики и управления в современных условиях. Курган, 2017. С. 219-231.
8. Widodo S., Trianto M. Beneficiation of Lateritic Iron Ore from Malili Area, South Sulawesi, Indonesia Using Magnetic Separator // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. 25 October 2019, Vol. 619, Issue 1, Article No. 012017.
9. Iannicelli J., Pechin J. Magnetic Separation of Kaolin Clay Using an Advanced 9T Separator // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. March 2000. Vol. 10, Issue 1. P. 917-922.
10. Конев Н.Н., Комаров С.Г. Анализ современного состояния дел в области магнитов и магнитных сепараторов для пищевых предприятий // Масла и жиры. 2005. № 4. С. 36.

11. Килин В.И., Якубайлик Э.К. Модернизация магнитных систем сепараторов на основе высокоинтенсивных магнитов // Известия вузов. Горный журнал. 2004. № 4. С. 110-112.

12. Obvintseva T.Yu., Konyaev A.Yu. Linear Induction Machines for Electrodynamics Separation for Non-Ferrous Metals // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. EIConRus 2017. St. Petersburg, Russia, 2017. P. 1657-1670.

13. Угаров Г.Г., Вырыханов Д.А., Мошкин В.И. Структурный анализ процесса электромеханического преобразования энергии // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4 (25). С. 57-64.

14. Митюнин А.А. Разработка электромагнитного сепаратора с постоянными магнитами для очистки семян масличных культур от металломагнитных примесей (на примере подсолнечника): дисс. ... канд. техн. наук. Троицк, 2019. 169 с.

15. Магнитные и электрические методы сепарации // НПК МеханоБрТехника. 2020 URL: <https://mtspb.com/company/media/stati/magnitnye-i-elektricheskie-metody-separatsii/> (дата обращения: 25.12.2022).

### References

1. Gortinskii V.V., Demskii A.B., Boriskin A.M. *Protsessy separirovaniya na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh* [Separation Processes at Grain Processing Enterprises]. Moscow, Kolos Publ., 1980. 304 p. [in Russian].
2. Evdokimov A.A., Kopytin I.I., Charykov V.I. *Innovatsionnye resheniya pri konstruirovanii elektromagnitnykh sепaratorov* [Innovative Solutions in the Design of Electromagnetic Separators]. Kurgan, Izd-vo Kurganskogo GU, 2015. 182 p. [in Russian].

3. Blinov Yu.I., Vasil'ev A.S., Nikanorov A.N. e.a. *Sovremennye energosberegayushchie elektrotehnologii* [Modern Energy-Saving Electrotechnologies]. Saint-Petersburg, SPbGETU (LETI), 2000. 564 p. [in Russian].
4. Zuev V.S., Charykov V.I. *Elektromagnitnye separatory: teoriya, konstruktsiya* [Electromagnetic Separators: Theory, Design]. Kurgan, Zaural'е Publ., 2002. 178 p. [in Russian].
5. *Separation Technology*. Cogelme Metal Separation Technology [Website]. URL: <https://www.cogelme.com> (accessed 15.12.2022).
6. Sumtsov V.F. *Elektromagnitnye zhelezo-otdeliteli* [Electromagnetic Iron Separators]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 212 p. [in Russian].
7. Charykov V.I., Kopytin I.I. Konkurentosposobnost' elektromagnitnykh separatorov serii USS [Competitiveness of Electromagnetic Separators of the USS Series]. *Problemy ekonomiki i upravleniya v sovremennykh usloviyakh* [Problems of Economics and Management in Modern Conditions]. Kurgan, 2017, pp. 219-231. [in Russian].
8. Widodo S., Trianto M. Beneficiation of Lateritic Iron Ore from Malili Area, South Sulawesi, Indonesia Using Magnetic Separator. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 25 October 2019, Vol. 619, Issue 1, Article No. 012017.
9. Iannicelli J., Pechin J. Magnetic Separation of Kaolin Clay Using an Advanced 9T Separator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, March 2000, Vol. 10, Issue 1, pp. 917-922.
10. Konev N.N., Komarov S.G. Analiz sovremennogo sostoyaniya del v oblasti magnetov i magnetnykh separatorov dlya pishchevykh predpriyatii [Analysis of the Current State of Affairs in the Field of Magnets and Magnetic Separators for Food Enterprises]. *Masla i zhiry — Oils and Fats*, 2005, No. 4, pp. 36. [in Russian].
11. Kilin V.I., Yakubailik E.K. Modernizatsiya magnetnykh sistem separatorov na osnove vysokointensivnykh magnetov [Modernization of Magnetic Separator Systems Based on High-Intensity Magnets]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal — Izvestiya vuzov. Mining Journal*, 2004, No. 4, pp. 110-112. [in Russian].
12. Obvintseva T.Yu., Konyaev A.Yu. Linear Induction Machines for Electrodynamic Separation for Non-Ferrous Metals. *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. EIconRus 2017*. Saint-Petersburg, Russia, 2017, pp. 1657-1670.
13. Ugarov G.G., Vyrykhanov D.A., Moshkin V.I. Strukturnyi analiz protsessa elektromekhanicheskogo preobrazovaniya energii [Structural Analysis of the Process of Electromechanical Energy Conversion]. *Voprosy elektrotehnologii — Voprosy elektrotehnologii*, 2019, No. 4 (25), pp. 57-64. [in Russian].
14. Mityunin A.A. *Razrabotka elektromagnitnogo separatora s postoyannymi magnetami dlya ochistki semyan maslichnykh kul'tur ot metallomagnitnykh primesei (na primere podsolnechnika): diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of an Electromagnetic Separator with Permanent Magnets for Cleaning Oilseeds from Metal-Magnetic Impurities (on the Example of Sunflower): Cand. Engin. Sci. Diss.]. Troitsk, 2019. 169 p. [in Russian].
15. Magnetnye i elektricheskie metody separatsii [Magnetic and Electrical Methods of Separation]. *NPK MekhanobrTekhnika*. 2020. URL: <https://mtspb.com/company/media/stati/magnetnye-i-elektricheskie-metody-separatsii/> (accessed 25.12.2022). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 03.02.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 17.02.2023.

The article was submitted 03.02.2023; approved after reviewing 10.02.2023; accepted for publication 17.02.2023.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19, № 1. С. 58–67. ISSN 1999-5458 (print)  
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2023. Vol. 19. No. 1. P. 58–67. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 621.316

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-58-67

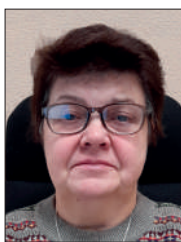
## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ



**Равия Фоатовна Ярыш**

**Raviya F. Yarysh**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроэнергетики,  
Альметьевский государственный нефтяной институт,  
Альметьевск, Россия



**Ирина Анатольевна Чернявская**

**Irina A. Chernyavskaya**

кандидат технических наук, доцент,  
ведущий инженер СП «Татнефть-Добыча»,  
Альметьевск, Россия



**Алсу Радиковна Гарифуллина**

**Alsu R. Garifullina**

кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики,  
Альметьевский государственный нефтяной институт,  
Альметьевск, Россия

### Актуальность

Одним из ключевых направлений инновационного развития электроэнергетики до 2035 года является переход к цифровым активно-адаптивным сетям с распределенной интеллектуальной системой автоматизации и управления. В этой связи в условиях возрастающих требований к повышению качества электроэнергии и снижению потерь в сетях необходимо совершенствование системы регулирования напряжения и реактивной мощности в электрических сетях, которое должно основываться на широком применении современных средств регулирования напряжения и реактивной мощности, а также автоматических систем управления, в том числе централизованных. Основной эффект снижения технических потерь в электрических сетях, как показывают энергетическое обследование ОАО «ФСК ЕЭС», опыт зарубежных электросетевых компаний и анализ режимов работы Единой национальной электрической сети, может быть получен за счет оптимизации установившихся режимов работы электрической сети по реактивной мощности и уровням напряжения в автомати-

### Ключевые слова

автоматическое регулирование, реактивная мощность, компенсация, удалённый мониторинг, нефтепромысловые электрические сети

ческом режиме при условии постоянного мониторинга состояния регулирующих устройств. Отсутствие в системах электроснабжения предприятий системы удалённого мониторинга параметров работы устройств компенсации реактивной мощности приводит к несвоевременному выявлению и устранению отказов в работе и работе сети без компенсации реактивной мощности.

#### **Цель исследования**

Проанализировать энергетические параметры системы электроснабжения объектов нефтедобычи, выявить отклонения значений напряжения и коэффициента реактивной мощности от нормативных требований. Исследовать эффективность применения низковольтных автоматических установок компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения нефтедобывающего предприятия.

#### **Методы исследования**

Изучение научной литературы, натурное исследование на объектах перекачки нефти, энергетические обследования, компьютерное моделирование. С целью выявления технико-экономической эффективности применения низковольтных автоматических установок компенсации реактивной мощности проведены опытно-промышленные испытания в одном из нефтегазодобывающих предприятий публичного акционерного общества «Татнефть».

#### **Результаты**

Энергетические обследования объектов внутрипромышленной перекачки, подготовки нефти и поддержания пластового давления ПАО «Татнефть» показали, что величина реактивной мощности в сетях систем электроснабжения этих предприятий значительно превышает нормативную. В результате опытно-промышленных испытаний выявлено, что применение автоматических установок компенсации реактивной мощности в автоматическом режиме обеспечивает стабилизацию коэффициента мощности на уровне нормативных значений, исключая недокомпенсацию или перекомпенсацию реактивной мощности, при этом снижение потребления электроэнергии составляет в среднем 2,4 %. Система удаленного мониторинга позволяет отслеживать режим работы и техническое состояние всех элементов конденсаторной установки, своевременно производить техническое обслуживание контакторов для обеспечения работоспособности установки.

**Для цитирования:** Ярыш Р. Ф., Чернявская И. А., Гарифуллина А. Р. Эффективность применения автоматических установок компенсации реактивной мощности в нефтепромышленных электрических сетях // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 58-67. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-58-67>.

Original article

## **EFFICIENCY OF APPLICATION OF AUTOMATIC POWER FACTOR CORRECTION UNITS IN OILFIELD ELECTRIC NETWORKS**

#### **The relevance**

One of the key directions of innovative development of the electric power industry until 2035 is the transition to digital active-adaptive networks with a distributed intelligent automation and control system. In this regard, in conditions of increasing demands for improving the quality of electricity and reducing losses in networks, it is necessary to improve the voltage and reactive power regulation system in electric networks, which should be based

#### **Ключевые слова**

automatic regulation, reactive power, correction, remote monitoring, oilfield electrical networks

on the widespread use of modern means of regulating voltage and reactive power, as well as automatic control systems, including centralized ones. The main effect of reducing technical losses in electric networks, as shown by the energy survey of FGC UES JSC, the experience of foreign electric grid companies and the analysis of the modes of operation of the Unified National Electric Grid, can be obtained by optimizing the established modes of operation of the electric grid in terms of reactive power and voltage levels in automatic mode, provided that the condition of regulating devices is constantly monitored. The absence of a system for remote monitoring of the parameters of power factor correction devices in the power supply systems of enterprises leads to untimely detection and elimination of failures in the operation and operation of the network without power factor correction.

#### **Aim of research**

To analyze the energy parameters of the power supply system of oil production facilities, to identify deviations of voltage values and power factor from regulatory requirements. To investigate the effectiveness of the use of low-voltage automatic power factor correction units in the power supply system of an oil-producing enterprise.

#### **Research methods**

The study of scientific literature, field research at oil pumping facilities, energy surveys, computer modeling. In order to identify the technical and economic efficiency of the use of low-voltage automatic power factor correction units, pilot field tests were conducted in one of the oil and gas producing enterprises of the Tatneft PJSC.

#### **Results**

Energy surveys of in-field pumping facilities, oil treatment and reservoir pressure maintenance of Tatneft PJSC have shown that the value of reactive power in the networks of power supply systems of these enterprises significantly exceeds the standard. As a result of pilot field tests, it was revealed that the use of automatic power factor correction units in automatic mode ensures the stabilization of the power factor at the level of standard values, excluding under-compensation or overcompensation of reactive power, while reducing electricity consumption by an average of 2.4 %. The remote monitoring system allows you to monitor the operating mode and technical condition of all elements of the capacitor plant, timely perform maintenance of contactors to ensure the operability of the installation.

**For citation:** Yarysh R. F., Chernyavskaya I. A., Garifullina A. R. Effektivnost' primeneniya avtomaticheskikh ustanovok kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v neftepromyslovykh elektricheskikh setyakh [Efficiency of Application of Automatic Power Factor Correction Units in Oilfield Electric Networks]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 58-67 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-58-67>.

Одним из ключевых направлений инновационного развития электроэнергетики до 2035 года является переход к цифровым активно-адаптивным сетям с распределенной интеллектуальной системой автоматизации и управления [1]. В этой связи в условиях возрастающих требований к повышению качества электроэнергии и снижению потерь в

сетях необходимо совершенствование системы регулирования напряжения и реактивной мощности в электрических сетях, которое должно основываться на широком применении современных средств регулирования напряжения и реактивной мощности, а также автоматических систем управления, в том числе централизованных [2–4]. Основной

эффект снижения технических потерь в электрических сетях, как показывают энергетическое обследование ОАО «ФСК ЕЭС», опыт зарубежных электросетевых компаний и анализ режимов работы Единой национальной электрической сети, может быть получен за счет оптимизации установившихся режимов работы электрической сети по реактивной мощности и уровням напряжения в автоматическом режиме при условии постоянного мониторинга состояния регулирующих устройств [5–8]. Отсутствие в системах электроснабжения предприятий системы удалённого мониторинга параметров работы устройств компенсации реактивной мощности приводит к несвоевременному выявлению и устранению отказов в работе и работе сети без компенсации реактивной мощности.

Энергетические обследования предприятий нефтедобычи показывают, что величина коэффициента реактивной мощности у потребителей может достигать значений, превышающих 2. Соответственно, величина реактивной мощности в системах электроснабжения этих предприятий также превышает нормативную [9].

К мероприятиям по повышению эффективности использования электроэнергии относятся мероприятия по снижению потребления активной и реактивной мощности и активной энергии путем оптимизации энергетических параметров электротехнического оборудования, наряду с переводом систем электроснабжения предприятий нефтедобычи на повышенное напряжение, приближением источников питания к центрам нагрузки и другим актуальным мероприятиям по разработке и внедрению оптимальной компенсации реактивной мощности с автоматическим управлением ее режимами [10–14].

Компенсация реактивной мощности с помощью низковольтных компенсаторов реактивной мощности (аналог УKM 58, АКУ, УKKPM 0,4 кВ) мощностью от 10 до 6 000 кВАр, оснащенных автоматическим регулятором коэффициента мощности (АРKM), может сократить до 30 % затрат на оплату электроэнергии [15].

Контрольный замер коэффициента мощности на объектах внутрипромысловой перекачки, подготовки нефти и поддержания пластового давления (ППД) ПАО «Татнефть» показал, что фактическая величина коэффициента мощности находится в пределах 0,4–0,8. При этом уровень потребления реактивной мощности составляет значительную величину, что обуславливает в сети электроснабжения сверхнормативные потери электроэнергии [16, 17]. Уровень потребления реактивной мощности на рассматриваемых объектах не стабилен в связи с изменениями объёмов поступления жидкости на объекты перекачки.

В установленных ранее на объектах нефтедобычи устройствах компенсации реактивной мощности отсутствуют системы удалённого контроля за параметрами работы устройств, вследствие чего возможный отказ в работе устраняется несвоеременно, и вся сеть работает без компенсации реактивной мощности.

Одним из путей достижения целей инновационного развития электротехнического комплекса ПАО «Татнефть» является применение системного подхода к регулированию напряжения с использованием средств компенсации реактивной мощности — автоматических установок компенсации реактивной мощности (АУKPM) с системой удалённого мониторинга состояния вторичного оборудования в центрах питания объектов внутрипромысловой перекачки, подготовки нефти и ППД в ПАО «Татнефть» типа АУKPM-GSM-0,4 кВ.

Система мониторинга состояния вторичного оборудования является отдельной автоматизированной системой управления (АСУ), интегрированной в процессы управления вторичным оборудованием (включая оборудование связи и в общем случае — серверное и иное оборудование ИТ-инфраструктуры). Система представляет собой совокупность технических средств, обеспечивающих диагностику состояния вторичного оборудования, размещенного на объектах электросетевого комплекса во время его работы. Данная АСУ реализует функции прогнозирования, выявления и сопровождения процессов восстановления нормального режима работы данного оборудования и обеспечивает сбор, обработку и хранение информации о параметрах функционирования вторичного оборудования, входящего в контур мониторинга [18–21].

С целью выявления технико-экономической эффективности данной цифровой установки были проведены опытно-про-

мысловые испытания (ОПИ) в одном из НГДУ ПАО «Татнефть». В процессе испытаний к секции шин КТП-6/0,4 кВ, которая является центром питания приемников дожимной насосной станции (ДНС), в том числе насосного агрегата мощностью 160 кВт, подключается АУКРМ номинальной мощностью 200 кВАр (8×25 кВАр), с быстродействием системы регулирования  $t_{pe} \leq 0,033$  с.

Схема подключения АУКРМ-0,4 кВ приведена на рисунке 1.

В процессе ОПИ фиксировался контроль исправности АУКРМ по автоматизированной информационной системе удаленного контроля и управления (АИС), контроль изменения электропотребления по узлам учета электрической энергии (УУЭ) и значений коэффициента мощности в сети при изменении нагрузки на комплектную трансформаторную подстанцию (КТП) (по УУЭ и АИС «Vombat», «Мега», «LOVATO Electric»).

Результаты проведения ОПИ по применению АУКРМ-GSM-0,4 кВ мощно-

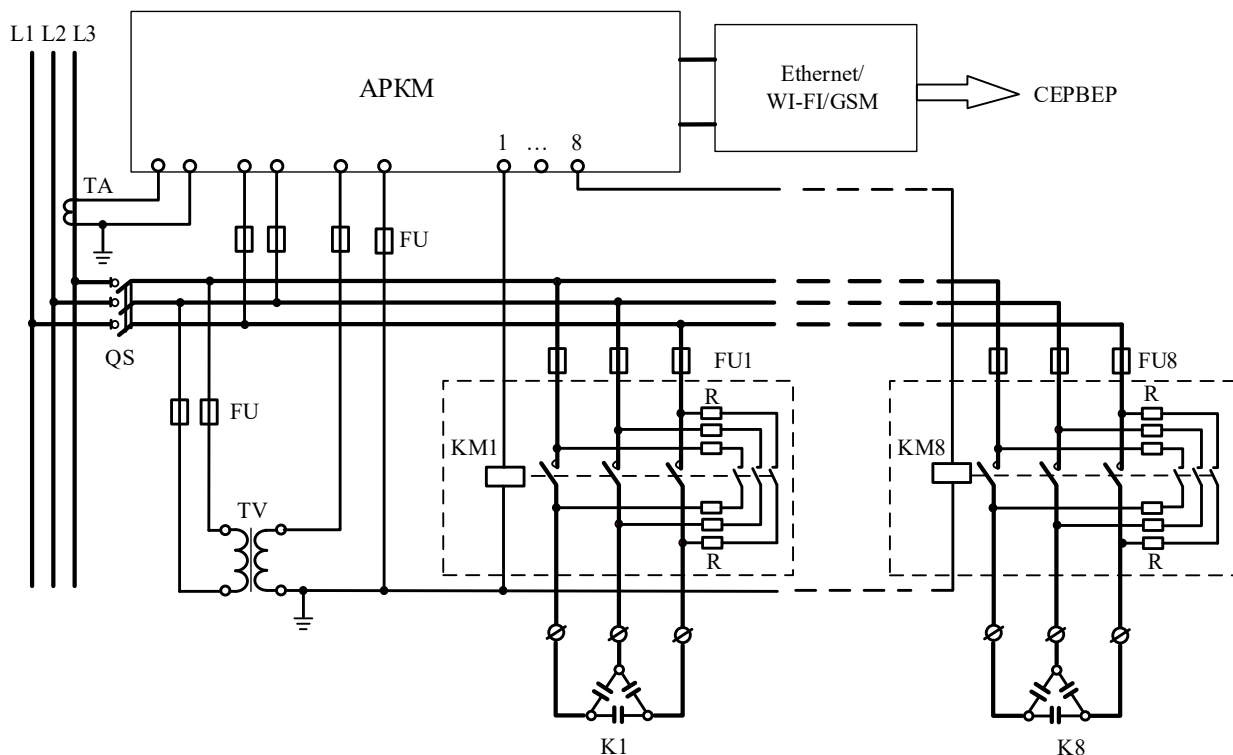


Рисунок 1. Схема подключения АУКРМ-0,4 кВ

Figure 1. Connection diagram of automatic power factor correction unit 0.4 kV

стью 200 кВАр в центре питания ДНС приведены в таблице 1.

Опытно-промысловые испытания показали, что при включении АУКРМ-GSM-0,4 кВ в автоматическом режиме производится стабилизация коэффициента мощности на вводе центра питания на уровне значений  $\cos \varphi = 0,93-0,98$ , при этом снижение потребления электроэнергии составляет от 1,4 % до 3,6 % (в среднем 2,4 %), в зависимости от величины электрической нагрузки.

В таблице 2 представлены результаты расчета экономической эффективности от внедрения установки компенсации реактивной мощности с системой удаленного мониторинга.

Испытания проводились при различных соотношениях времени включения и времени отключения компенсирующего устройства, различных режимах работы оборудования и насосных агрегатов на объектах внутрипромысловой перекачки, подготовки нефти и ППД, различной суммарной фактической потребляемой мощности на вводах потребителей. В

результате испытаний выявлено, что внедрение АУКРМ-GSM-0,4 кВ экономически эффективно при следующих условиях:

- коэффициенте эксплуатации более 0,75;
- переменном режиме работы оборудования и насосных агрегатов на объектах внутрипромысловой перекачки, подготовки нефти и ППД;
- суммарной фактической потребляемой мощности на вводах потребителей более 100 кВт.

Потенциальный фонд внедрения АУКРМ-0,4 кВ в центрах питания объектов внутрипромысловой перекачки, подготовки нефти и ППД ПАО «Татнефть» составляет 40 объектов, суммарный чистый дисконтированный доход (ЧДД) составляет 5,4 млн руб.

Рассмотренная инновационная технология характеризуется следующими параметрами и граничными условиями применения:

- клиент-серверная сервис-ориентированная архитектура, позволяющая

**Таблица 1.** Результаты ОПИ применения АУКРМ-GSM-0,4 кВ в центре питания ДНС

**Table 1.** The results of pilot tests of the use of automatic power factor correction unit 0.4 kV

Состояние АУКРМ	Период замера	Активная энергия, кВт·ч	Реактивная энергия, кВАр·ч	Средний $\cos \varphi$	Расход жидкости, м <sup>3</sup>	Удельный расход, кВт·ч/м <sup>3</sup>
Отключено	7 дней	20 188	16 133	0,78	21 733	0,929
Включено	7 дней	20 708	5 668	0,96	22 841	0,907
Экономия, %						2,4

**Таблица 2.** Показатели экономической эффективности внедрения АУКРМ-GSM-0,4 кВ

**Table 2.** Indicators of economic efficiency of the introduction of automatic power factor correction unit -0.4 kV

План/факт	Мощность ДО внедрения	Мощность ПОСЛЕ внедрения	Коэф. экспл. Кэ	Экономия ЭЭ, руб./год	Экономия затрат на ЭЭ, руб./год	Ст-ть оборуд. СМР и ПНР	Срок окупаемости, лет	ИДД
План	142	137	0,88	36 617	115 344	280 000	5,8	1,4
Факт	146	141	0,87	36 201	119 463	280 000	5,8	1,4



использовать толстые или тонкие клиентские решения и размещать серверную часть в Linux-подобном окружении, в том числе с использованием 100 % виртуализации;

- подключение к оборудованию с использованием стандартных коммуникационных протоколов (SNMP, Modbus);

- возможность размещения собственного агента системы мониторинга в программной среде контролируемого оборудования;

- реализация из «коробки» или возможность реализации в системе CIM модели;

- сетевая доступность контролируемого оборудования.

В целом внедрение регулируемых установок АУКРМ-GSM-0,4 кВ с устройством удалённого мониторинга позволит:

- обеспечивать соблюдение оптимального коэффициента мощности с большой точностью в зависимости от величины электрической нагрузки (установка автоматически вводит в работу, либо выводит из работы конденсаторы необходимого номинала), тем самым исключается недокомпенсация или перекомпенсация реактивной мощности;

- снизить потери в питающей ВЛ-6 кВ и трансформаторах КТП-6/0,4 кВ активной мощности в среднем на 2,4 % (при увеличении протяженности ВЛ-6 кВ до КТП-6/0,4 кВ, экономия увеличивается);

- исключить появление в сети перенапряжения, т.к. исключена перекомпенсация, что имело место при использовании статических конденсаторных установок;

- отслеживать контроллером режим работы и техническое состояние всех элементов конденсаторной установки,

своевременно производить техническое обслуживание контакторов для обеспечения работоспособности установки;

- своевременно принимать меры по устранению отказов;

- удалённо отслеживать все основные параметры компенсируемой сети в АИС «LOVATO Electric»: состояние и режим работы,  $\cos \varphi$  в центре питания, количество коммутаций. При этом варианты визуализации могут быть оптимизированы под требования пользователя, с учётом мониторинга дополнительных показателей и фактической экономии энергозатрат;

- обслуживать регулирующую конденсаторную установку по фактическому состоянию на основании параметров удалённого контроля;

- предотвращать выход из строя конденсаторов при снижении температуры окружающей среды ниже допустимых значений ( $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В регулируемых установках предусмотрена система аварийного отключения конденсатора при резком увеличении давления внутри него для исключения возможности развития взрыва.

Мощность конденсаторных установок рассчитывается индивидуально для каждого потребителя.

## Вывод

В результате проведенного исследования получено, что система удаленного мониторинга позволяет отслеживать режим работы и техническое состояние всех элементов конденсаторной установки, своевременно производить техническое обслуживание контакторов для обеспечения работоспособности установки.

## Список источников

1. ПАО «ФСК ЕЭС». Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2021–2025 годы с перспективой до 2030 года. М., 2022.

2. Воронин В., Гаджиев М., Шамонов Р. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС //

Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 2 (11). С. 40-47.

3. Liu Y., Rau S., Wu C., Lee W. Improvement of Power Quality by Using Advanced Reactive Power Compensation. *IEEE Trans Ind Appl.* 2018. No. 54(1). P. 18-24.

4. Faiz J., Zafari A. A Novel Algorithm for Determination of Reactive Currents in STATCOM for Voltage Flicker Mitigation // *J. Electr. Syst.* 2010. No. 06(2). P. 1-10.

5. Воротницкий В.Э. Снижение потерь электроэнергии — важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // *Энергосбережение.* 2014. № 4. С. 61-64.

6. Kodirov A., Kobilov M., Toychiyev Z. Analysis of Reactive Power Compensation in Industrial Enterprises, Its Importance and Production Methods // *Universum: технические науки.* 2021. № 11-6 (92). С. 103-107.

7. Okoboi G., Mawejje J. The Impact of Adoption of Power Factor Correction Technology on Electricity Peak Demand in Uganda // *Economic Structures.* 2016. No. 5 (3).

8. Karmakar N., Bhattacharyya B. Hybrid Intelligence Approach for Multi-load Level Reactive Power Planning Using VAR Compensator in Power Transmission Network. *Prot. Control Mod. Power Syst.* 2021. No. 6. P. 26.

9. Ивановский В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // *Инженерная практика.* 2011. № 6. С. 18-26. EDN: POHLON.

10. Волков А.В. Компенсация посредством активного фильтра реактивной мощности и мощности искажений в четырёхпроводной трёхфазной сети // *Электротехника.* 2010. № 7. С. 41-51.

11. Ребровская Д.А., Кузнецов А.В. Линейная модель снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // *Математические методы в технике и технологиях.* 2019. Т. 4. С. 11-17.

12. Кузнецов А.В., Аргентова И.В. Математическая модель оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности // *Электротехника.* 2016. № 10. С. 68-73.

13. Зарипова С.Н., Чернова Н.В., Ахметшин А.Р. Глубокая компенсация реактивной мощности в распределительных электрических сетях напряжением 0,4-10 кВ // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2014. № 1-2. С. 60-66.

14. Кронгауз Д.Э. Актуальная концепция компенсации реактивной мощности в распределительных

сетях // *Промышленная энергетика.* 2022. № 1. С. 35-43.

15. Ершов С.В., Поздновский В.В. Система компенсации реактивной мощности для участка сети промышленных предприятий // *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2012. Вып. 12. Ч. 3. С. 43-48.

16. Инструкция по организации в министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Утверждена Приказом Минэнерго России от 30 декабря 2008 г. N 326.

17. Редакция бюллетеня «ЭНЕРГОСОВЕТ». Энергосбережение при компенсации реактивной мощности у потребителей // *Энергосовет.* 2010. № 3. С. 21-23.

18. Rafi K.M., Prasad P.V.N., Vithal J.V.R. Coordinated Control of DSTATCOM with Switchable Capacitor Bank in a Secondary Radial Distribution System for Power Factor Improvement // *Journal of Electrical Systems and Information Technology.* December, 2022. No. 9 (1). DOI:10.1186/s43067-022-00044-3.

19. Song S., Hwang S., Jang G., Yoon M. Improved Coordinated Control Strategy for Hybrid STATCOM Using Required Reactive Power Estimation Method // *IEEE Access.* 2019. No. 7. P. 84506-84515.

20. Rafi K.M., Prasad P.V.N. Comparison of Control Algorithms for Power Factor Correction in a Distribution System Using DSTATCOM // *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI).* 2017. P. 1736–1741.

21. Clark G.L. Development of the Switched Capacitor Bank Controller for Independent Phase Switching on the Electric Distribution System // *Distributech 2001 Conference and Exhibition.* San Diego, CA, 2001.

## References

1. PAO «FSK EES». *Programma innovatsionnogo razvitiya PAO «FSK EES» na 2021–2025 gody s perspektivoi do 2030 goda* [PJSC FGC UES. Innovative development program of PJSC FGC UES for 2021–2025 with a perspective up to 2030]. Moscow, 2022. [in Russian].

2. Vorotnitskii V.E. Snizhenie poter' elektroenergii — vazhneishii put' energosberezheniya v elektricheskikh setyakh [Reduction of Electricity Losses is the Most Important Way of Energy Saving in Electrical Networks]. *Energosberezhenie — Energy Saving*, 2014, No. 4, pp. 61-64. [in Russian].

3. Liu Y., Rau S., Wu C., Lee W. Improvement of Power Quality by Using Advanced Reactive

- Power Compensation. *IEEE Trans Ind Appl.*, 2018, No. 54(1), pp. 18-24.
4. Faiz J., Zafari A. A Novel Algorithm for Determination of Reactive Currents in STATCOM for Voltage Flicker Mitigation. *J. Electr. Syst.*, 2010, No. 06(2), pp. 1-10.
  5. Voronin V., Gadzhiev M., Shamonov R. Napravleniya razvitiya sistemy regulirovaniya napryazheniya i reaktivnoi moshchnosti v ENES [Directions of Development of the Voltage and Reactive Power Control System in UNEG]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie — Electricity. Transfer and Distribution*, 2012, No. 2 (11), pp. 40-47. [in Russian].
  6. Kodirov A., Kobilov M., Toychiyev Z. Analysis of Reactive Power Compensation in Industrial Enterprises, Its Importance and Production Methods. *Universum: tekhnicheskie nauki — Universum: Technical Sciences*, 2021, No. 11-6 (92), pp. 103-107.
  7. Okoboi G., Mawejje J. The Impact of Adoption of Power Factor Correction Technology on Electricity Peak Demand in Uganda, *Economic Structures*, 2016, No. 5 (3).
  8. Karmakar N., Bhattacharyya B. Hybrid Intelligence Approach for Multi-Load Level Reactive Power Planning Using VAR Compensator in Power Transmission Network. *Prot. Control Mod. Power Syst.*, 2021, No. 6, pp. 26.
  9. Ivanovskii V.N. Energetika dobychi nefiti: osnovnye napravleniya optimizatsii energo-potrebleniya [Energy of Oil Production: Main Directions of Energy Consumption Optimization]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2011, No. 6, pp. 18-26. EDN: POHLON. [in Russian].
  10. Volkov A.V. Kompensatsiya posredstvom aktivnogo fil'tra reaktivnoi moshchnosti i moshchnosti iskazhenii v chetyrekhprovodnoi trekhfaznoi seti [Compensation by Means of an Active Filter of Reactive Power and Distortion Power in a Four-Wire Three-Phase Network]. *Elektrotekhnika — Elektrotechnics*, 2010, No. 7, pp. 41-51. [in Russian].
  11. Rebrovskaya D.A., Kuznetsov A.V. Lineinaya model' snizheniya poter' moshchnosti v setevoi organizatsii pri kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v seti potrebitelya [Linear Model for Reducing Power Losses in a Network Organization when Compensating for Reactive Power in a Consumer's Network]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh — Mathematical Methods in Engineering and Technology*, 2019, Vol. 4, pp. 11-17. [in Russian].
  12. Kuznetsov A.V., Argentova I.V. Matematicheskaya model' otsenki snizheniya poter' moshchnosti v setevoi organizatsii pri kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [Mathematical Model for Assessing the Reduction of Power Losses in a Network Organization with Reactive Power Compensation]. *Elektrotekhnika — Elektrotechnics*, 2016, No. 10, pp. 68-73. [in Russian].
  13. Zariipova S.N., Chernova N.V., Akhmetshin A.R. Glubokaya kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh napryazheniem 0,4-10 kV [Deep Compensation of Reactive Power in Distribution Electrical Networks with a Voltage of 0.4-10 kV]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2014, No. 1-2, pp. 60-66. [in Russian].
  14. Krongauz D.E. Aktual'naya kontseptsiya kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v raspredelitel'nykh setyakh [Actual Concept of Reactive Power Compensation in Distribution Networks]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Power Engineering*, 2022, No. 1, pp. 35-43. [in Russian].
  15. Ershov S.V., Pozdnovskii V.V. Sistema kompensatsii reaktivnoi moshchnosti dlya uchastka seti promyshlennykh predpriyatii [Reactive Power Compensation System for a Section of a Network of Industrial Enterprises]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya TulSU. Technical Science*, 2012, Issue 12, Ch. 3, pp. 43-48. [in Russian].
  16. *Instruktsiya po organizatsii v ministerstve energetiki Rossiiskoi Federatsii raboty po raschetu i obosnovaniyu normativov tekhnologicheskikh poter' elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam. Utverzhdena Prikazom Minenergo Rossii ot 30 dekabrya 2008 g. N 326.* [Instructions on the organization in the Ministry of Energy of the Russian Federation of work on the calculation and justification of the standards for technological losses of electricity during its transmission through electric networks. Approved by the Order of the Ministry of Energy of Russia dated December 30, 2008 No. 326]. [in Russian].
  17. Redaktsiya byulletenya «ENERGOSOVET». Energoberezhenie pri kompensatsii reaktivnoi moshchnosti u potrebiteli [Edition of the Bulletin «ENERGY COUNCIL». Energy Saving with Reactive Power Compensation for Consumers]. *Energosovet — Energosovet*, 2010, No. 3, pp. 21-23. [in Russian].
  18. Rafi K.M., Prasad P.V.N., Vithal J.V.R. Coordinated Control of DSTATCOM with Switchable Capacitor Bank in a Secondary Radial Distribution System for Power Factor Improvement. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, December, 2022, No. 9 (1). DOI:10.1186/s43067-022-00044-3.

19. Song S., Hwang S., Jang G., Yoon M. Improved Coordinated Control Strategy for Hybrid STATCOM Using Required Reactive Power Estimation Method. *IEEE Access*, 2019, No. 7, pp. 84506-84515.

20. Rafi K.M., Prasad P.V.N. Comparison of Control Algorithms for Power Factor Correction in a Distribution System Using DSTATCOM. *2017*

*IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, 2017, pp. 1736-1741.

21. Clark G.L. Development of the Switched Capacitor Bank Controller for Independent Phase Switching on the Electric Distribution System. *Distributech 2001 Conference and Exhibition*, San Diego, CA, 2001.

*Статья поступила в редакцию 02.02.2023; одобрена после рецензирования 09.02.2023; принята к публикации 16.02.2023.*

*The article was submitted 02.02.2023; approved after reviewing 09.02.2023; accepted for publication 16.02.2023.*

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-68-81

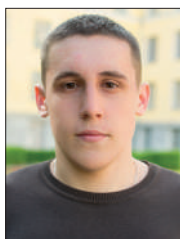
## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА

**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

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

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

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

аспирант, ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехнологии»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

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

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

### Актуальность

Повысить надежность и эффективность систем преобразования электрической энергии, снизить их массу и габариты позволяют методы функциональной интеграции дискретных электрических и электромагнитных компонентов. Авторами предложено схемотехническое решение, основанное на замене некоторых отдельных дискретных компонентов повышающего преобразователя постоянного напряжения на многофункциональный интегрированный электромаг-

### Ключевые слова

преобразователь электрической энергии, повышающий преобразователь постоянного напряжения, функциональная интеграция,

нитный компонент (МИЭК). Компонент выполняет функции катушки индуктивности и фильтрующего конденсатора.

#### **Цель исследования**

В данной статье разработан повышающий преобразователь постоянного напряжения на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента.

Основной задачей является разработка повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента.

#### **Методы исследования**

В данном исследовании использованы следующие методы: изучение научной литературы и компьютерное моделирование в среде Matlab.

#### **Результаты**

Разработана компьютерная модель повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе МИЭК в программном комплексе Circuit Simulator. Получены графики выходного напряжения. Проанализированы схемы повышающих преобразователей постоянного напряжения. Собрана схема повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе МИЭК. Сняты осциллограммы выходного напряжения. Проведен анализ компьютерной модели и лабораторного испытательного образца. Выполнен комплекс работ по улучшению выходных характеристик повышающего преобразователя на основе МИЭК. Выбрана оптимальная схема для реализации замены катушки индуктивности и фильтрующего конденсатора на многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент. Проведенные лабораторные исследования подтвердили работоспособность МИЭК в качестве замены отдельных дискретных компонентов схемы повышающего преобразователя постоянного напряжения. Определен оптимальный режим работы повышающего преобразователя на основе МИЭК, позволяющий расширить диапазон выходного напряжения и снизить пульсации. Расширение диапазона выходного напряжения осуществимо благодаря околорезонансному либо резонансному режиму работы преобразователя, что возможно благодаря структуре МИЭК, представляющей собой резонансный LC-контур.

многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, повышение надежности, снижение массы и габаритов

#### **Благодарности:**

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

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

**Для цитирования:** Кириллов Р. В., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И., Хазиева Р. Т. Исследование повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 68-81. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-68-81>.

Original article

## INVESTIGATION OF A DC VOLTAGE BOOSTER CONVERTER BASED ON A MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT

### The relevance

The methods of functional integration of discrete electrical and electromagnetic components allow increasing the reliability and efficiency of electrical energy conversion systems, reducing their weight and dimensions. The authors proposed a circuit solution based on the replacement of some individual discrete components of a DC boost converter with a multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC). The component performs the functions of an inductor and a filter capacitor.

### Aim of research

This article discusses the investigation of a DC voltage booster converter based on a multifunctional integrated electromagnetic component.

The main task is to investigate a DC voltage booster converter based on a multifunctional integrated electromagnetic component.

### Research methods

In this study, the following methods were used: the study of scientific literature and computer simulation in the Matlab environment.

### Results

A computer model of a step-up DC voltage converter based on MIEC in the Circuit Simulator software package has been developed. Graphs of the output voltage are obtained. The circuits of step-up DC voltage converters are analyzed. A circuit of a DC voltage boost converter based on MIEC has been assembled. Output voltage waveforms were taken. An analysis of the computer model and laboratory test sample was carried out. A set of works has been completed to improve the output characteristics of a step-up converter based on MIEC. The optimal scheme has been chosen to implement the replacement of the inductor and filter capacitor with a multifunctional integrated electromagnetic component. Conducted laboratory studies confirmed the operability of MIEC as a replacement for individual discrete components of the DC voltage boost converter circuit. The optimal mode of operation of the boost converter based on MIEC is determined, which makes it possible to expand the output voltage range and reduce ripples. Expansion of the output voltage range is feasible due to the near-resonant or resonant mode of operation of the converter, which is feasible due to the MIEC structure, which is a resonant LC circuit.

### Ключевые слова

electrical energy converter, step-up DC voltage converter, functional integration, multifunctional integrated electromagnetic component, increased reliability, reduction in weight and dimensions

### 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 Khaziyeva 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».

**For citation:** Kirillov R. V., Aflyatunov R. R., Vasilyev P. I., Khazieva R. T. Issledovaniye povyshayushchego preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya na baze mnogofunktional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta [Investigation of a DC Voltage Booster Converter Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 68-81 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-68-81>.

## Введение

Работа повышающего преобразователя постоянного напряжения основана на явлении самоиндукции. Полупроводниковый ключ коммутирует через катушку индуктивности ток. При прерывании тока запасенная в магнитном поле катушки индуктивности энергия поступает через полупроводниковый диод и фильтрующий конденсатор на нагрузку. Управляя временем переключения полупроводникового ключа и током через него, можно выполнять регулировку выходного напряжения [1–6].

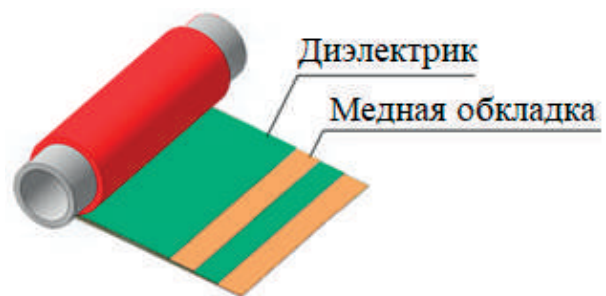
Применение методов функциональной интеграции позволяет заменить катушку индуктивности и фильтрующий конденсатор на единый гибридный элемент. Так, согласно источнику [7], замена отдельных дискретных компонентов на многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК) позволяет повысить надежность и энергетическую эффективность повышающего преобразователя постоянного напряжения, снизить его массу и габариты. В условиях нынешнего дефицита проводников и диэлектриков актуально исследование методов функциональной интеграции электромагнитных компонентов. Подробно эффективность гибридных преобразователей постоянного тока рассмотрена в источнике [8], где авторами разработаны схемы преобразователей постоянного тока с двумя индуктивными элементами и распределенной емкостью, что позволило снизить пульсации выходного напряжения.

Научная значимость исследований заключается в возможности применения

данной технологии в направлениях, связанных с преобразованием электрической энергии, в том числе преобразованием в тепловую энергию посредством индукционного нагрева. Практическая значимость разработанного технического решения заключается в снижении ресурсоемкости систем, основанных на гибридных электромагнитных компонентах, а также повышении надежности за счет снижения количества соединений и отдельных дискретных элементов.

## Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент

Объектом исследования является МИЭК, который представляет собой две токопроводящие медные обкладки, разделенные полиимидным диэлектриком и свернутые в рулон (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент

**Figure 1.** Multifunctional integrated electromagnetic component

Схема замещения многофункционального интегрированного электромагнитного компонента представлена на рисунке 2.



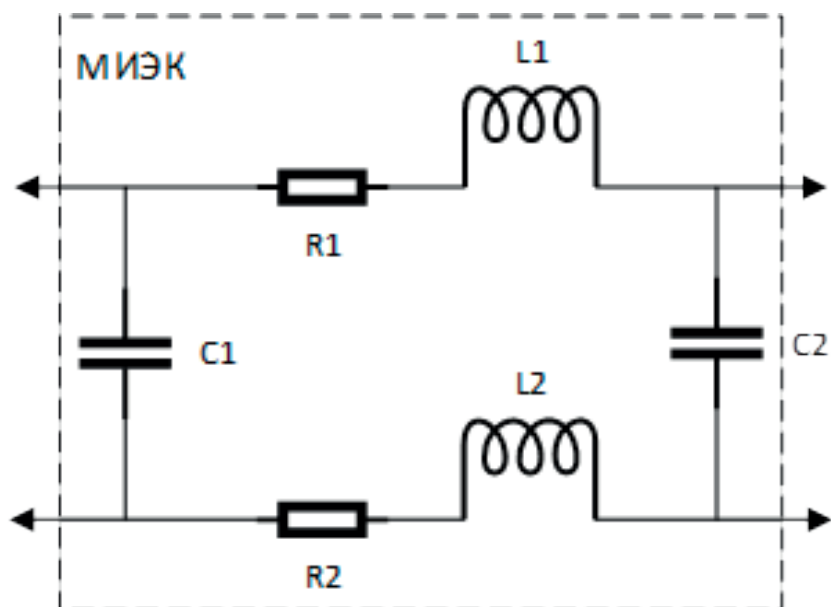


Рисунок 2. Схема замещения МИЭК

Figure 2. Equivalent circuit of multifunctional integrated electromagnetic component

### Компьютерная модель

Для схемы замещения МИЭК в программном комплексе Circuit Simulator была создана компьютерная модель на основе математической модели двухсекционного МИЭК с параметрами индуктивности обкладок 10 мкГн и эквивалентной емкостью 250 нФ.

Исследование математических моделей проведено при помощи методов конечных элементов в программном комплексе MATLAB [9, 10]. Особенностью моделирования МИЭК является распределенная по всей площади обкладок, выполняющих роль индуктивностей, емкость. С целью упрощения моделиро-

вания принято допущение, согласно которому распределенная емкость представлена в виде эквивалентной емкости в начале и конце обкладок.

Компьютерная модель упрощенной схемы повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе МИЭК в программном комплексе Circuit Simulator (рисунок 3) представляет собой источник постоянного напряжения 12 В, подключенный положительным полюсом к началу первой обкладки МИЭК и отрицательным полюсом — к началу второй обкладки МИЭК, конец второй обкладки и сама обкладка в целом являются общей точкой (землей) схемы, при

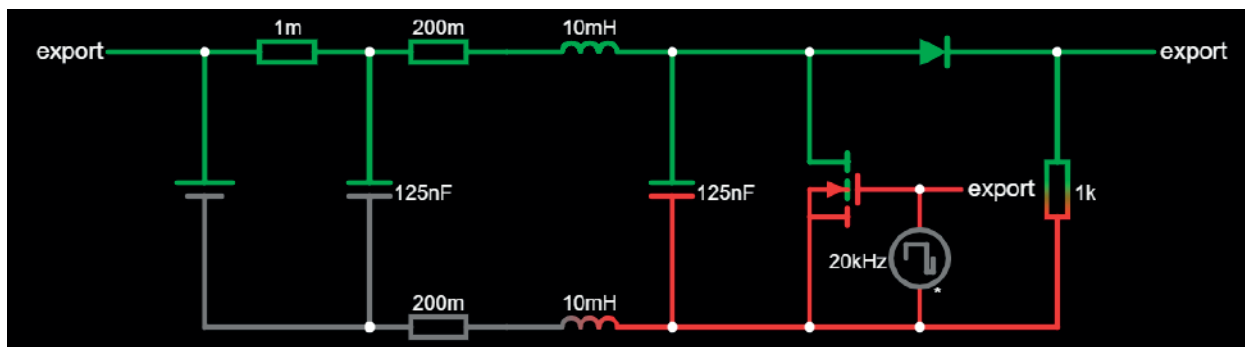


Рисунок 3. Компьютерная модель

Figure 3. Computer model

этом конец первой обкладки соединен со стоком транзистора, регулирующего накачку энергии в обкладку и эквивалентную емкость компонента [11].

Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунке 4 в виде графиков напряжения на входе схемы, управляющего сигнала на затворе транзистора и напряжения на выходе схемы. Изменение параметров управляющего сигнала в цепи затвора транзистора позволило сократить пульсации выходного напряжения модели повышающего преобразователя напряжения из источника [12] с амплитудного значения от 17 до 4,8 В [13].

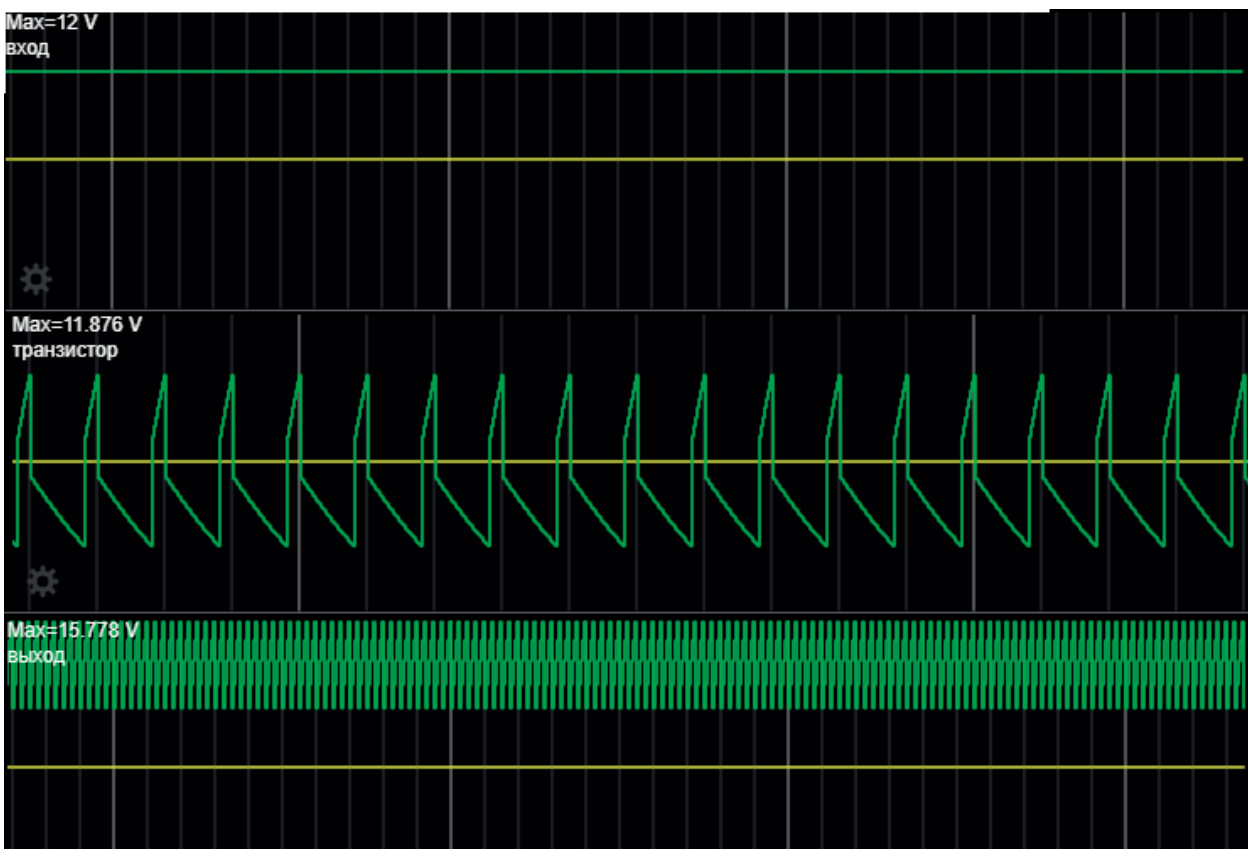
Наряду с регулировкой выходного напряжения форма сигнала в цепи затвора транзистора играет важную роль в величине пульсаций на выходе схемы. В ходе компьютерного моделирования

достигнута форма сигнала, обеспечивающая минимальные пульсации напряжения на выходе схемы. Главной особенностью такого сигнала является плавный фронт нарастания импульса (рисунок 4).

### Лабораторные исследования

Полученные в ходе компьютерного моделирования результаты показали целесообразность лабораторных исследований и создания схемы повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе МИЭК. Была выбрана оптимальная схема преобразователя постоянного напряжения (рисунок 5) [14].

Дискретные элементы Tr1 и C7 были заменены на многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (рисунок 6).



**Рисунок 4.** Графики напряжения на входе управляющего сигнала в цепи затвора транзистора и на выходе схемы

**Figure 4.** Graphs of the voltage at the input of the control signal in the gate circuit of the transistor and at the output of the circuit

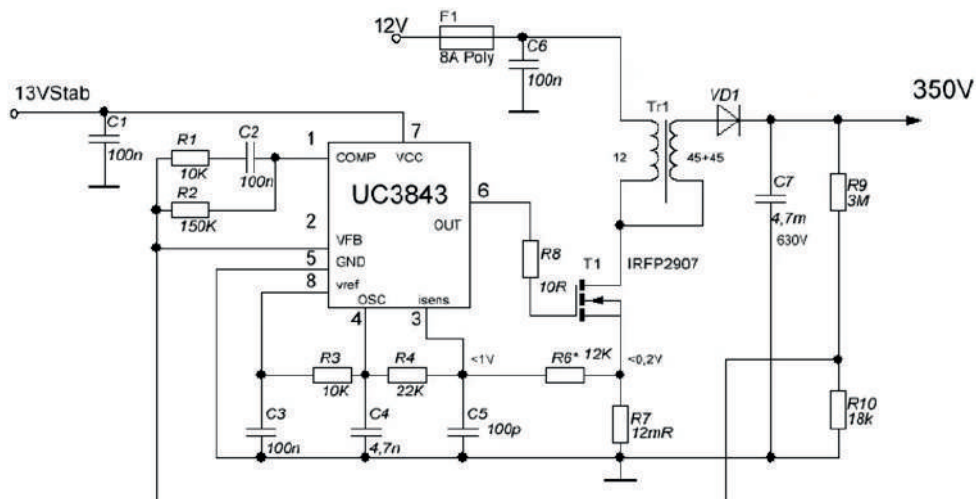


Рисунок 5. Схема преобразователя постоянного напряжения

Figure 5. DC voltage converter circuit

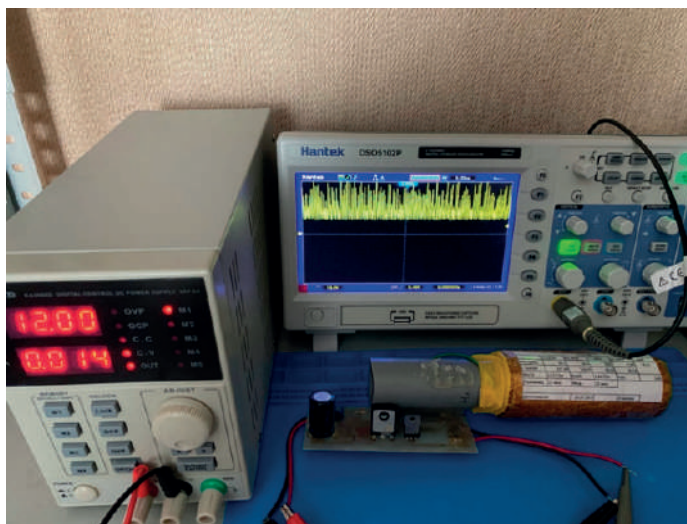


Рисунок 6. Собранная схема преобразователя

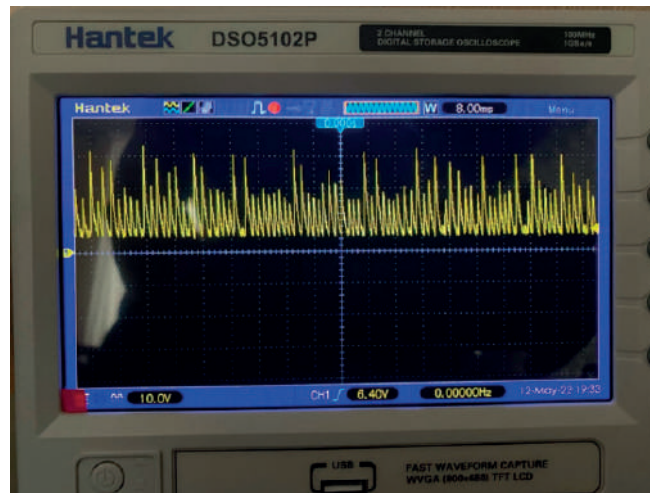
Figure 6. Assembled converter circuit

При питании схемы от напряжения 12 В осциллограмма выходного сигнала имеет сильные пульсации, достигающие амплитудного значения 27 В (рисунок 7).

С целью снижения пульсаций для экспериментального подтверждения возможной нехватки емкости фильтрующего конденсатора, функцию которого выполняет МИЭК, дополнительно подключен внешний дискретный конденсатор номиналом 1000 мкФ [15]. При этом пульсации значительно снизились, и выходное напряжение приняло постоянную форму сигнала (рисунок 8).

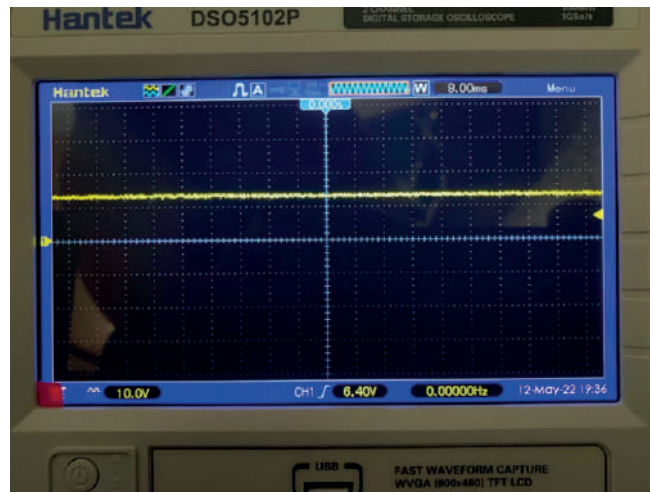
Наличие пульсаций выходного напряжения напрямую зависит от алгоритма управления преобразователем, ввиду чего был изменен сигнал, подаваемый на силовой транзистор Т1 схемы преобразователя постоянного напряжения. Частота следования импульсов преобразователя до замены частотообразующей RC-цепи составляла 791 Гц (рисунок 9).

В повышающем преобразователе преобразование электрической энергии происходит в два этапа (рисунок 10). На первом этапе транзистор открыт, и ток через него от источника поступает на обмотки



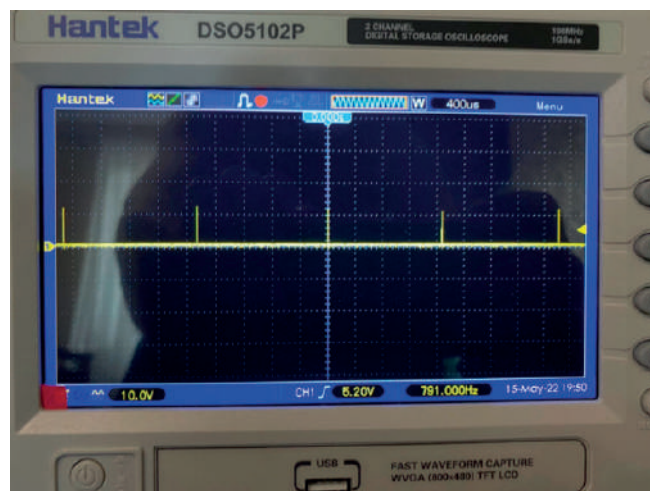
**Рисунок 7.** Осциллограмма выходного напряжения

**Figure 7.** Output voltage waveform



**Рисунок 8.** Осциллограмма выходного напряжения с дополнительной емкостью

**Figure 8.** Output voltage waveform with additional capacitance



**Рисунок 9.** Осциллограмма частоты следования импульсов преобразователя до замены частотоподающей RC-цепи

**Figure 9.** Oscillogram of the pulse repetition rate of the converter before replacing the frequency-setting RC circuit

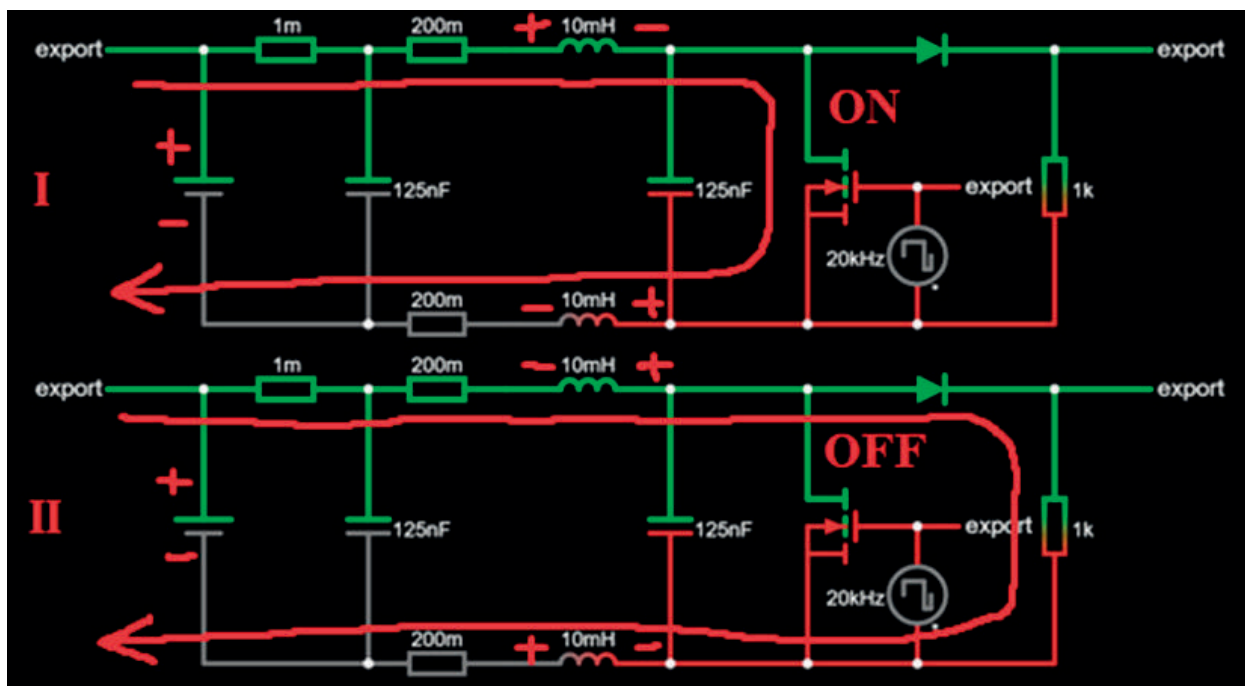


Рисунок 10. Этапы преобразования электрической энергии

Figure 10. Stages of conversion of electrical energy

МИЭК. При этом ток на индуктивности МИЭК достигает максимума за время  $t_{ON}$ . После закрытия транзистора наступает второй этап, индуктивность МИЭК перестает быть потребителем энергии и начинает отдавать ее на нагрузку. Таким образом, напряжение на выходе преобразователя складывается из напряжения источника питания и напряжения на индуктивностях МИЭК.

Уравнение регулировочной характеристики имеет вид:

$$V_{OUT} = V_{IN} \times \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{t_{OFF}},$$

где  $V_{OUT}$  — напряжение на выходе преобразователя;

$V_{IN}$  — напряжение источника питания;

$t_{ON}$  — время, когда транзистор открыт;

$t_{OFF}$  — время, когда транзистор закрыт.

Из формулы следует, что управлять напряжением на выходе преобразователя можно, изменяя время открытого и закрытого состояния транзистора (рисунок 11). Это действует также и на пульсации напряжения. Таким образом, сокращение времени закрытого состоя-

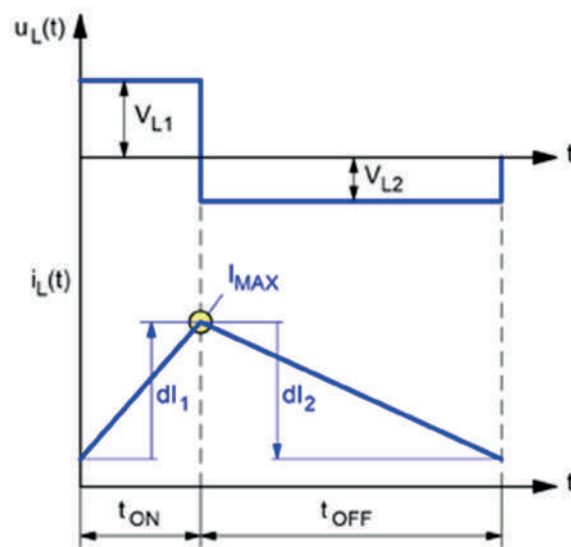


Рисунок 11. Графики зависимости напряжения и тока от времени

Figure 11. Graphs of voltage and current versus time

ния транзистора позволяет снизить пульсации на выходе схемы.

Несущая частота преобразователя напряжения после модернизации схемы составила 66,15 кГц (рисунок 12), что привело к снижению пульсаций выходного напряжения преобразователя без



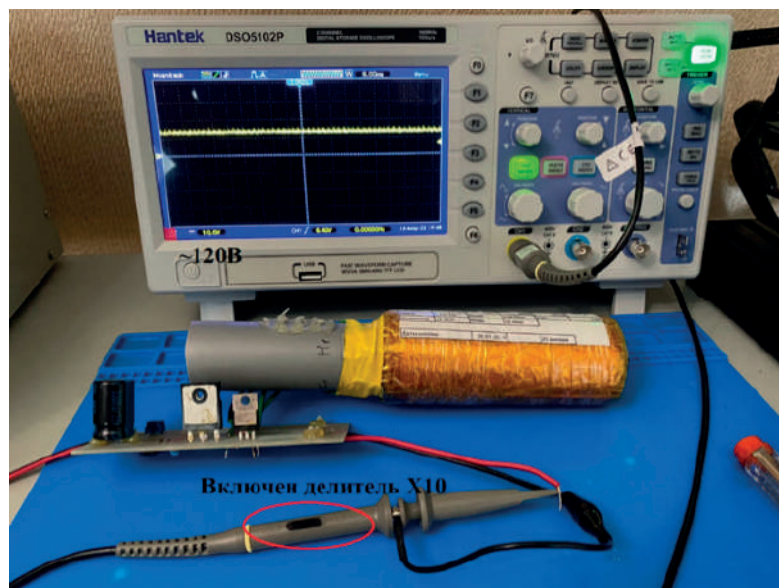
**Рисунок 12.** Осциллограмма несущей частоты преобразователя после замены частотоподающей RC-цепи

**Figure 12.** Oscillogram of the carrier frequency of the converter after replacing the frequency-setting RC circuit

внесения в схему дополнительной емкости. Изменился также фронт нарастания управляющего сигнала в цепи затвора транзистора. Длительность нарастания фронта приняла те же значения, что и в компьютерной модели.

С заменой частотоподающей RC-цепи повышающего преобразователя расши-

рился диапазон регулируемого выходного напряжения, таким образом, лабораторный образец повышающего преобразователя на основе МИЭК способен обеспечить диапазон выходного напряжения 20–110 В, при питании схемы от 12 В (рисунок 13). Пульсации напряжения при этом не превышают 1,5 В.



**Рисунок 13.** Осциллограмма выходного напряжения после замены частотоподающей RC-цепи

**Figure 13.** Oscillogram of the output voltage after replacing the frequency-setting RC circuit

Расширение диапазона регулировки выходного напряжения обусловлено окolorезонансным режимом работы преобразователя, так как МИЭК представляет собой колебательный LC-контур с резонансной частотой 100,6 кГц при индуктивности обкладок 10 мкГн и емкости компонента 250 нФ [12–16].

Для достоверности полученных данных в лабораторных условиях исследованы частотные характеристики нескольких МИЭК, выполненных по многосекционной структуре (рисунок 14).

Результаты исследований подтвердили корректность зависимости параметров емкости и индуктивности многофункционального интегрированного электромагнитного компонента от изменения диапазона выходного напряжения повышающего преобразователя напряжения.

В ходе лабораторных исследований была подтверждена корректность разработанной компьютерной модели повышающего преобразователя постоянного напряжения. Разница между выходными

напряжениями компьютерной модели и лабораторного образца составила 2,5 %.

Проблема недостатка емкости фильтрующего конденсатора, функцию которого выполняет МИЭК, решена внесением дополнительной емкости в схему преобразователя. Однако для повышения емкости необходимо увеличивать длину или ширину обкладок, что приведет к увеличению массы и габаритов системы. Изменение алгоритма управления силовой частью системы позволило снизить уровень пульсаций выходного напряжения, а, следовательно, обеспечить более ровную форму выходного напряжения.

Представленная авторами схема повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента обладает более высоким коэффициентом усиления по напряжению и позволяет снизить массу и габариты электротехнических систем и устройств по сравнению со схемами, выполненными с использованием дискретных элементов емкости и индуктивности.



**Рисунок 14.** Лабораторные образцы МИЭК

**Figure 14.** Laboratory samples of multifunctional integrated electromagnetic component

## Выводы

В ходе математического моделирования системы преобразования постоянного напряжения на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента получены графики выходного напряжения, позволяющие сделать вывод о целесообразности создания схемы повышающего преобразователя с заменой дискретных элементов емкости и индуктивности на единый гибридный компонент.

Лабораторные исследования подтвердили результаты математического моделирования и позволили сформировать заключение о работе повышающего преобразователя постоянного напряжения

на основе МИЭК. Целесообразно исследование свойств повышающего преобразователя напряжения на основе МИЭК с измененной геометрией и, как следствие, параметрами емкости и индуктивности компонента с целью снижения пульсаций напряжения на выходе преобразователя. Дополнительно снизить пульсации выходного напряжения позволяет применение специального алгоритма управления схемой преобразователя постоянного напряжения на основе МИЭК. Работа повышающего преобразователя в околорезонансном либо резонансном режиме позволяет расширить диапазон регулировки выходного напряжения.

## Список источников

1. Андриянов А.И. Проектирование импульсных преобразователей постоянного напряжения с учетом динамических нелинейностей // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2 (51). С. 39-44. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-39-44.
2. Володин Е.В., Осипов О.И. Экспериментальное исследование повышающего DC-DC преобразователя // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3 (44). С. 47-52. doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-47-52.
3. Дунаев М.П., Довудов С.У. Сравнение энергетических показателей импульсных преобразователей постоянного тока по результатам имитационного компьютерного моделирования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1 (50). С. 35-41. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41.
4. Huynh D. M., Ito Y., Aso S., Kato K., Teraoka K. New Concept of the DC-DC Converter Circuit Applied for the Small Capacity Uninterruptible Power Supply // 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 - ECCE Asia). 2018. P. 3086-3091. doi: 10.23919/IPEC.2018.8507821.
5. Dasari R. K., Immanuel D. G. Comprehensive Review of Single Switch DC-DC Converters for Voltage Lift in RES Application // 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). 2018. P. 281-288, doi: 10.1109/ICPECTS.2018.8521598.
6. Liya P.F., Aathira K.V. A Coupled Inductor Buck-Boost DC-DC Converter with Wide Voltage

Conversion Range // 2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]. 2014. P. 708-713. doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054817.

7. Саттаров Р.Р., Хазиева Р.Т., Хабибуллин Т.Р., Горшенин А.И. Исследование понижающего преобразователя на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электротехнические комплексы и системы: сб. междунар. науч.-практ. конф. Уфа: УГАТУ, 2020. С. 71-77.

8. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н. Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона // Вестник Московского энергетического института. 2018. № 4. С. 81-88.

9. Muntean N., Gavris M., Cornea O. Dual Input Hybrid DC-DC Converters // 2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool. 2011. P. 1-4. doi: 10.1109/EUROCON.2011.5929268.

10. Porselvi T., Arounassalame M. A Novel Single Switch High Gain DC-DC Converter // 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (ICPE). 2018. P. 1-6. doi: 10.1109/ICPE.2018.8709508.

11. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1(34). С. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.



12. Барсуков В.К. Исследование искажения формы напряжения в точке подключения выпрямителя с емкостным фильтром // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 9-10. С. 52-60.

13. Малев Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Малацион А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 126-140. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140.

14. Garg M.M., Hote Y.V., Pathak M.K., Behera L. An Approach for Buck Converter PI Controller Design Using Stability Boundary Locus // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (TD). IEEE. 2018. P. 1-5. doi: 10.1109/TDC.2018.8440291.

15. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // Электричество. 2020. № 1. С. 32-38. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38>.

### References

1. Andriyanov A.I. Proektirovanie impul'snykh preobrazovatelei postoyannogo napryazheniya s uchetom dinamicheskikh nelineinostei [Design of Pulse-Width DC/DC Converters Taking into Account Dynamic Nonlinearity]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrical Systems and Complexes*, 2021, No. 2 (51), pp. 39-44. doi: 10.18503/2311-8318-2021-2(51)-39-44. [in Russian].

2. Volodin E.V., Osipov O.I. Eksperimental'noe issledovanie povyshayushchego DC-DC preobrazovatelya [Experimental Research of Step-Up DC-DC Converter]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrical Systems and Complexes*, 2019, No. 3 (44), pp. 47-52. doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-47-52. [in Russian].

3. Dunaev M.P., Dovudov S.U. Sravnenie energeticheskikh pokazatelei impul'snykh preobrazovatelei postoyannogo toka po rezul'tatam imitatsionnogo komp'yuternogo modelirovaniya [Comparing the Energy Performance of Pulsed DC Converters according to the Results of Computer Simulation]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrical Systems and Complexes*, 2021, No. 1 (50), pp. 35-41. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41. [in Russian].

4. Huynh D. M., Ito Y., Aso S., Kato K., Teraoka K. New Concept of the DC-DC Converter Circuit Applied for the Small Capacity Uninterruptible Power Supply. *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE*

*Asia*), 2018, pp. 3086-3091. doi: 10.23919/IPEC.2018.8507821.

5. Dasari R. K., Immanuel D. G. Comprehensive Review of Single Switch DC-DC Converters for Voltage Lift in RES Application. *2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, 2018, pp. 281-288. doi: 10.1109/ICPECTS.2018.8521598.

6. Liya P.F., Aathira K.V. A Coupled Inductor Buck-Boost DC-DC Converter with Wide Voltage Conversion Range. *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*, 2014, pp. 708-713. doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054817.

7. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Khabibullin T.R., Gorshenin A.I. Issledovanie ponizhayushchego preobrazovatelya na baze mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta [Study of a Step-Down Converter Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Sbornik Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy»*. [Collection of the International Scientific and Practical Conference «Electro-technical Complexes and Systems»]. Ufa, USATU, 2020, pp. 71-77. [in Russian].

8. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Sirenko V.V., Shakirzyanov F.N. Razrabotka matematicheskoi modeli i analiz osobennostei rezhimov induktivno-emkostnogo preobrazovatelya na osnove katkona [The Mathematical Model of a Katkon-Based Inductive-Capacitive Converter and Specific Features of Its Operation Modes]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta — Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2018, No. 4, pp. 81-88. [in Russian].

9. Muntean N., Gavris M., Cornea O. Dual Input Hybrid DC-DC Converters. *2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool*, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/EUROCON.2011.5929268.

10. Porselvi T., Arounassalame M. A Novel Single Switch High Gain DC-DC Converter. *2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/IICPE.2018.8709508.

11. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analiz stabilizatsionnykh svoistv induktivno-emkostnykh preobrazovatelei pri razlichnykh sposobakh podklyucheniya gibridnykh elektromagnitnykh elementov [Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrical Systems and Complexes*, 2017, No. 1

(34), pp. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55. [in Russian].

12. Barsukov V.K. Issledovanie iskazheniya formy napryazheniya v tochke podklyucheniya vypryamitelya s emkostnym fil'trom [Investigation of Voltage Waveform Distortion at the Connection Point of a Rectifier with a Capacitive Filter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems*, 2009, No. 9-10, pp. 52-60. [in Russian].

13. Malev N.A., Pogoditskii O.V., Kozelkov O.V., Malatsion A.S. Tsifrovoy algoritm kontrolya funktsionirovaniya elektromekhanicheskogo preobrazovatelya postoyannogo toka [Digital Algorithm for Monitoring the Operation of an Electromechanical DC Converter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*

— *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems*, 2022, Vol. 24, No. 1, pp. 126-140. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140. [in Russian].

14. Garg M.M., Hote Y.V., Pathak M.K., Behera L. An Approach for Buck Converter PI Controller Design Using Stability Boundary Locus. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (TD)*, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/TDC.2018.8440291.

15. Konesev S.G., Khazieva R.T. Matematika i fizicheskoe modelirovanie induktivno-emkostnykh preobrazovatelei [Mathematical and Physical Modeling of Inductive-Capacitive Converters]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2020, No. 1, pp. 32-38. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38>. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 08.02.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 16.02.2023.*

*The article was submitted 08.02.2023; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 16.02.2023.*

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19, № 1. С. 82–92. ISSN 1999-5458 (print)  
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2023. Vol. 19. No. 1. P. 82–92. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-82-92

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ЗАРЯДА ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ



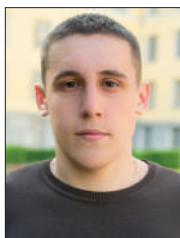
**Роман Вячеславович Кириллов**  
**Roman V. Kirillov**

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



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

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



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

аспирант, ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехнологии»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



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

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

### Актуальность

Источники вторичного питания, преобразователи частоты, инверторы активно применяются в современной быстроразвивающейся энергетике. В процессе стремления к снижению массогабаритных показателей устройств и повышения их мощности возникает необходимость в использовании импульсных режимов преобразователей электрической энергии. Колебательные контуры резонансных инверторов содержат такие элементы, как катушка индуктивности и конденсатор, т.е. электромагнитные элементы, как правило, состав-

### Ключевые слова

многофункциональный интегральный электромагнитный компонент, фильтрокомпенсирующее устройство, источник вторичного электропитания,

ляющие до 85–90 % массы и габаритов источников вторичного электропитания. Основными техническими средствами снижения массы и габаритов электромагнитных элементов являются повышение частоты преобразования и функциональная интеграция. Резонансные режимы работы инверторов при коммутации позволят снизить помехи и потери.

#### **Цель исследования**

В данной статье разработана система заряда емкостного накопителя и смоделированы электромагнитные процессы в фильтрокомпенсирующем устройстве в составе системы заряда емкостного накопителя.

Основной задачей является разработка системы заряда емкостного накопителя.

#### **Методы исследования**

В данном исследовании использованы следующие методы: изучение научной литературы и компьютерное моделирование в среде Matlab.

#### **Результаты**

Авторами разработана компьютерная модель в среде моделирования MatLab системы заряда емкостного накопителя (ЕН) на базе полумостовой схемы индуктивно-емкостного преобразователя на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК). Проведены исследования уровней напряжения на различных точках четырехполюсника: на обкладках и емкости МИЭК, в диагоналях инвертора — с целью нахождения максимального напряжения. В результате компьютерного моделирования и экспериментальных исследований получены графики напряжений на элементах полумостовой схемы системы заряда емкостного накопителя. Разработанная компьютерная модель позволит исследовать различные режимы работы вторичного источника питания на основе предлагаемого компонента в высоковольтных системах заряда накопителей энергии. Разработанная модель позволяет снизить финансовые затраты на экспериментальные исследования, также данная модель позволяет исследовать более сложные системы на основе МИЭК, которые имеют другие свойства и показатели.

автономный  
резонансный инвертор,  
функциональная  
интеграция

#### **Благодарности:**

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

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

**Для цитирования:** Кириллов Р. В., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И., Хазиева Р. Т. Моделирование электромагнитных процессов в фильтрокомпенсирующем устройстве в составе системы заряда емкостного накопителя магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 82-92. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-82-92>.

Original article

## SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE FILTER-COMPENSATOR DEVICE AS PART OF THE CHARGING SYSTEM OF THE CAPACITIVE STORAGE

### The relevance

Secondary power supplies, frequency converters, and inverters are actively used in modern rapidly developing power engineering. The trend towards a decrease in the weight and size of devices and an increase in their power explains the need to use pulse modes of electrical energy converters. The oscillatory circuits of resonant inverters contain elements such as an inductor and a capacitor, i.e. electromagnetic elements, as a rule, constituting up to 85–90 % of the mass and dimensions of secondary power supplies. The main technical means of reducing the mass and dimensions of electromagnetic elements are increasing the conversion frequency and functional integration. Resonant modes of operation of inverters during switching can reduce interference and losses.

### Aim of research

This article discusses the development of an efficient capacitive storage charging system and simulation of electromagnetic processes in a filter-compensating device as part of an efficient capacitive storage charging system.

The main task is to develop an efficient capacitive storage charging system.

### Research methods

Research methods. In this study, the following methods were used: the study of scientific literature and computer simulation in the Matlab environment.

### Results

The authors have developed a computer model in MatLab of a capacitive storage charging system based on a half-bridge circuit of an inductive-capacitive converter. A multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC) is used as a pre-absorber. Investigations of voltage levels at various points of the four-terminal network have been carried out. The voltage on the plates and capacitance MIEC was determined. The voltage in the diagonals of the inverter was measured to find the maximum voltage. Because of computer modeling and experimental research, graphs of voltages on the elements of the half-bridge circuit of the capacitive storage charging system were obtained. The developed computer model will allow the investigation of various modes of operation of a secondary power source based on the proposed component in high-voltage charging systems for energy storage devices. The developed model allows you to reduce the financial costs of experimental research. Also, this model allows you to explore more complex systems based on MIEC, which have different properties and indicators.

### Ключевые слова

electrical energy converter, step-up DC voltage converter, functional integration, multifunctional integrated electromagnetic component, increased reliability, reduction in weight and dimensions

### 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 Khaziyeva Regina T.

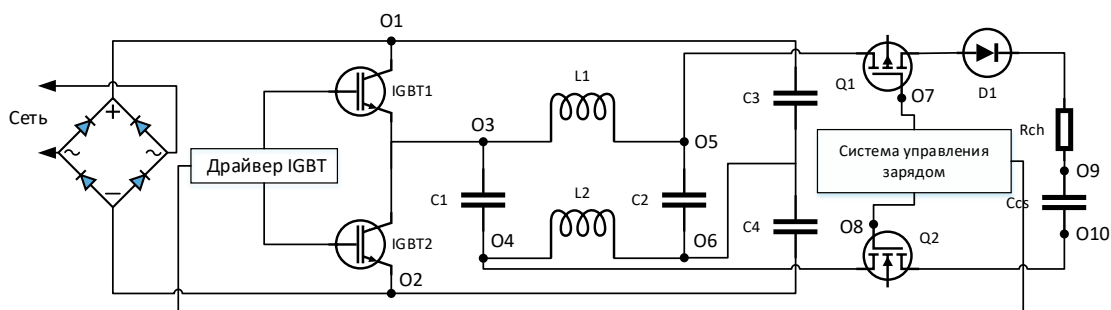
The priority direction of the modernization of the Russian economy (the direction of the competition No. SP-2022 of the Council for Grants of the President of the Russian Federation) «Energy efficiency and energy saving, including the development of new types of fuel». Research topic: «Development and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

**For citation:** Kirillov R. V., Aflyatunov R. R., Vasilyev P. I., Khazieva R. T. Modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov v fil'trokompensiruyushchem ustroystve v sostave sistemy zaryada yemkostnogo nakopitelya [Modeling an Efficient Capacitive Storage Charge System in Matlab]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 82-92 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-82-92>.

В различных направлениях электротехники, таких как электротермия, квантовая электротехника, электротехнология и импульсная электроэнергетика, открываются новые способы работы и управления за счёт применения фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) [1–5]. За последние годы ФКУ сильно развиваются за счёт большого спроса на рынке электротехнических устройств и разработки новых схемотехнических решений [6–15]. Одним из наиболее эффективных устройств, способных выполнить фильтрокомпенсирующую функцию и стабилизировать ток, является устройство индуктивно-емкостного преобразователя [16–20]. За последние годы развитие ФКУ свелось к тому, чтобы уменьшить его массогабаритные показатели. Решением этой проблемы стало использование многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, который не только уменьшает массу и габариты ФКУ, но и снижает стоимость изготовления и увеличивает функциональные возможности

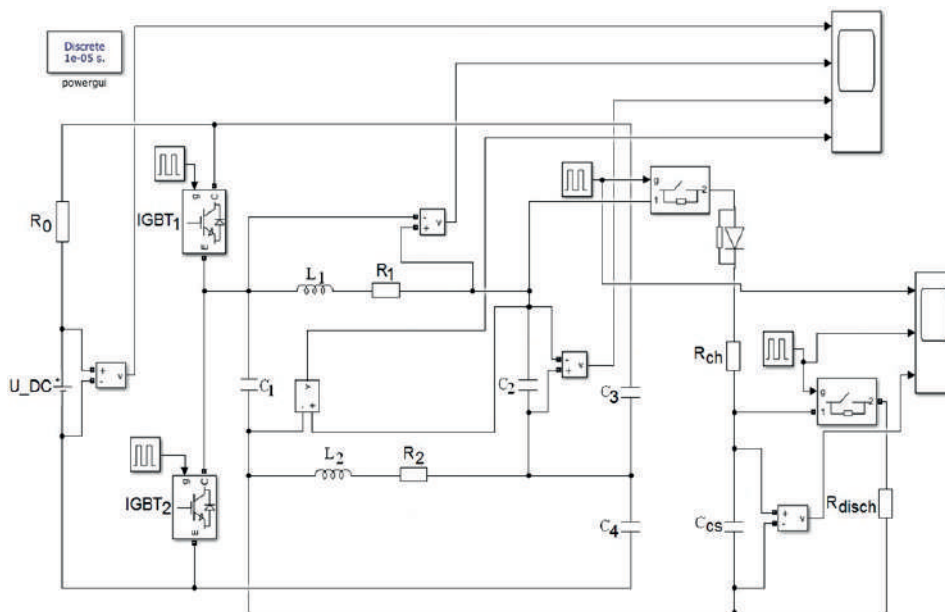
его применения [21–23]. Авторами разработана модель односекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) как источник питания для заряда емкостного накопителя (ЕН) в программе MatLab и выполнено моделирование электромагнитных процессов в ФКУ в составе системы заряда емкостного накопителя на основе электрической схемы устройства (рисунок 1) [24, 25].

Схема реализована на основе полумостового преобразователя напряжения. Сигнал с системы управления поступает на драйвер силовых IGBT транзисторов IGBT1 и IGBT2, которые, в свою очередь, коммутируют выпрямленное при помощи диодного моста напряжение через емкостной делитель C3, C4. Обкладки МИЭК выполняют роль дросселя в части схемы, отвечающей за преобразование постоянного тока и связаны диагонально с управляемым выпрямителем на основе полупроводниковых ключей Q1, Q2 и диода D1. Длительность заряда и его величину определяет



**Рисунок 1.** Электрическая схема системы заряда емкостного накопителя с индуктивно-емкостным преобразователем на основе односекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

**Figure 1.** Electrical diagram of the capacitive storage charging system with an inductive-capacitive converter based on a single-section multifunctional integrated electromagnetic component



**Рисунок 2.** Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя с индуктивно-емкостным преобразователем на основе односекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

**Figure 2.** Computer model of the capacitive storage charging system with an inductive-capacitive converter based on a single-section multifunctional integrated electromagnetic component

система управления. Контроль формы управляющего сигнала транзисторов, напряжения на емкости и индуктивностях МИЭК, а также напряжения зарядной емкости осуществляется в точках O1-O10 при помощи осциллографа.

Авторами была поставлена и решена задача исследования режимов работы системы заряда ЕН, выполненного на базе односекционного МИЭК. На рисунке 2 представлена реализованная модель системы заряда ЕН на базе полумостовой схемы с индуктивно-емкостным преобразователем (ИЕП), включенным в диагональ, в среде Simulink пакета MatLab с использованием библиотеки блоков SimPowerSystems.

Модель и экспериментальный образец системы заряда ЕН состоят из источника постоянного напряжения, автономного инвертора напряжения (полумостовая схема), односекционного МИЭК, работающего в резонансном режиме и выполняющего роль ФКУ, ЕН с разрядной цепью.

Проведены исследования уровней напряжения на различных точках четырехполосника: на обкладках и емкости МИЭК, в диагоналях инвертора — с целью нахождения максимального напряжения.

Система уравнений, описывающая процессы в односекционном МИЭК с использованием интегральных параметров, для уточненной схемы замещения имеет вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\text{вх.}} = \underline{U}_{\text{пл.}} + \underline{U}, \\ \underline{U} = \frac{I_{\text{вх.}} - I_{\text{н.}}}{j \cdot \omega \cdot C}, \\ \underline{U}_{\text{пл.}} = (R + j \cdot \omega \cdot (L \pm M)) \cdot (I_{\text{вх.}} + I_{\text{н.}}), \\ \underline{U}_{\text{н.}} + \underline{U}_{\text{пл.}} = \underline{U}. \end{cases}$$

Энергия, запасенная в ЕН, определяется по формуле:

$$W_C = C \cdot U^2 / 2,$$

где  $C$  — емкость накопительного конденсатора;

$U$  — напряжение на накопительном конденсаторе.

Энергия накопительного конденсатора определяется по формуле:

$$W_c = P / f_k,$$

где  $P$  — мощность устройства заряда;

$f_k$  — частота коммутации.

Иначе мощность устройства заряда определяется по формуле:

$$P = W_{ИЕП} / f_p,$$

где  $W_{ИЕП}$  — энергия, запасаемая конденсатором ИЕП;

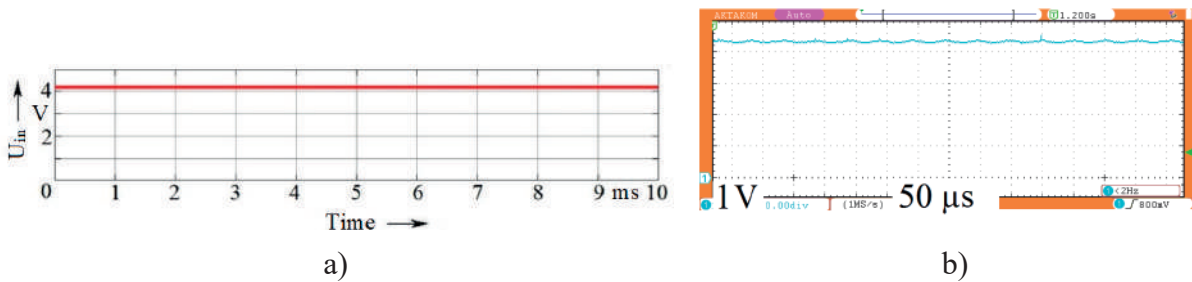
$f_p$  — частота резонансного контура.

В результате компьютерного моделирования и экспериментальных исследований получены графики напряжений

на элементах полумостовой схемы системы заряда ЕН, представленные на рисунках 3–6.

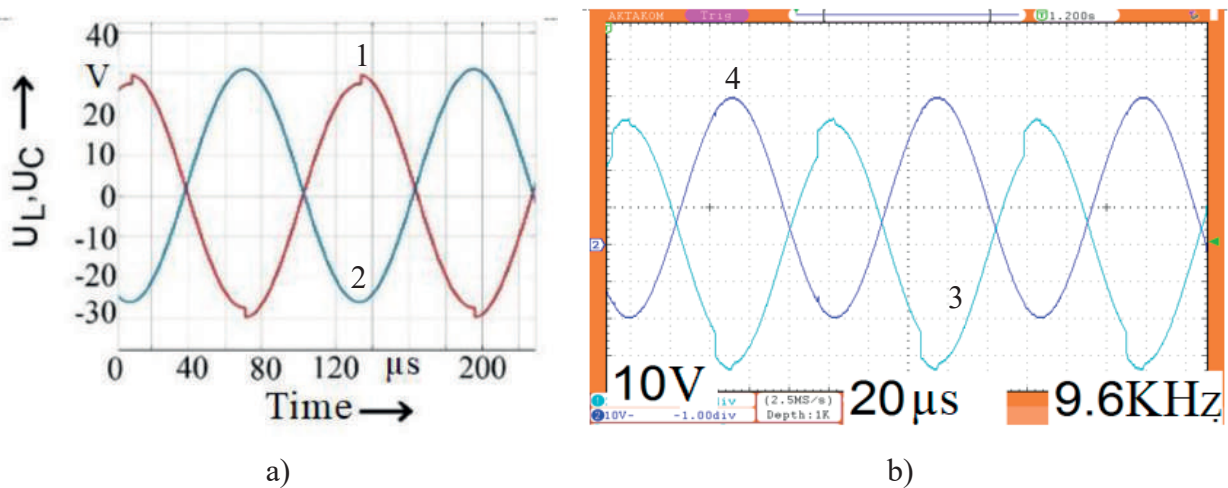
На вход инвертора подается постоянное напряжение амплитудой 4,2 В (рисунок 3).

На рисунке 4 показан график напряжения на индуктивности (проводящей обкладке) и емкости МИЭК в резонансном режиме работы (амплитуда напряжения 30 В свидетельствует о добротности, равной 7). Работа в резонансном режиме с добротностью  $Q$  позволяет получить на обкладках МИЭК напряжение, равное  $Q \cdot U_{ex}$ .



**Рисунок 3.** Графики напряжения на входе инвертора: полученный с помощью модели (а); полученный с помощью осциллографа (б)

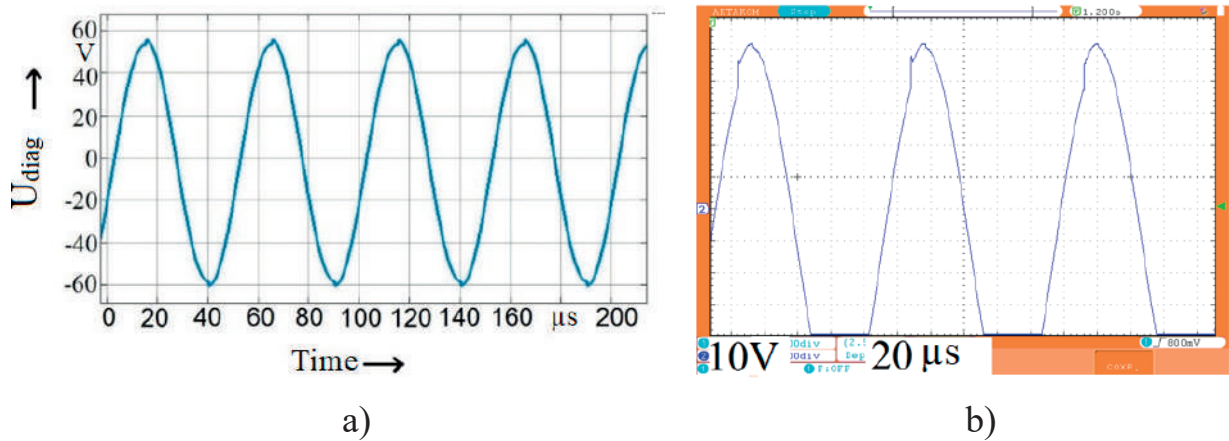
**Figure 3.** Inverter input voltage graphs: obtained using the model (a); obtained with an oscilloscope (b)



**Рисунок 4.** Графики напряжения на обкладке (линия 1 / линия 2) и емкости (линия 3 / линия 4) МИЭК: полученный с помощью модели (а); полученный с помощью осциллографа (б)

**Figure 4.** Graphs of the voltage on the lining (line 1 / line 2) and capacitance (line 3 / line 4) MIEC: derived from the model (a); obtained with an oscilloscope (b)





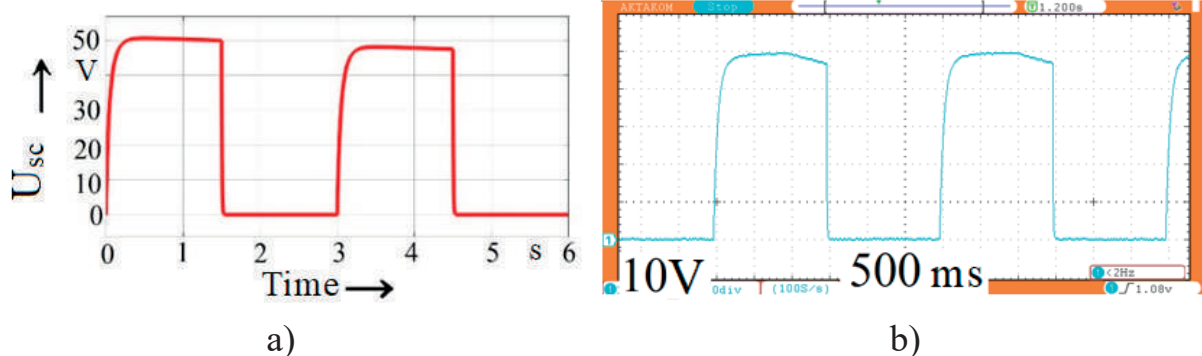
**Рисунок 5.** Графики напряжения в диагонали инвертора: полученный с помощью модели (а); полученный с помощью осциллографа (с делителем «\*10») (b)

**Figure 5.** Voltage graphs in the diagonal of the inverter: derived from the model (a); obtained using an oscilloscope (with a divider «\* 10») (b)

На рисунке 5 приведен график напряжения в диагонали инвертора (амплитудой 50 В). Получено, что максимальное напряжение достигается в диагонали инвертора. В диагонали инвертора достигается уровень напряжения  $2 \cdot U_{ex}$ .

На рисунке 6 показан график перезаряда ЕН (емкостью 15,5 мкФ, сопротивление резистора в цепи заряда равно 500 Ом) на активную нагрузку (резистор сопротивлением 345 Ом).

Из графика видно, что ЕН заряжается до уровня напряжения в 11,9 раза превышающего напряжение источника питания за счет включения ЕН в диагональ полумостовой схемы и резонансного режима работы МИЭК. Выявлен эффект значительного повышения напряжения. Включение нагрузки в диагональ инвертора позволяет достичь уровня напряжения  $2 \cdot Q \cdot U_{ex}$ .



**Рисунок 6.** Графики напряжения на емкостном накопителе: полученный с помощью модели (а); полученный с помощью осциллографа (b)

**Figure 6.** Capacitive storage voltage graphs: derived from the model (a); obtained with an oscilloscope (b)

### Выводы

Таким образом, доказана энергетическая эффективность и целесообразность создания системы заряда ЕН, выполнен-

ной на основе МИЭК, в особенности для высоковольтных систем, где помимо стабилизации тока требуется значительное повышение напряжения.

Разработанная компьютерная модель может использоваться для исследования режимов работы более сложных схем (например на основе двухсекционного МИЭК), в частности, в системах заряда ЕН.

Кроме того, разработанная компьютерная модель может использоваться для

исследования режимов работы схем на основе МИЭК в высоковольтных системах заряда ЕН, экспериментальное исследование которых сопряжено со значительными финансовыми затратами и характеризуется большей сложностью с точки зрения реализации макетного образца для проведения исследований.

### Список источников

1. Narimani M., Moschopoulos G. An Investigation on the Novel Use of High-Power Three-Level Converter Topologies to Improve Light-Load Efficiency in Low Power DC/DC Full-Bridge Converters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Oct. 2014. Vol. 61, No. 10. P. 5690-5692. doi: 10.1109/TIE.2014.2300063.

2. Yifei L., Yubin W., Shanshan W. Sensorless Current Sharing in Two-Phase Input-Parallel Output-Parallel DC-DC Converters // *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2015. P. 1919-1924. doi: 10.1109/ICEMS.2015.7385354.

3. Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Афлятунов Р.Р. О возможности использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе гибридных фильтрокомпенсирующих устройств // *Завалишинские чтения — 2022: XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике*. СПб.: ГУАП, 12–14 апреля 2022. С. 130-132.

4. Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т. Исследование фильтрокомпенсирующей функции многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе системы индукционного нагрева // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2022. Т. 18. № 1. С. 95-106.

5. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Карпунина М.В., Кваснюк А.А., Шакирзянов Ф.Н. Быстродействующее устройство ограничения токов короткого замыкания на основе катушки-конденсатора // *Известия РАН. Энергетика*. 2021. № 4. С. 58-71.

6. Li H., Liu C., Zhang X., Guo Z., Zheng T.Q. Stability Analysis for Two-Stage Cascaded DC-DC Converters System Based on Describing Function Method // *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2018. P. 4141-4147. doi: 10.1109/ECCE.2018.8558204.

7. Hinov N., Gilev B. Modeling of Series Resonant DC-DC Power Converters // *2018 International Conference on High Technology for Sustai-*

*nable Development (HiTech)*. 2018. P. 1-4. doi: 10.1109/HiTech.2018.8566410.

8. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н. Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона // *Вестник Московского энергетического института*. 2018. № 4. С. 81-88.

9. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н., Кваснюк А.А. Экспериментальное исследование переходных процессов в катушке-конденсаторе // *Известия РАН. Серия физическая*. 2020. Т. 84. № 2. С. 157-160.

10. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кваснюк А.А., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н. Физическое моделирование гребенчатого фильтра на основе каткона // *Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: тр. XVII Междунар. конф. Крым, Алушта*. Алушта: Издательство «Знак», 2018. С. 331-333.

11. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Система управления параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2012. № 2. С. 49-54.

12. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра энергии на базе релейного регулятора тока // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2013. № 4. С. 54-57.

13. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Применение параллельного активного фильтра электроэнергии для компенсации реактивной мощности и гармонических составляющих тока в трехфазных электрических сетях // *Управление большими системами: матер. IX Всеросс. школы-конф. молодых ученых*. Липецк, 2012. С. 173-176.

14. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Inductive-Capacitive Converters for High-Voltage

Secondary Power Supplies // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. P. 1-5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934018.

15. Setlak L., Kowalik R. DC/DC Processing System of Inductive-Capacitive Character of On-Board Electrical Network of an Aircraft in Accordance with the Concept of an Electrified Aircraft // 2019 3rd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS). 2019. P. 53-59. doi: 10.1109/EECS49779.2019.00023.

16. Довгун В.П., Боярская Н.П., Новиков В.В. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 9-10. С. 31-39.

17. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Н.Новгород: НГТУ, 2004. 214 с.

18. Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020. № 3. С. 339-346. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42842530>

19. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Ivanov M.D., Solovev V.A. Amplitude-Frequency Characteristic of a MIEC-Based Filter for DC/DC Converters // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). pp. 362-367. INSPEC Accession Number: 21767147. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787145.

20. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Ivanov M.D. Integrated LC-Components for Electrical Systems and Devices // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practic). doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559527. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559527/references#references>.

21. Waffenschmidt E. Direct Current (DC) Supply Grids for LED Lighting // LED Professional. 2015. No. 48. P. 12.

22. Khazieva R.T., Aflyatunov R.R., Vasilyev P.I. Modeling a Semiconductor Compensator Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559601

23. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559601>.

24. Патент 2585248 РФ, МПК Н 03 Н 7/00. Многофункциональный интегрированный элект-

ромагнитный компонент / С.Г. Конесев. 2012114845/08; Заявлено 13.04.2012; Опубл. 27.05.2016. Бюл. 12. 7 с.

25. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // Электричество. 2020. № 1. С. 32-38. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38>.

26. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Calibration Technique of AC Voltage of A Resonant Test Device // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). pp. 344-350. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787187.

## References

1. Narimani M., Moschopoulos G. An Investigation on the Novel Use of High-Power Three-Level Converter Topologies to Improve Light-Load Efficiency in Low Power DC/DC Full-Bridge Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Oct. 2014, Vol. 61, No. 10, pp. 5690-5692. doi: 10.1109/TIE.2014.2300063

2. Yifei L., Yubin W., Shanshan W. Sensorless Current Sharing in Two-Phase Input-Parallel Output-Parallel DC-DC Converters. *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2015, pp. 1919-1924. doi: 10.1109/ICEMS.2015.7385354

3. Khazieva R.T., Vasil'ev P.I., Aflyatunov R.R. O vozmozhnosti ispol'zovaniya mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta v sostave gibridnykh fil'trokompensiruyushchikh ustroystv [On the Possibility of Using a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component as Part of Hybrid Filter-Compensating Devices]. *Sbornik XVII Mezhdunarodnoy konferentsii po elektromekhanike i robototekhnike «Zavalishinskie chteniya — 2022»*. [Collection of the XVII International Conference in Electromechanics and Robotics «Zavalishinsky Readings — 2022»]. Saint-Petersburg, GUAP, 12–14 aprelya 2022, pp. 130-132.

4. Aflyatunov R.R., Vasil'ev P.I., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Issledovanie fil'trokompensiruyushchei funktsii mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta v sostave sistemy induktsionnogo nagreva [Study of the Filter-Compensating Function of a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component as Part of an Induction Heating System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrotechnical and Information Complexes and Systems*, 2022, Vol. 18, No. 1, pp. 95-106.

5. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Karpunina M.V., Kvasnyuk A.A., Shakirzyanov F.N. Bystrodeistviyushchee ustroystvo ograniчениya tokov korotkogo замыkaniya na osnove katushki-kondensatora [High-Speed Device for Limiting Short-Circuit Currents Based on a Coil-Capacitor]. *Izvestiya RAN. Energetika — Izvestiya RAS. Power Engineering*, 2021, No. 4, pp. 58-71.
6. Li H., Liu C., Zhang X., Guo Z., Zheng T.Q. Stability Analysis for Two-Stage Cascaded DC-DC Converters System Based on Describing Function Method. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, pp. 4141-4147. doi: 10.1109/ECCE.2018.8558204.
7. Hinov N., Gilev B. Modeling of Series Resonant DC-DC Power Converters. *2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/HiTech.2018.8566410.
8. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Sirenko V.V., Shakirzyanov F.N. Razrabotka matematicheskoi modeli i analiz osobennosti rezhimov induktivno-emkostnogo preobrazovatelya na osnove katkona [The Mathematical Model of a Katkon-Based Inductive-Capacitive Converter and Specific Features of Its Operation Modes]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta — Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2018, No. 4, pp. 81-88. [in Russian].
9. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzyanov F.N., Kvasnyuk A.A. Eksperimental'noe issledovanie perekhodnykh protsessov v katushke-kondensatore [Experimental Study of Transient Processes in a Coil-Capacitor]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya — Izvestiya RAS. Physical Series*, 2020, Vol. 84, No. 2, pp. 157-160.
10. Butyrin P.A., Gusev G.G., Kvasnyuk A.A., Mikheev D.V., Shakirzyanov F.N. Fizicheskoe modelirovanie grebenchatogo fil'tra na osnove katkona [Physical Modeling of a Comb Filter Based on Katkon]. : *Trudy XVII Mezhdunarodnoi konferentsii «Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskie materialy i komponenty»*, Krym, Alushta, 24–28 Sentyabrya 2018. [Proceedings of the XVII International Conference «Electromechanics, Electrotechnologies, Electrical Materials and Components», Crimea, Alushta, September 24–28, 2018. Crimea, Alushta] Alushta, Znak Publ., 2018, pp. 331-333.
11. Meshcheryakov V.N., Khabibullin M.M. Sistema upravleniya parallel'nym aktivnym fil'trokompensiruyushchim ustroystvom na baze releinogo regulyatora toka v trekhfaznykh elektricheskikh setyakh [Control System for a Parallel Active Filter-Compensating Device Based on a Relay Current Controller in Three-Phase Electrical Networks]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya — Electrotechnical Complexes and Control Systems*, 2012, No. 2, pp. 49-54.
12. Meshcheryakov V.N., Khabibullin M.M. Kompensatsiya garmonicheskikh iskazhenii i reaktivnoi moshchnosti v odnofaznykh elektricheskikh setyakh posredstvom parallel'nogo aktivnogo fil'tra energii na baze releinogo regulyatora toka [Compensation of Harmonic Distortions and Reactive Power in Single-Phase Electrical Networks by Means of a Parallel Active Energy Filter Based on a Relay Current Controller]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika — News of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2013, No. 4, pp. 54-57.
13. Meshcheryakov V.N., Khabibullin M.M. Primenenie parallel'nogo aktivnogo fil'tra elektroenergii dlya kompensatsii reaktivnoi moshchnosti i garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka v trekhfaznykh elektricheskikh setyakh [Application of a Parallel Active Power Filter for Compensation of Reactive Power and Harmonic Components of Current in Three-Phase Electrical Networks]. *Materialy IX Vserossiiskoi shkoly konferentsii molodykh uchenykh «Upravlenie bol'shimi sistemami»* [Proceedings of the IX All-Russian School of the Conference of Young Scientists «Management of Large Systems»]. Lipetsk, 2012. S. 173-176.
14. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Inductive-Capacitive Converters for High-Voltage Secondary Power Supplies. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934018.
15. Setlak L., Kowalik R. DC/DC Processing System of Inductive-Capacitive Character of On-Board Electrical Network of an Aircraft in Accordance with the Concept of an Electrified Aircraft. *2019 3rd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*, 2019, pp. 53-59. doi: 10.1109/EECS49779.2019.00023.
16. Dovgun V.P., Boyarskaya N.P., Novikov V.V. Sintez passivnykh fil'trokompensiruyushchikh ustroystv [Synthesis of Passive Filter Compensating Devices.]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering*, 2011, No. 9-10. pp. 31-39.
17. Vagin G.Ya., Loskutov A.B., Sevost'yanov A.A. *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic Compatibility in the Electric Power Industry]. Nizhniy Novgorod, NGTU, 2004, 214 p.

18. Shklyarskii Ya.E., Zamyatina E.N., Zamyatin E.O. Otsenka energeticheskoi effektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa [Evaluation of the Energy Efficiency of the Electrical Complex]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, No. 3, pp. 339-346. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42842530>.
19. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Ivanov M.D., Solovev B.A. Amplitude-Frequency Characteristic of a MIEC-Based Filter for DC/DC Converters. *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022)*. pp. 362-367. INSPEC Accession Number: 21767147. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787145.
20. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Ivanov M.D. Integrated LC-Components for Electrical Systems and Devices. *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practic)*. doi:10.1109/UralCon52005.2021.9559527. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559527/references#references>.
21. Waffenschmidt E. Direct Current (DC) Supply Grids for LED Lighting. *LED Professional*, 2015, No. 48, pp. 12.
22. Khazieva R.T., Aflyatunov R.R., Vasilyev P.I. Modeling a Semiconductor Compensator Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component. *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559601. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559601>.
23. Konesev S.G. Mnogofunktsional'nyi integrirovannyi elektromagnitnyi komponent [Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. Patent RF, No. 2585248, 27.05.2016.
24. Konesev S.G., Khazieva R.T. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie induktivno-emkostnykh preobrazovatelei [Mathematical and Physical Modeling of Inductive-Capacitive Converters]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2020, No. 1, pp. 32-38. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38>. [in Russian].
25. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Calibration Technique of AC Voltage of A Resonant Test Device. *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022)*. pp. 344-350. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787187.

Статья поступила в редакцию 14.01.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 16.02.2023.

The article was submitted 14.01.2023; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 16.02.2023.

Научная статья

УДК 621.314

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-93-105

## СПОСОБЫ И СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Эдуард Ахнафович Гильманов****Eduard A. Gilmanov****кандидат технических наук,**главный энергетик, ГУП РБ «Уфаводоканал»,**Уфа, Россия*

### Актуальность

В современной промышленности используется много высоковольтных электроприводов. Высоковольтные электродвигатели используются при добыче нефти и газа, их транспортировке, на химических и нефтеперерабатывающих заводах, в энергетике, в сфере коммунального хозяйства. Однако при прямом пуске высоковольтных двигателей возникают ударные механические и электрические нагрузки на сами двигатели, подключенные технологические механизмы и электрическую сеть. В трубопроводах при прямых пусках приводов насосов могут возникать гидравлические волны давления, приводящие к разрушениям труб и их стыков. Обмотка двигателя за время одного пуска может нагреваться до критических температур, что вызывает старение изоляции, а также невозможность повторного пуска в течение нескольких часов. Поэтому внедрение устройств плавного пуска высоковольтных двигателей позволяет не только снизить механические и электрические нагрузки, но и продлить срок службы двигателей и оборудования.

### Цель исследования

Требовалось рассмотреть существующие способы пуска высоковольтных синхронных и асинхронных двигателей, а также проанализировать выпускаемые промышленностью устройства плавного пуска и их характеристики.

### Методы исследования

Использовались положения теории электрических цепей, теории электрических машин и теории электропривода.

### Результаты

В ходе работы рассмотрены существующие способы пуска высоковольтных двигателей, проанализированы их достоинства и недостатки, сложность реализации. Проанализированы выпускаемые промышленностью современные устройства плавного пуска и их характеристики.

### Ключевые слова

высоковольтный электродвигатель, устройство плавного пуска, тиристорный пуск, прямой пуск, схема группового запуска

**Для цитирования:** Гильманов Э. А. Способы и современные устройства плавного пуска высоковольтных двигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 93-105. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-93-105>.

Original article

## METHODS AND MODERN DEVICES FOR SOFT START OF HIGH VOLTAGE MOTORS

### The relevance

In today's industry, a lot of high-voltage electric drives are used. High-voltage electric motors are used in oil and gas production, transportation, chemical and oil refineries, energy and water supply. However, during direct start of high-voltage motors, shock mechanical and electrical loads occur on the motors themselves, connected technological mechanisms and the electrical network. In pipelines during direct starts of pump drives, hydraulic pressure waves can occur, leading to the destruction of pipes and their joints. The motor winding during one start-up can heat up to critical temperatures, which causes aging of the insulation, as well as the impossibility of restarting for several hours. Therefore, the introduction of devices for scheduled start-up of high-voltage motors allows not only to reduce mechanical and electrical loads, but also to extend the life of motors and equipment.

### Aim of research

It was necessary to consider the existing methods of starting high-voltage synchronous and asynchronous motors, as well as to analyze the soft starters manufactured by the industry and their characteristics.

### Research methods

The provisions of the theory of electrical circuits, the theory of electrical machines and the theory of electric drive were used.

### Results

In the course of the work, the existing methods for starting high-voltage motors were considered, their advantages and disadvantages, and the complexity of implementation were analyzed. The modern soft starters produced by the industry and their characteristics are analyzed.

### Ключевые слова

high-voltage electric motor, soft starter, thyristor starter, direct start, group start circuit

**For citation:** Gilmanov E. A. *Sposoby i sovremennyye ustroystva plavnogo puska vysokovol'tnykh dvigateley* [Methods and Modern Devices for Soft Start of High Voltage Motors]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 93-105 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-93-105>.

### Введение

В различных областях промышленности широко используется высоковольтный синхронный и асинхронный электроприводы. Высоковольтный электропривод применяется в нефтегазовой промышленности, металлургии, на горнодобывающих предприятиях, в энергетике и водоснабжении [1–5].

Одним из недостатков высоковольтного привода являются тяжелые условия прямого пуска. При прямом пуске кратность пускового тока достигает значений 5–7. Следствием таких бросков тока являются значительные механические и электромагнитные нагрузки на сами двигатели и подключенные механизмы [6–8]. Повторяющиеся ударные воздействия

приводят к поломкам дорогостоящего оборудования, повреждениям трубопроводов, что влечет необходимость дорогостоящих ремонтов [9, 10]. Использование устройств плавного пуска (УПП) позволяет снизить как токовые, так и механические перегрузки при запуске электродвигателей [11–13].

**Способы пуска электродвигателей**

Известно несколько способов пуска высоковольтных двигателей [14, 15]. Устройства плавного пуска реализуют частотный, квазичастотный и импульсный способы пуска [16].

При частотном пуске УПП осуществляет плавное изменение частоты питающего напряжения от нуля до необходимой конечной частоты [17]. Обычно изменение частоты производится по закону:

$$\frac{U}{f} = const,$$

где  $U$  — напряжение питания, В;  
 $f$  — частота напряжения, Гц.

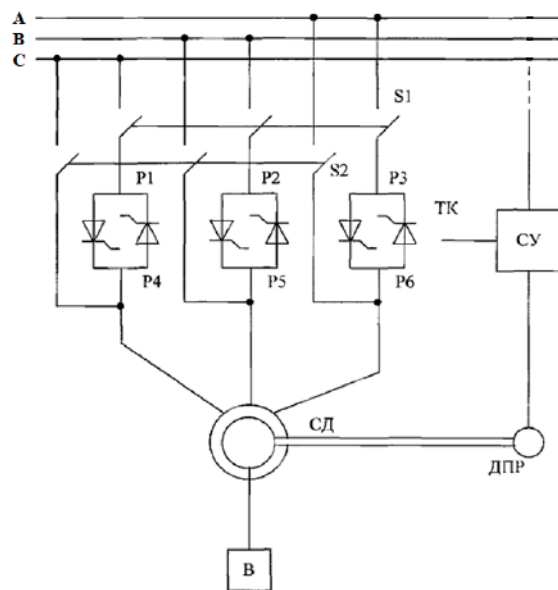
Для реализации частотного пуска используются устройства, состоящие из управляемого выпрямителя и зависимого инвертора тока [18].

К недостаткам частотного пуска можно отнести высокие массо-габаритные показатели и стоимость УПП, реализующих данный способ пуска. Также во время пуска происходит генерация высокочастотных помех из-за работы полупроводниковых блоков, что приводит к ухудшению качества электроэнергии. Для компенсации такого воздействия необходима установка фильтро-компенсирующих устройств, которые также имеют немалую стоимость [19].

При квазичастотном пуске производится увеличение частоты питающего напряжения от нуля до подсинхронной частоты по определенному закону [20]. Далее пуск продолжается как асинхронный пуск.

Устройства, реализующие квазичастотный пуск, имеют более простые схемы, меньшие габариты и массу, чем преобразователи частоты, а, соответственно, и меньшую стоимость.

При импульсном способе пуска производится периодическое (импульсное) изменение некоторого параметра электродвигателя или питающей сети [21]. При импульсном пуске синхронных двигателей статорная обмотка двигателя соединяется с сетью через тиристорный блок (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Структурная схема устройства импульсного пуска синхронного двигателя

**Figure 1.** Structural diagram of a device for a pulse starter of a synchronous motor

При пуске в статорную обмотку подаются единичные импульсы тока, которые синхронизируются с сигналами с датчика положения ротора. В результате взаимодействия с потоком возбуждения ротора возникает импульсный вращающий момент. Изменяя длительность, скважность и амплитуду импульсов, регулируют пусковой момент.

Преимущества импульсного способа пуска:

— в схеме отсутствует звено постоянного тока и реактор, что приводит к



снижению массы, габаритов и стоимости, повышению КПД;

- возможность использования неполнофазных схем, что делает УПП меньше и дешевле;

- нет необходимости использовать внешние возбудители;

- при достижении синхронной частоты вращения происходит автоматическая синхронизация с сетью;

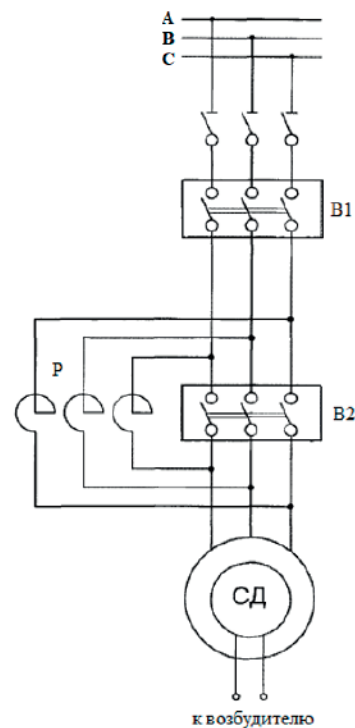
- благодаря естественной коммутации тиристоров обеспечивается устойчивость тиристорного блока во всех режимах работы.

Недостатками импульсного способа пуска являются отсутствие ограничения пусковых токов в синхронных машинах из-за неполной управляемости тиристоров, наличие в системе дорогостоящего датчика положения ротора, генерация высокочастотных импульсов в сеть при пуске.

Для пуска синхронных двигателей главным образом используется асинхронный способ [22, 23]. При этом осуществляют регулирование подаваемого на статорную обмотку напряжения за счет использования реакторов насыщения, автотрансформаторов, тиристорных устройств либо переключением схемы включения обмотки «звезда — треугольник».

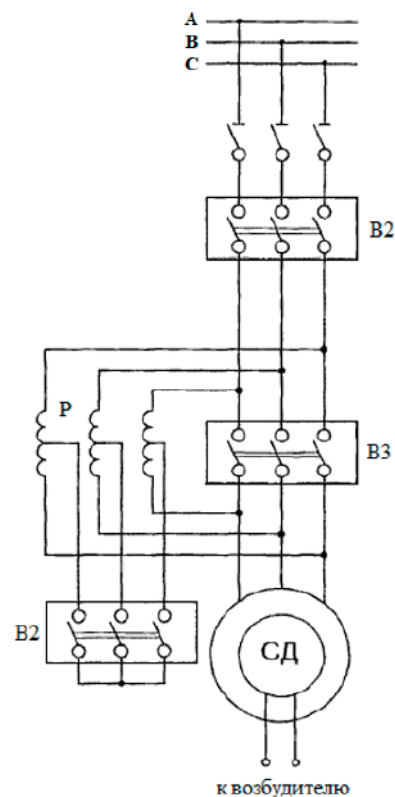
При реакторном пуске сначала подают напряжение сети на статорную обмотку электродвигателя через реактор (рисунок 2). Пусковой ток при этом ограничивается за счет реактивного сопротивления реактора [24]. После разгона электродвигателя статорную обмотку подключают напрямую к сети.

Для автотрансформаторного пуска используется трехфазный трансформатор, подключенный, как показано на рисунке 3. Сначала на двигатель подается пониженное напряжение через обмотки автотрансформатора, затем через часть его обмоток. После разгона двигателя, как и в предыдущем способе, включается на полное напряжение [25].



**Рисунок 2.** Схема реакторного пуска синхронного двигателя

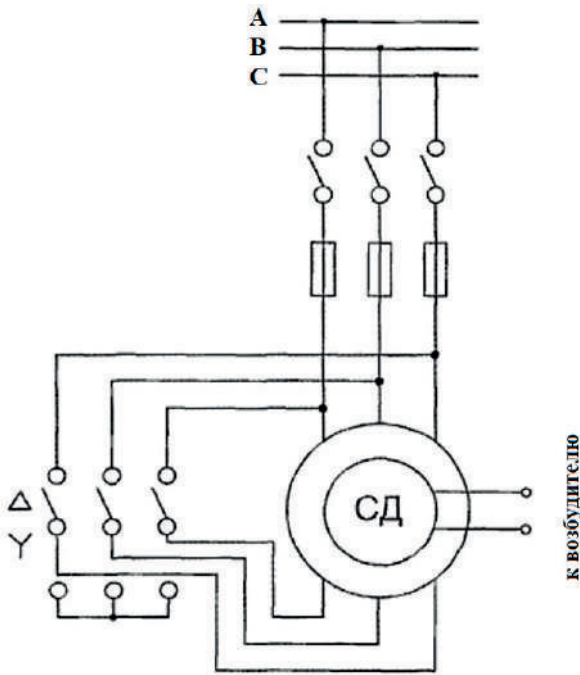
**Figure 2.** Scheme of reactor start-up of a synchronous motor



**Рисунок 3.** Схема автотрансформаторного пуска синхронного двигателя

**Figure 3.** Scheme of autotransformer start of a synchronous motor

На рисунке 4 показана схема пуска изменением способа соединения статорной обмотки. В момент запуска обмотка коммутируется в звезду, а после разгона переключается в треугольник. Это позволяет снизить фазные напряжения в  $\sqrt{3}$  раз, пусковой момент — в 3 раза, пусковой ток в фазах обмотки уменьшить в  $\sqrt{3}$  раз, а в сети — в 3 раза.



**Рисунок 4.** Схема пуска синхронного двигателя с переключением «звезда — треугольник»

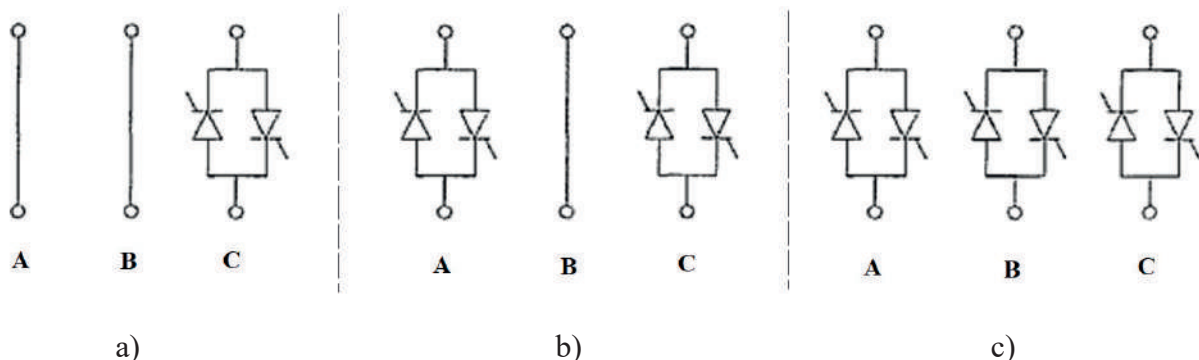
**Figure 4.** Scheme of starting a synchronous motor with star — delta switching

Однако при пуске с переключением схемы соединения обмоток происходит разрыв цепи, и возникают коммутационные перенапряжения. Еще один недостаток перечисленных способов пуска заключается в снижении пускового момента, что затрудняет пуск нагруженных двигателей.

Самыми распространенными и доступными являются тиристорные устройства плавного пуска [26, 27]. Они выполняются, как правило, на базе симисторных ключей (двух включенных встречно-параллельных тиристоров), включенных в одну (рисунок 5, а), две (рисунок 5, б) или три фазы (рисунок 5, в).

Изменяя угол открывания тиристоров, такие УПП позволяют плавно увеличивать напряжение, подаваемое на статорную обмотку двигателя.

Для снижения сложности и стоимости тиристорных УПП используют схемы с регулированием напряжения в одной и двух фазах (рисунок 5, а и б). Недостатком использования неполнофазных схем является возникновение перекоса фазных токов и напряжений в двигателе. Поэтому более предпочтительным является использование схемы с коммутацией всех трех фаз (рисунок 5, в).



**Рисунок 5.** Конфигурации силовой части устройства плавного пуска: схема с регулированием напряжения в одной фазе (а); схема с регулированием напряжения в двух фазах (б); схема с коммутацией трех фаз (в)

**Figure 5.** Configurations of the power section of the soft starter: circuit with voltage regulation in one phase (a); circuit with voltage regulation in two phases (b); three-phase switching circuit (c)

Надо заметить, что при соединении обмоток двигателя в треугольник возможно включение симисторного ключа не в фазу цепи питания, а в разрыв обмотки. В таком случае ток каждого ключа в  $\sqrt{3}$  раз меньше фазного тока, что приводит к улучшению КПД устройства и позволяет использовать менее мощные тиристоры.

Анализ работы тиристорных устройств плавного пуска позволяет сделать выводы, что подобные устройства устраняют только некоторые недостатки прямого пуска: ударный ток статора и колебательный момент большой амплитуды, за счет чего многократно увеличивается ресурс двигателя и механизма. Устройство плавного пуска только в редких случаях снижает неблагоприятное воздействие на сеть. Устраняется глубокий провал напряжения, обусловленный динамическим сверхтоком статора сразу после включения. Но искажение напряжения в сети увеличивается, что требует применения компенсирующих устройств. Достоинство данного способа по сравнению с другими способами асинхронного пуска заключается в бесступенчатом регулировании напряжения и плавном возрастании скорости.

#### **Устройства плавного пуска высоковольтных электродвигателей**

Выпуском УПП для высоковольтных электродвигателей занимается ряд отечественных и зарубежных предприятий, среди которых можно выделить «ЧЭАЗ», АВВ, НПП «ВЗСО», «Промышленная группа Прогрессия» ООО «АББ Автоматизация» и другие.

Устройство плавного пуска высоковольтных электродвигателей серии УППВЭ (ГК «ЧЭАЗ», г. Чебоксары) обеспечивает плавный пуск высоковольтных синхронных и асинхронных электродвигателей насосов, компрессоров, вентиляторов, воздуходувок и других производ-

ственных механизмов [28]. Плавный пуск высоковольтного электродвигателя достигается за счет формирования заданного темпа нарастания напряжения на электродвигателе от нуля до номинального значения. Запуск выбранного электродвигателя под управлением контроллера исключает возможность создания аварийных ситуаций, связанных с ошибочными действиями персонала при пуске и остановке высоковольтного электродвигателя. Технические характеристики УППВЭ приведены в таблице 1.

В устройствах серии УППВЭ реализован целый ряд защит:

- максимально-токовая;
- от затянувшегося пуска электродвигателя;
- от обрыва фазы управляющей сети;
- от понижения напряжения сети;
- от исчезновения вентиляции в шкафу УППВЭ;
- при недопустимом отклонении частоты питающей сети;
- от самопроизвольного изменения параметров настройки;
- от перенапряжений на тиристорах;
- от перегрева устройства;
- при ошибке системы управления;
- неверное чередование фаз;
- внешняя авария, ошибка внешней автоматики;
- ограничение количества пусков.

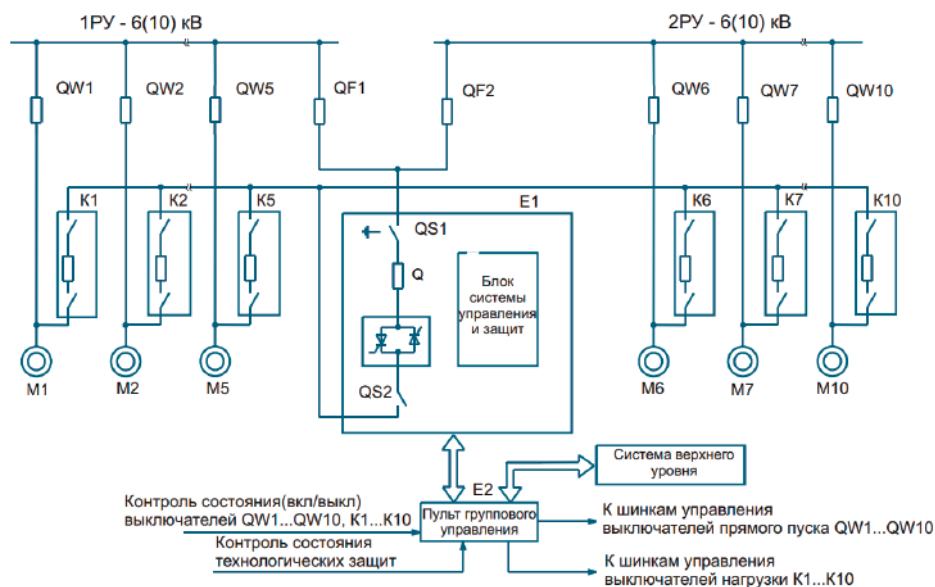
На рисунке 6 приведена схема группового запуска высоковольтных двигателей от одного устройства УППВЭ.

В таблице 2 приведены технические характеристики устройств плавного пуска высоковольтных электродвигателей УПВД («Промышленная группа Прогрессия», пгт. Полазна).

Основой устройства плавного пуска двигателя является несколько встречно-параллельных групп тиристоров (число групп определяется числом фаз машины) [29]. Управление вентилями осуществля-

**Таблица 1.** Технические характеристики устройства плавного пуска серии УППВЭ**Table 1.** Specifications of the soft starter of SSHVE series

Параметр	Значение
Род тока	переменный, трехфазный
Номинальное напряжение, кВ	3; 6,3; 10,5
Максимальный пусковой ток, А	350–3500
Частота, Гц	50
Диапазон мощностей запускаемых электродвигателей, МВт	0,2–12,5
Пределы ограничения пускового тока	(1–4) Ином. дв.
Напряжение питания вспомогательных цепей, В	~ 220
Регулируемое время пуска, с	5–120
Тиристоры	производство компании «АВВ»
Способ доставки управляющих импульсов	оптический, полная гальваническая развязка системы управления и силовых модулей
Количество пусков	3 пуска подряд с перерывом между пусками 15 мин
Степень защиты	IP41
Климатическое исполнение	УХЛ4
Габаритные размеры шкафа Ш × В × Г, мм	1500 × 2200 × 1200
Масса, кг	до 900



QW1–QW10 — выключатели прямого пуска в распределительные устройства (РУ);  
 QF, Qf2 — секционные выключатели; K1–K10 — контакторы; E1 — устройство УППВЭ;  
 E2 — пульт группового управления

**Рисунок 6.** Схема группового запуска высоковольтных двигателей от одного устройства УППВЭ**Figure 6.** Scheme of group start of high-voltage motors from one soft starter of high-voltage electric motors of SSHVEM series

**Таблица 2.** Технические характеристики устройства УПВД**Table 2.** Technical characteristics of the soft starter for high-voltage electric motors of SSHVEM series

Наименование	Ед. изм.	Значение
Напряжение входное	кВ	6(10) ± 15 %
Напряжение выходное	кВ	0–6(10)
Максимальный ток	А	до 1400
Мощность электродвигателя	МВт	до 8
Напряжение питания цепей управления	В	380

ется при помощи микропроцессорного блока управления, который формирует необходимую последовательность открытия тиристорov. Величина результирующего напряжения, подаваемого на обмотку статора электродвигателя, определяется углом открытия тиристорov, то есть временем между прохождением синусоиды питающего напряжения через нуль и подачей импульса на управляющий электрод тиристора. Таким образом, плавно изменяя угол открытия, устройство также плавно изменяет напряжение на статоре, что способствует плавному нарастанию скорости двигателя и препятствует скачкам тока статорной цепи.

УПВД позволяет производить запуск как асинхронных машин, так и синхронных с разгоном до подсинхронной скорости и последующим автоматическим включением стойки возбуждения. Также возможен запуск электрических машин, оборудованных вращающимся выпрямителем.

В устройстве УПВД реализованы следующие алгоритмы запуска электрической машины:

- пуск по времени;
- пуск с ограничением и стабилизацией тока;
- пуск с контролем достижения момента критического скольжения.

Для запуска электрических машин с большими приводными массами и наличием резонансных частот реализован режим быстрого прохода установленных частот вращения электродвигателя.

Устройство плавного пуска может поставляться в многодвигательной кон-

фигурации (рисунок 7). Для этого УПВД комплектуется блоком управления ячейками КСО и соответствующим количеством ячеек. В этой конфигурации при помощи одного плавного пуска возможен последовательный запуск восьми электродвигателей. Пуск каждого электродвигателя осуществляется по индивидуальной программе со своими параметрами.



**Рисунок 7.** Устройство плавного пуска высоковольтных электродвигателей УПВД («Промышленная группа Прогрессия», пгт. Полазна)

**Figure 7.** Soft starter for high-voltage electric motors of SSHVEM series («Industrial Group Progression», Polazna town)

В УПВД реализованы следующие защиты, обеспечивающие безотказную и безопасную эксплуатацию:

- по неполнофазному режиму;
- по превышению тока во время пуска;
- по отказу тиристорных ключей;
- по перегреву тиристорных ключей.

Высоковольтные устройства плавного пуска типа SSM (ООО «АББ Автоматизация», г. Чебоксары) разработаны для осуществления плавного безударного пуска высоковольтных асинхронных и синхронных электродвигателей практически для всех областей применения, где не требуется регулирования скорости вращения [30].

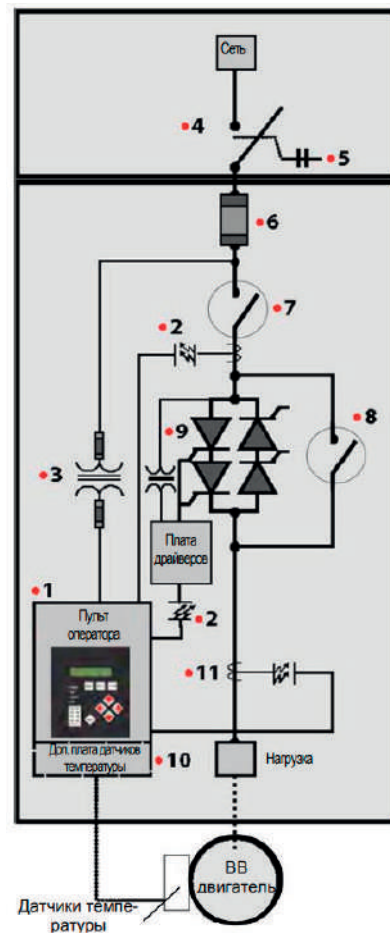
Высоковольтные устройства плавного пуска типа SSM позволяют:

- осуществлять плавное нарастание / снижение напряжения в течение заданного времени при пуске/останове двигателя с контролем тока и момента;
- значительно уменьшить пусковые токи двигателей;
- в сетях с ограниченной мощностью КЗ резко уменьшить провалы напряжения сети при пуске двигателей;
- существенно снизить при пуске электродинамические усилия на обмотки двигателя и ударные механические воздействия на механизмы.

Широкий спектр пусковых характеристик позволяет подобрать наиболее оптимальную из них для нужного технологического режима, например дистанционно выбрать характеристику для пуска нагруженного и ненагруженного конвейера. Существует исполнение SSM для реверсивных применений. Функция плавного замедления дает возможность избежать гидравлических ударов (или толчков) при останове двигателя. Функция малой подачи вала двигателя позволяет упростить регламентные работы на приводном механизме.

Схема УПП SSM приведена на рисунке 8. На схеме обозначены: 1 — пульт оператора для программирования функций защиты и параметров УПП; 2 — оптически развязанный низковольтный отсек; 3 — встроенный трансформатор цепей управления и измерительные трансформаторы; 4 — разъединитель; 5 — заземляющая шина и ножи; 6 — силовые пре-

дохранители с индикацией перегорания; 7 — вводной вакуумный контактор; 8 — шунтирующий контактор; 9 — тиристорные модули с гальванической развязкой сигналов управления; 10 — дополнительная плата для подключения датчиков температуры (до 12 резистивных датчиков); 11 — датчик тока утечки на землю; 12 — ввод кабеля силового питания; 13 — стальной корпус со степенью защиты IP54, IP21 или IP00.



**Рисунок 8.** Устройство плавного пуска высоковольтных электродвигателей SSM

**Figure 8.** Soft starter for high voltage motors SSM

В устройстве плавного пуска высоковольтных электродвигателей SSM реализованы следующие виды защит: защита от пониженного напряжения; защита от повышенного напряжения; защита от обрыва фазы; сигнализация недогрузки по току; максимально токовая электрон-

ная защита; защита от превышения двигателем допустимого уровня  $I^2t$ ; защита от несимметрии фазных токов; защита от короткого замыкания (электронный предохранитель); защита от неправильного чередования фаз; защита от отклонения частоты питающей сети; защита от недопустимого значения коэффициента мощности; защита от превышения допустимого числа пусков в час и ограничение времени между пусками; блокировка / запрет повторного пуска двигателя; защита от тепловой перегрузки (регистр нагрева); защита от превышения времени разгона; защита от утечки токов на землю (мгновенная и продолжительная); защита статора и подшипников от перегрева с помощью датчиков температуры; защита от непопадания в «вилку скоростей» к определенному времени разгона.

### Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

### Список источников

1. Корнилов Г.П., Шеметов А.Н., Шохин В.В., Усатый Д.Ю., Лыгин М.М. Опыт внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий в системах электроснабжения металлургического предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22. № 1. С. 12-20.
2. Дадабаев Ш.Т., Грачева Е.И. Технико-экономическое обоснование применения системы плавного пуска для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 141-150.
3. Савельев В.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Полкошников Д.А., Скоробогатов А.А. Метод контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций при пуске // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 4. С. 31-44.
4. Бугрезов А.Б., Проскуряков Д.В., Крюков О.В. Исследование условий эксплуатации приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 10. С. 9-21.

1. В настоящее время в промышленности отказываются от прямого пуска высоковольтных двигателей, так как он сокращает срок службы как самих двигателей, так и подключенных технологических механизмов, трубопроводов, вызывает просадки напряжения в сети.

2. Среди различных способов пуска высоковольтных двигателей наиболее перспективным является тиристорный пуск с использованием УПП, в которых обеспечивается постепенное нарастание напряжения, подаваемого на статорную обмотку двигателя, путем изменения фазы отпирания силовых тиристоров.

3. В настоящее время промышленностью выпускается целый ряд УПП для синхронных и асинхронных высоковольтных двигателей на различные уровни напряжений и различные мощности. Современные УПП позволяют организовывать схемы группового запуска нескольких высоковольтных двигателей от одного устройства.

5. Хакимьянов М.И., Гузев Б.В. Анализ использования частотно-регулируемого электропривода в нефтегазовой промышленности по результатам патентного поиска // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 4. С. 30-41.

6. Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б., Танич В.О., Петушков М.Ю. Снижение пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности фазных напряжений // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 47-54.

7. Livadaru L., Simion A., Munteanu A., Cojan M., Dabija O. Dual Cage High Power Induction Motor with Direct Start-up. Design and FEM Analysis // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2013. Vol. 13. No. 2. P. 55-59.

8. Chen H., Bi C. Optimal Starting Frequency of Three-Phase Induction Motor // IET Electric Power Applications. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 362-369.

9. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Анализ волн давления при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов на нефтеперекачивающей станции // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. Вып. 3 (85). С. 111-117.

10. Fayziyev P.R., Ikromov I.A., Abduraximov A.A., Dehqonov Q.M. Organization of Technological Processes for Maintenance and Repair of Electric Vehicles // *International Journal of Advance Scientific Research*. 2022. Vol. 2. No. 03. P. 37-41.
11. Deraz S.A., Azazi H.Z. Current Limiting Soft Starter for Three Phase Induction Motor Drive System Using PWM AC Chopper // *IET Power Electronics*. 2017. Vol. 10. No. 11. P. 1298-1306.
12. Zenginobuz G., Cadirci I., Ermis M., Barlak C. Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current with Minimized Starting Torque Pulsations // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001. Vol. 37. No. 5. P. 1334-1347.
13. Абрамов Б.И., Дацковский Л.Х., Кузьмин И.К., Придатков А.Г., Лиморенко П.М. Устройства плавного пуска в электроприводах горных механизмов // *Электротехника*. 2014. № 1. С. 19-27.
14. Дадабаев Ш.Т. Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 10. С. 618-621.
15. Палкин А.Ф., Любимов Э.В. Исследование способов пуска асинхронного электродвигателя в условиях его влияния на посадку напряжения в сети электроснабжения собственных нужд ГРЭС // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 12-1. С. 51-56.
16. Каширских В.Г., Переверзев С.С. Сравнительный анализ способов плавного пуска асинхронных электроприводов горных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2005. № 10. С. 308-311.
17. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Коновалов Ю.В. Выбор способа пуска синхронного двигателя используемого в качестве потребителя регулятора // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2012. № 6. С. 1-9.
18. Ривкин Г.А. Преобразовательные устройства. М.: Энергия, 1970. С. 158-197.
19. Маслов И.П., Семькина И.Ю. Математическое моделирование различных способов пуска вентилятора местного проветривания с электрическим приводом // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2014. № 2. С. 67-73.
20. Переверзев С.С. Применение квазичастотного управления для пуска асинхронного электродвигателя // *Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: тр. I Всеросс. науч.-техн. конф.* 2007. С. 361-365.
21. Басков С.Н., Коньков А.С. Комбинированный способ пуска асинхронных двигателей // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2011. № 4. С. 74-77.
22. Криворучко Н.А. Преимущества и недостатки асинхронного пуска синхронного двигателя с использованием реактора // *Вестник науки*. 2022. Т. 3. № 6 (51). С. 221-225.
23. Буторин Г.В., Ключников А.Т., Чабанов Е.А. Исследование режимов пуска синхронного двигателя при пониженной частоте // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электро-техника, информационные технологии, системы управления*. 2019. № 31. С. 159-176.
24. Марков А.С., Синюкова Т.В. Исследование систем запуска синхронного двигателя // *Наука. Исследования. Практика*. 2020. С. 148-151.
25. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Плотников И.Г., Турышева А.В. Исследование пусковых режимов синхронных приводов нефтегазодобывающих предприятий // *Записки Горного института*. 2012. Т. 196. С. 218-221.
26. Peng H. Research on Intelligent Control System of High Power Soft Starter Based on Discrete Frequency Conversion Technology // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1744. No. 2. P. 022006.
27. Timoshkin V.V., Popov S.S. Study of Electric Drive with Thyristor Voltage Regulator // *Yugra State University Bulletin*. 2022. Vol. 18. No. 3. P. 99-106.
28. Устройство плавного пуска высоковольтных электродвигателей УППВЭ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cheaz.ru/products/ese/soft-starters/uppve.html> (дата обращения: 17.02.2023).
29. Устройство плавного пуска высоковольтных электродвигателей УПВД [Электронный ресурс]. URL: <https://pgp-perm.ru/products/power-equipment/the-soft-starter-of-high-voltage-motors-upvd.html> (дата обращения: 17.02.2023).
30. Высоковольтные устройства плавного пуска ABB SSM [Электронный ресурс]. URL: <https://abb-elektro.ru/prochaya-produktsiya/plpusk/vysokovoltnye-ustrojstva-plavnogo-puska-abb-ssm/> (дата обращения: 17.02.2023).

## References

1. Kornilov G.P., Shemetov A.N., Shokhin V.V., Usatyi D.Yu., Lygin M.M. Opyt vnedreniya energo i resursosberegayushchikh tekhnologii v sistemakh elektrosnabzheniya metallurgicheskogo predpriyatiya [Experience in the Implementation of Energy and Resource-Saving Technologies in Power Supply Systems of a Metallurgical Enterprise]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudar-*



- stvennogo universiteta. Seriya: Energetika — Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2022, Vol. 22, No. 1, pp. 12-20. [in Russian].
2. Dadabaev Sh.T., Gracheva E.I. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya sistemy plavnogo puska dlya vysokovol'tnykh elektrodvigatelei nasosnykh agregatov [Feasibility Study for the Use of a Soft Start System for High-Voltage Electric Motors of Pumping Units]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — Izvestia of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2022, Vol. 24, No. 1, pp. 141-150. [in Russian].
  3. Savel'ev V.A., Strakhov A.S., Novoselov E.M., Polkoshnikov D.A., Skorobogatov A.A. Metod kontrolya sostoyaniya obmotok rotorov vysokovol'tnykh elektrodvigatelei sobstvennykh nuzhd elektrostantsii pri puske [Method for Monitoring the State of the Rotor Windings of High-Voltage Electric Motors for Auxiliary Needs of Power Plants at Start-Up]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta — Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, 2019, No. 4, pp. 31-44. [in Russian].
  4. Bugrezov A.B., Proskuryakov D.V., Kryukov O.V. Issledovanie uslovii ekspluatatsii privodnykh elektrodvigatelei gazoperekachivayushchikh agregatov [Study of the Operating Conditions of Drive Electric Motors of Gas Pumping Units]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont — Electrical Equipment: Operation and Repair*, 2021, No. 10, pp. 9-21. [in Russian].
  5. Khakim'yanov M.I., Guzev B.V. Analiz ispol'zovaniya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda v neftegazovoi promyshlennosti po rezul'tatam patentnogo poiska [The Analysis of Use of the Variable-Frequency Drives in the Oil and Gas Industry by Results of Patent Search]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2011, No. 4, pp. 30-41. [in Russian].
  6. Omel'chenko E.Ya., Lyumar' A.B., Tanich V.O., Petushkov M.Yu. Snizhenie puskovykh tokov i momentov asinkhronnogo korotkozamknutogo dvigatelya za schet posledovatel'nosti faznykh napryazhenii [Reduction of Starting Currents and Moments of an Asynchronous Squirrel-Cage Motor due to the Sequence of Phase Voltages]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrical Systems and Complexes*, 2020, No. 2 (47), pp. 47-54. [in Russian].
  7. Livadaru L., Simion A., Munteanu A., Cojan M., Dabija O. Dual Cage High Power Induction Motor with Direct Start-up. Design and FEM Analysis. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2013, Vol. 13, No. 2, pp. 55-59.
  8. Chen H., Bi C. Optimal Starting Frequency of Three-Phase Induction Motor. *IET Electric Power Applications*, 2022, Vol. 16, No. 3, pp. 362-369.
  9. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Analiz voln davleniya pri chastotno-reguliruemom elektroprivode magistral'nykh nasosov na nefteperekachivayushchei stantsii [Analysis of Pressure Waves under Electric Power Transmission Pump Variable Frequency at Pumping Stations]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2011, Issue 3 (85), pp. 111-117. [in Russian].
  10. Fayziyev P.R., Ikromov I.A., Abduraximov A.A., Dehqonov Q.M. Organization of Technological Processes for Maintenance and Repair of Electric Vehicles. *International Journal of Advance Scientific Research*, 2022, Vol. 2, No. 03, pp. 37-41.
  11. Deraz S.A., Azazi H.Z. Current Limiting Soft Starter for Three Phase Induction Motor Drive System Using PWM AC Chopper. *IET Power Electronics*, 2017, Vol. 10, No. 11, pp. 1298-1306.
  12. Zenginobuz G., Cadirci I., Ermis M., Barlak C. Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current with Minimized Starting Torque Pulsations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, Vol. 37, No. 5, pp. 1334-1347.
  13. Abramov B.I., Datskovskii L.Kh., Kuz'min I.K., Pridatkov A.G., Limorenko P.M. Ustroystva plavnogo puska v elektroprivodakh gornykh mekhanizmov [Soft Starters in Electric Drives of Mining Mechanisms]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2014, No. 1, pp. 19-27. [in Russian].
  14. Dadabaev Sh.T. Issledovanie effektivnosti puska vysokovol'tnykh sinkhronnykh elektrodvigatelei pri pomoshchi invertora toka [Investigation of the Efficiency of Starting High-Voltage Synchronous Electric Motors Using a Current Inverter]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya of the Tula State University. Technical Sciences*, 2018, No. 10, pp. 618-621. [in Russian].
  15. Palkin A.F., Lyubimov E.V. Issledovanie sposobov puska asinkhronnogo elektrodvigateleya v usloviyakh ego vliyaniya na posadku napryazheniya v seti elektrosnabzheniya sobstvennykh nuzhd GRES [Investigation of Methods for Starting an Asynchronous Electric Motor under the Conditions of Its Influence on the Voltage Drop in the Power Supply Network for Auxiliary Needs of the State District Power Plant] *Sovremennye naukoemkie tekhnologii — Modern Science-Intensive Technologies*, 2016, No. 12-1, pp. 51-56. [in Russian].
  16. Kashirskikh V.G., Pereverzev S.S. Sravnitel'nyi analiz sposobov plavnogo puska asinkhronnykh elektroprivodov gornykh mashin [Com-

parative Analysis of Soft Start Methods for Asynchronous Electric Drives of Mining Machines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) — Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2005, No. 10, pp. 308-311. [in Russian].

17. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Kononov Yu.V. Vybora sposoba puska sinkhronnogo dvigatelya ispol'zuemogo v kachestve potrebitelya regul'yatora [Selection of Starting Synchronous Motor Used as Consumer Regulator]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2012, No. 6, pp. 1-9. [in Russian].

18. Rivkin G.A. *Preobrazovatel'nye ustroystva* [Converting Devices]. Moscow, Energiya Publ., 1970, pp. 158-197. [in Russian].

19. Maslov I.P., Semykina I.Yu. Matematicheskoe modelirovaniye razlichnykh sposobov puska ventilyatora mestnogo provetrivaniya s elektricheskim privodom [Mathematical Modeling of Various Methods of Starting a Local Ventilation Fan with an Electric Drive]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti — Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry*, 2014, No. 2, pp. 67-73. [in Russian].

20. Pereverzev S.S. Primeneniye kvazichastotnogo upravleniya dlya puska asinkhronnogo elektrodvigateleya [Application of Quasi-Frequency Control for Start-Up of Asynchronous Electric Motor]. *Trudy I Vserossiiskoi nauchno-tekhni-cheskoi konferentsii «Sovremennyye puti razvitiya mashinostroeniya i avtotransporta Kuzbassa»* [Proceedings of the I All-Russian Scientific and Technical Conference «Modern Ways of Developing Mechanical Engineering and Motor Transport in Kuzbass»]. 2007, pp. 361-365. [in Russian].

21. Baskov S.N., Kon'kov A.S. Kombinirovannyi sposob puska asinkhronnykh dvigateley [Combined Method of Starting Asynchronous Motors]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika — News of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2011, No. 4, pp. 74-77. [in Russian].

22. Krivoruchko N.A. Preimushchestva i nedostatki asinkhronnogo puska sinkhronnogo dvigatelya s ispol'zovaniem reaktora [Advantages and Disadvantages of Asynchronous Start of a Synchronous Motor Using a Reactor]. *Vestnik nauki — Herald of Science*, 2022, Vol. 3, No. 6 (51), pp. 221-225. [in Russian].

23. Butorin G.V., Klyuchnikov A.T., Chabanov E.A. Issledovaniye rezhimov puska sinkhronnogo dvigatelya pri ponizhennoi chastote [Investigation of the Modes of Starting a Synchronous Motor at a Reduced Frequency]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya — Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, Information Technologies, Control Systems*, 2019, No. 31, pp. 159-176. [in Russian].

24. Markov A.S., Sinyukova T.V. Issledovaniye sistem zapuska sinkhronnogo dvigatelya [Investigation of Synchronous Motor Starting Systems]. *Nauka. Issledovaniya. Praktika — Science. Research. Practice*, 2020, pp. 148-151. [in Russian].

25. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Plotnikov I.G., Turyshcheva A.V. Issledovaniye puskovykh rezhimov sinkhronnykh privodov neftegazodobyvayushchikh predpriyatii [Study of Starting Modes of Synchronous Drives of Oil and Gas Producing Enterprises]. *Zapiski Gornogo instituta — Notes of the Mining Institute*, 2012, Vol. 196, pp. 218-221. [in Russian].

26. Peng H. Research on Intelligent Control System of High Power Soft Starter Based on Discrete Frequency Conversion Technology. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2021, Vol. 1744, No. 2, pp. 022006.

27. Timoshkin V.V., Popov S.S. Study of Electric Drive with Thyristor Voltage Regulator. *Yugra State University Bulletin*, 2022, Vol. 18, No. 3, pp. 99-106.

28. *Ustroystvo plavnogo puska vysokovol'tnykh elektrodvigateley UPPVE* [Soft Starter for High-Voltage Electric Motors UPPVE]. [Electronic Resource]. URL: <https://www.cheaz.ru/products/ese/soft-starters/uppve.html> (accessed 17.02.2023). [in Russian].

29. *Ustroystvo plavnogo puska vysokovol'tnykh elektrodvigateley UPVD* [Soft Starter for High-Voltage Electric Motors UPVD]. [Electronic Resource]. URL: <https://pgp-perm.ru/products/power-equipment/the-soft-starter-of-high-voltage-motors-upvd.html> (accessed 17.02.2023). [in Russian].

30. *Vysokovol'tnyye ustroystva plavnogo puska ABB SSM* [ABB SSM High Voltage Soft Starters]. [Electronic Resource]. URL: <https://abb-elektro.ru/prochaya-produktsiya/plpusk/vysokovol'tnyye-ustrojstva-plavnogo-puska-abb-ssm/> (accessed 17.02.2023). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 13.01.2023; одобрена после рецензирования 02.02.2023; принята к публикации 16.02.2023.

The article was submitted 13.01.2023; approved after reviewing 02.02.2023; accepted for publication 16.02.2023.

Научная статья

УДК 621.313.13; 621.314.571.00.24

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-106-116

## ДВУСПИРАЛЬНЫЙ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ



**Ильгиз Флюсович Янгиров**

**Ilgiz F. Yangirov**

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



**Андрей Владимирович Лобанов**

**Andrey V. Lobanov**

кандидат 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 электронной инженерии,  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

### Актуальность

В настоящее время в науке и технике актуальными являются вопросы создания оригинальной конструкции высокоэффективного взрывомагнитного (магнитокумулятивного) генератора, разработки его математической модели и проведение экспериментальных исследований в данном направлении.

### Цель исследования

Рассмотреть возможность построения новых устройств воспламенения топлива летательных аппаратов на базе двуспирального магнитокумулятивного генератора, решить задачу подтверждения его преимуществ относительно известных и апробированных на практике способов путем создания математической модели.

**Методы исследования.** Литературный обзор и патентная проработка, получение математической модели с экспериментальными исследованиями на натуральных образцах в реальных эксплуатационных условиях. В ходе выполнения работы использованы методы теории электрических цепей, магнитного поля, элементы математи-

### Ключевые слова

лайнер, двуспиральный соленоид, биение, емкостная связь, колебательный процесс

ческого анализа и теория электрических колебательных процессов (биения, резонанса и т.д.) в сложных контурах.

#### Результаты исследования

В результате получено соотношение, определяющее максимальное значение частоты биений между двумя электрическими контурами, связанными слабой емкостной связью, дающие возможность проведения расчетов, необходимых при создании магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ-излучением и при его регулировании. Таким образом, приведенная в статье математическая модель магнитокумулятивного генератора основана на принципиально новом сочетании применения законов электродинамики и теории электрических колебательных процессов. На базе указанной модели разработаны предложения по использованию предложенной конструкции с оригинальным схемным решением.

Результаты работы могут найти применение в системе воспламенения летательных аппаратов на высоте более 20 км, что является мировой проблемой, а также для повышения эффективности работы шунтирующего реактора, установки для борьбы с гололедом, машиностроении, медицине, военной технике, радиофизике и т.д.

**Для цитирования:** Янгиров И. Ф., Лобанов А. В., Халиков А. Р. Двухспиральный магнитокумулятивный источник сверхсильных магнитных полей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 106-116. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-106-116>.

Original article

## DOUBLE-SPIRAL MAGNETIC-CUMULATIVE SOURCE OF SUPER STRONG MAGNETIC FIELDS

#### The relevance

At present, the issues of creating an original design of a highly efficient explosive magnetic (magnetocumulative) generator, developing its mathematical model and conducting experimental research in this direction are topical in science and technology.

#### Aim of research

Consider the possibility of building new aircraft fuel ignition devices based on a double-helix magnetic-cumulative generator, solving the problem of confirming its advantages over known and proven methods by creating a mathematical model.

#### Research methods

Literature review and patent study, obtaining a mathematical model with experimental studies on full-scale samples in real operating conditions. In the course of the work, methods of the theory of electrical circuits, magnetic field, elements of mathematical analysis and the theory of electrical oscillatory processes (beats, resonance, etc.) in complex circuits were used.

#### Results

As a result, a relation was obtained that determines the maximum value of the beat frequency between two electrical circuits connected by a weak capacitive coupling, which makes it possible to carry out the calculations necessary when creating a magnetocumulative generator with high microwave radiation and during its regulation. Thus, the mathematical model of a magnetocumulative generator presented in the article is based

#### Ключевые слова

liner, double helix solenoid, beat, capacitive coupling, oscillatory process

on a fundamentally new combination of the application of the laws of electrodynamics and the theory of electrical oscillatory processes. On the basis of this model, proposals have been developed for using the proposed design with the original circuit design.

The results of the work can be used in the ignition system of aircraft at an altitude of more than 20 km, which is a world problem, as well as to improve the efficiency of a shunt reactor, an installation for de-icing, mechanical engineering, medicine, military equipment, radio physics, etc.

**For citation:** Yangirov I. F., Lobanov A. V., Khalikov A. R. Dvusprial'nyi magnitokumulyativnyi istochnik sverkhsil'nykh magnitnykh polei [Double-Spiral Magnetic-Cumulative Source of Super Strong Magnetic Fields]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 106-116 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-106-116>.

## Введение

Принципы построения систем зажигания основаны на различных способах воспламенения горючей смеси. Наиболее перспективной считается электродуговая (или плазменная) система, суть которой заключается в использовании разряда в виде плазменной струи. Использование плазменной струи — практически единственное средство нагрева до температуры в десятки тысяч градусов без каких-либо существенных ограничений по мощности разряда, роду газа и давлению [1–5].

Одним из существенных различий отечественных и зарубежных емкостных систем зажигания (ЕСЗ) является то, что в отечественных системах предпочтение отдается колебательному разряду, зарубежные ЕСЗ выполняются как с колебательным, так и с апериодическим разрядом, причем апериодический разряд получил большее распространение [2].

Основными недостатками при использовании плазменных систем зажигания являются необходимость применения мощных источников питания, обладающих значительными массами и габаритами, а также сравнительно низкий ресурс плазменных свечей (плазматронов).

Однако наука и техника развиваются и появляются новые системы с новыми

возможностями, новыми техническими характеристиками и габаритными показателями.

В настоящее время в науке и технике актуальными являются вопрос создания оригинальной конструкции высокоэффективного взрывоманитного (магнитокумулятивного) генератора, разработки его математической модели и проведение экспериментальных исследований в данном направлении.

В статьях [6–8] предлагается оригинальная конструкция взрывоманитного генератора и разработана математическая модель, принципиально отличающаяся от ранее созданной и практически рекомендованной.

Основными элементами указанного генератора являются соленоиды 2 и металлический тонкостенный полый конус (лайнер) 1 с зарядом взрывчатого вещества (рисунок 1). Лайнер представляет собой цилиндрическую или коническую трубу, изготовленную из высокопластичного сплава алюминия или меди. Толщина лайнера рассчитывается из условия обеспечения заданной скорости и угла приближения 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, при этом 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 исследованию физических процессов, протекающих в спиральном генераторе, работающем на емкостную нагрузку. Конструктивно конденсатор может быть выполнен в виде одного элемента или представляет собой конденсаторную батарею.

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

Изменение индуктивности определяется шагом намотки соленоида вдоль его оси, углом и скоростью приближения поверхности лайнера к образующей соленоида.

На характер функций тока от времени существенно сказывается суммарное активное сопротивление магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой. В работе [6] была теоретически и экспериментально показана возможность формирования сверхвысокочастотного радиоизлучения при функционировании спирального магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой. При этом, как было показано, интенсивность и спектральные характеристики радиочастотного излучения также существенно зависят от функции изменения индуктивности соленоида [9].

*Математическое моделирование.* При разработке приведенной в статье математической модели использованы ранние работы [7] по спиральным преобразователям.

При проведении теоретических исследований — решении поставленной задачи и анализе полученных результатов — были использованы методы теории электрических цепей, магнитного поля, методы математического анализа

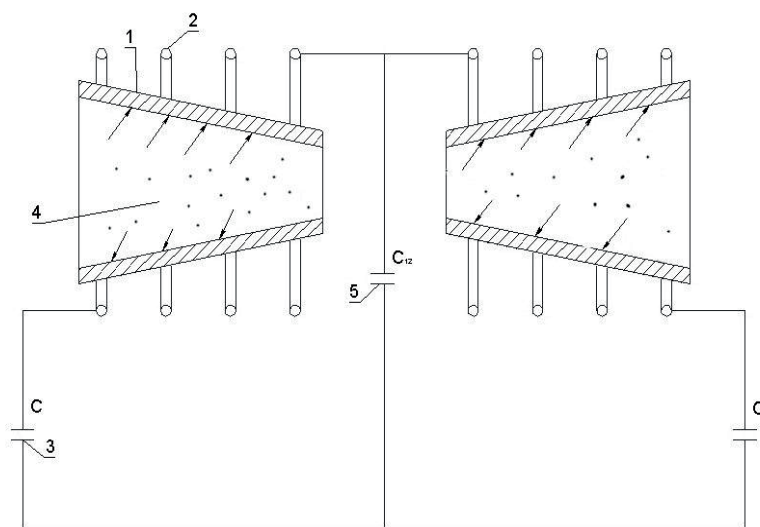


Рисунок 1. Схема магнитокумулятивного генератора (ЭМКГ)

Figure 1. Scheme of a generator (EMCG)

и теория электрических колебательных процессов (биения, индукция и т.д.) в связанных контурах [7].

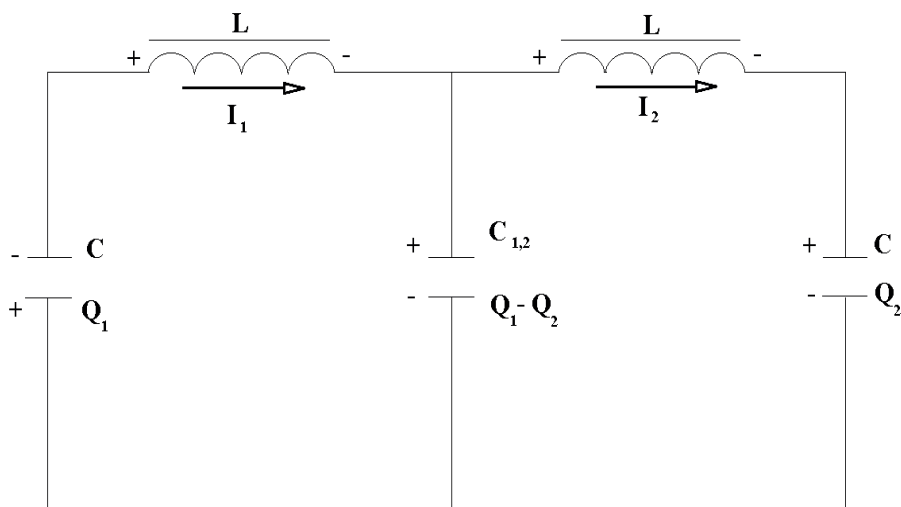
Колебательные процессы, протекающие в отдельных частях сложных систем, как правило, взаимосвязаны. В связи с этим представляет интерес генерация колебательных процессов в этих системах на достаточно простом и наглядном примере. В качестве такого примера рассматривается колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой емкостной связью  $C_{12}$ , одинаковыми емкостями  $C$  ( $Cm \ll C_{12}$ ) и индуктивностями  $L$  (рисунок 2). Аналогом этого процесса является колебательный процесс в механической системе, состоящей из двух математических маятников одинаковой длины, связанных пружиной с небольшим коэффициентом жесткости [7].

В соответствии со 2-м законом Кирхгофа для 1-го и 2-го электрических контуров справедливы соотношения [10]:

$$L \frac{dI_1}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0 \quad (1)$$

и

$$L \frac{dI_2}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0. \quad (2)$$



**Рисунок 2.** Схема замещения генератора (ЭМКГ), состоящего из двух контуров: 1-го (в левой части рисунка) и 2-го (в правой)

**Figure 2.** Generator equivalent circuit (EMCG), consisting of two circuits: 1st (on the left side of the figure) and 2nd (on the right)

Поскольку  $I_1 = \frac{dQ_1}{dt}$  и  $I_2 = \frac{dQ_2}{dt}$ , уравнения (1) и (2) можно представить в виде:

$$L \frac{d^2 Q_1}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}; \quad (3)$$

$$L \frac{d^2 Q_2}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}. \quad (4)$$

После преобразования в соответствии с [7] уравнения (3) и (4) приобретают вид:

$$L \frac{d^2 (Q_1 + Q_2)}{dt^2} = -\frac{Q_1 + Q_2}{C_{12}}; \quad (5)$$

$$L \frac{d^2 (Q_1 - Q_2)}{dt^2} = -\left(\frac{1}{C} + \frac{2}{C_{12}}\right)(Q_1 - Q_2). \quad (6)$$

Результатом решения уравнений (5) и (6) являются выражения [2]:

$$Q_1 + Q_2 = (Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t \quad (7)$$

и

$$Q_1 - Q_2 = (Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t, \quad (8)$$

где  $Q_{10}$  и  $Q_{20}$  — заряды для  $t=0$  на емкостях 1-го и 2-го контуров соответственно.

Частота  $\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  соответствует частоте свободных электрических колебаний в контуре, состоящем из емкости  $C$  и индуктивности  $L$ , причем

$$\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \omega^- = \sqrt{\frac{1}{LC} \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{C_{12}} \right)}$$

Анализ уравнений (7) и (8) показывает, что как сумма  $Q_1 + Q_2$ , так и разность  $Q_1 - Q_2$  зарядов на емкостях 1-го и 2-го контуров изменяются во времени по закону косинуса с постоянными амплитудами  $Q_{10} + Q_{20}$  и  $Q_{10} - Q_{20}$  соответственно.

Арифметическое сложение и вычитание уравнений (7) и (8) позволяет установить характер изменения во времени зарядов на емкостях  $C_1$  и  $C_2$  1-го и 2-го контуров. При этом

$$Q_1 = \frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t + \frac{1}{2}(Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t; \quad (9)$$

и

$$Q_2 = \frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t + \frac{1}{2}(Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t. \quad (10)$$

Из уравнений (9) и (10) следует, что в случае равенства начальных зарядов  $Q_{10}$  и  $Q_{20}$  на емкостях 1-го и 2-го контуров текут одинаково направленные токи  $I_1$  и  $I_2$  с постоянной амплитудой  $\frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20})$  и угловой частотой  $\omega^+$ , и в обоих контурах происходят синфазные колебания величины заряда  $Q$ . Если же заряды  $Q_{10}$  и  $Q_{20}$  в начальный момент времени одинаковы по величине, но имеют противоположный знак, т.е.  $Q_{10} = -Q_{20}$ , то в 1-м и 2-м контурах происходят антифазные колебания величин зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$ , одинаковы по величине, но противоположны по знаку.

Как видно из вышесказанного, при синфазных и антифазных колебаниях амплитудные значения величин зарядов на емкостях  $C$  остаются постоянными, что соответствует нормальным модам колебаний системы связанных осцилляторов.

Произвольный колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой емкостной связью можно рассматривать как суперпозицию двух нормальных мод колебаний. Данное утверждение может быть рассмотрено для момента времени  $t = 0$ , когда заряд на емкости  $C$  во втором контуре равен нулю, т.е.  $Q_{20} = 0$ . Тогда колебания зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  на емкости  $C$  в 1-м и 2-м контурах, являющиеся нормальными модами колебаний, описываются уравнениями:

$$Q_1 = \frac{1}{2}Q_{10}(\cos \omega^+ t + \cos \omega^- t); \quad (11)$$

и

$$Q_2 = \frac{1}{2}Q_{10}(\cos \omega^+ t - \cos \omega^- t). \quad (12)$$

Преобразования правых частей уравнений (11) и (12) с помощью известных тригонометрических соотношений позволяют получить выражения:

$$Q_1 = Q_{10} \left[ \cos \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t \right] \times \cos \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \quad (13)$$

и

$$Q_2 = Q_{10} \left[ \sin \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t \right] \times \sin \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t, \quad (14)$$

описывающие периодические колебательные процессы, протекающие с угловой частотой  $\omega = \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)$  и быстро меняющейся во времени амплитудой, и известные как биения (рисунки 3) [2].

Возникновение биений в рассмотренном выше случае имеет следующую природу: четная мода колебаний зарядов на емкостях  $C$  в 1-м и 2-м контурах соответствует синфазным колебаниям с угловой частотой  $\omega^+$ . Емкость  $C_{12}$  при этом не заряжена и колебания зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  аналогичны свободным колебаниям зарядов на емкости в замкнутом электриче-



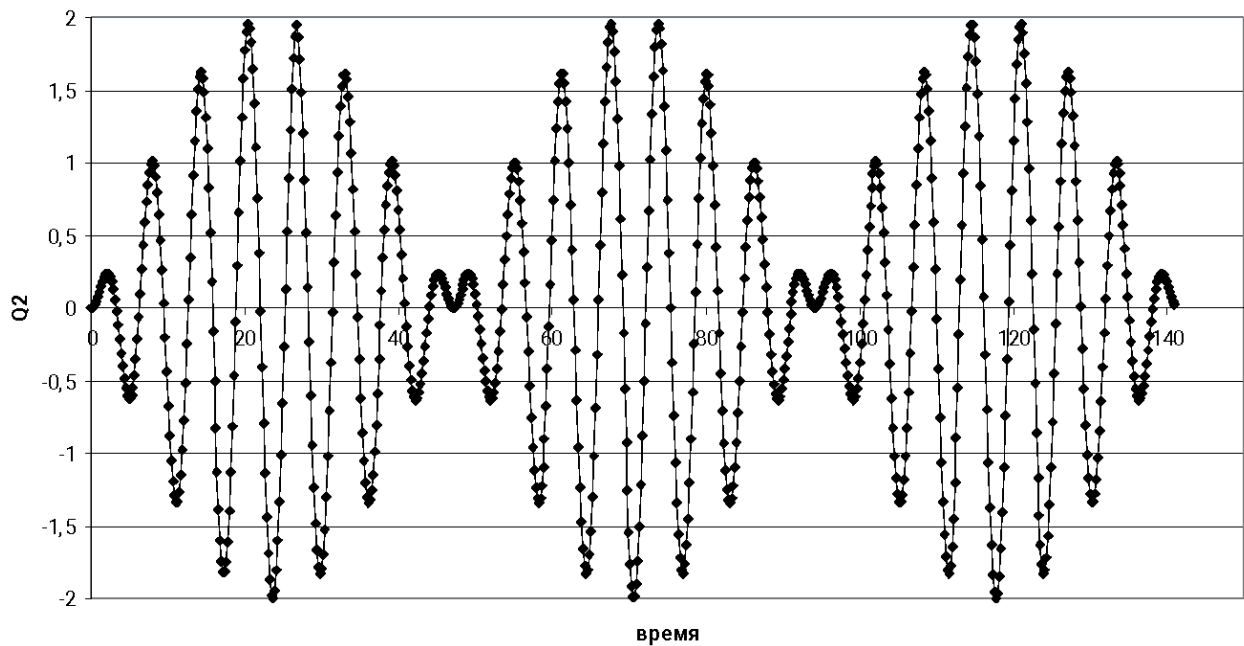


Рисунок 3. Осциллограмма выходного сигнала СВЧ

Figure 3. Oscillogram of the microwave output signal

ском контуре, состоящем на емкости  $C$  и индуктивности  $L$ . Нечетная мода колебаний зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  на емкостях  $C$  в 1-м и 2-м контурах соответствует антифазным колебаниям с частотой  $\omega^-$ , которая несколько больше частоты  $\omega^+$ , что объясняется заряденностью емкости  $C_{12}$  при антифазных колебаниях.

Наложение четной и нечетной мод колебаний есть фактически суперпозиция колебаний с близкими угловыми частотами, результатом чего являются биения.

В рассматриваемом случае, в силу того что в начальный момент времени  $t = 0$  емкость  $C$  во 2-м контуре не заряжена, синфазные и антифазные колебания происходят со сдвигом по фазе, равным  $\frac{\pi}{2}$ . Вследствие этого в тот момент времени, когда заряд на емкости  $C$  в 1-м контуре равен нулю, соответствующий заряд на емкости  $C$  во 2-м контуре максимален, и наоборот (рисунок 2).

С энергетической точки зрения колебательный процесс в двух электрических контурах, связанных слабой емкостной

связью, при условии, что в момент времени  $t = 0$  заряд на емкости  $C$  в правом контуре равен нулю, протекает следующим образом: первоначально вся энергия сосредоточена в 1-м контуре, затем в процессе колебаний происходит перекачка энергии из 1-го контура через емкость  $C_{12}$  во 2-й контур. После того как перекачка энергии завершена, начинается обратный процесс.

Период обмена энергией между 1-м и 2-м контурами может быть найден из формулы:

$$\frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t_{обм} = \pi, \quad (15)$$

откуда

$$t_{обм} = \frac{2\pi}{\omega^+ - \omega^-}. \quad (16)$$

Угловая частота обменного процесса, равная угловой частоте биений,

$$\omega_{обм} = \frac{2\pi}{t_{обм}} = \omega^+ - \omega^-. \quad (17)$$

Поскольку описанная выше математическая модель применима в случае слабой емкостной связи между электрическими контурами, то с учетом неравен-

ства  $\frac{C}{C_{12}} \ll 1$  можно записать через следующее выражение для частоты обменного процесса

$$\begin{aligned} \omega_{обм} &= \sqrt{\frac{1}{LC}} - \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{1}{C} + \frac{2}{LC_{12}} \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{2LC}{C_{12}} \right)} \right) = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{2C}{C_{12}} + \left( \frac{C}{C_{12}} \right)^2} \right) = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \frac{C}{C_{12}} = \frac{C}{C_{12}} \omega. \end{aligned} \quad (18)$$

Из уравнения (18) 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 связь. Таким образом, изменяя величины  $L$ ,  $C$  и  $C_{12}$  между двумя электрическими контурами, связанными слабой емкостной связью, можно добиться максимального значения частоты биений  $\omega_{обм} = \omega$ , что является важной практической задачей (в энергетике, электромеханике и т.д.) [11].

Схема подключения генераторов приведена на рисунке 4.

### Экспериментальная часть

На рисунке 5 приведены огибающие (сплошные линии) экспериментальных осциллограмм производных тока для двух вариантов исполнения спиральных магнитокумулятивных генераторов, 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 рисунке 4 в безразмерном виде.

Магнитокумулятивные генераторы 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 5, а) пробивалась в среднем при импульсном (время действия порядка микросекунды) напряжении 3,5 В. Фторопластовая изоляция в

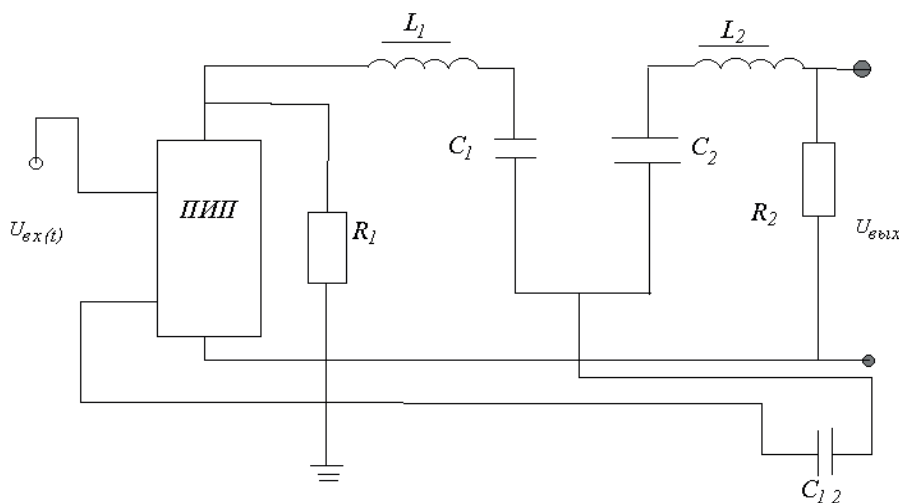


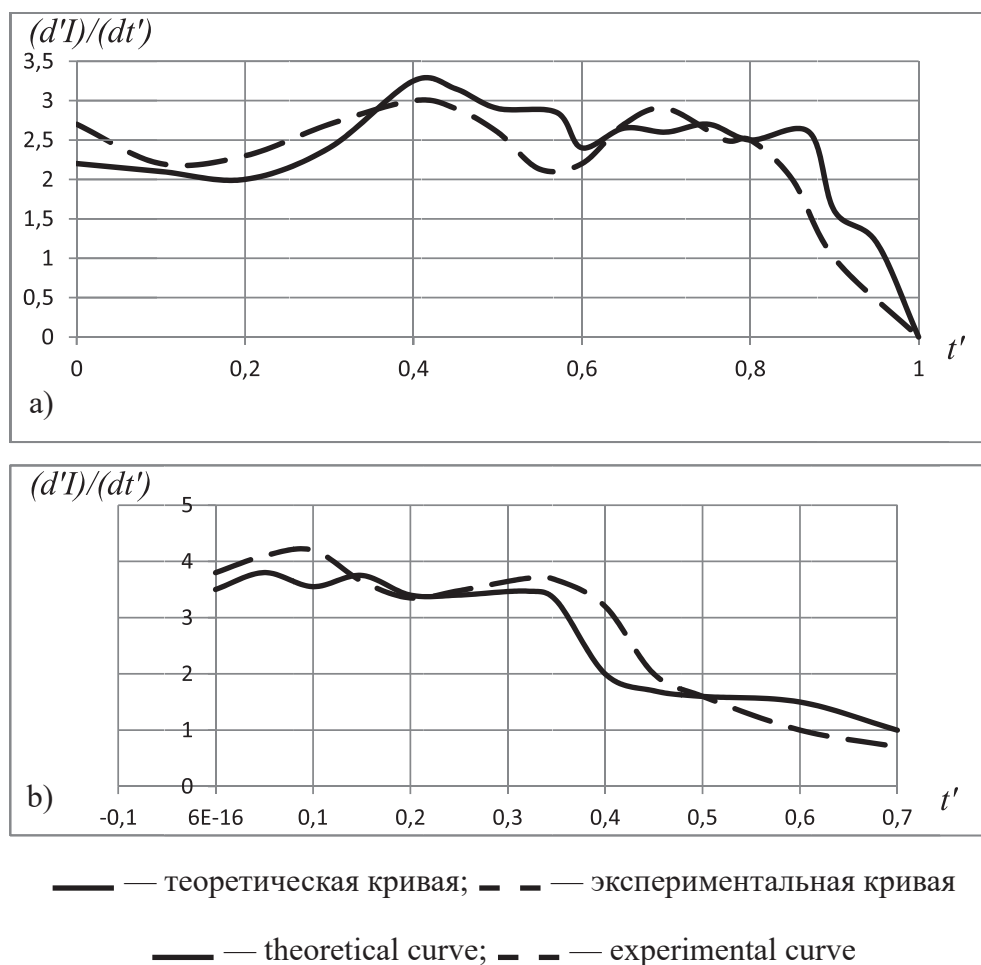
Рисунок 4. Электрическая схема подключения генераторов

Figure 4. Wiring diagram for generators

генераторе второго варианта (рисунок 5, *b*) пробивалась при импульсном напряжении 28 В. Начальный момент времени конденсатор генератора первого варианта был заряжен до напряжения на 16 В, а конденсатор генератора второго варианта — до напряжения 30 В. 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 качественно правильно 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 близкорасположенного 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 учитывающей наличие изоляции проводов соленоида, не может быть скомпенсирована введением эмпирических коэффициентов.



**Рисунок 5.** Зависимость амплитуды производной тока от времени для генератора первого и второго вариантов

**Figure 5.** Dependence of the amplitude of the current derivative on time for the generator of the first and second options

## Заключение

Разработана оригинальная конструкция магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ-излучением и с возможностью его регулирования. Создана математическая модель данной конструкции, которая на основе принципиально новых концептуальных подходов, позволяет вывести аналитические зависимости, в соответствии с которыми, корректируя определенные параметры генератора, можно получить максимальное значение частоты биений  $\omega_{обм} = \omega$ , соответствующее частоте СВЧ-излучения.

Данная разработка [12] является оригинальной, которая может найти применение в авиастроении, космической технике, машиностроении для обработки материалов СВЧ-излучением, в дефектоскопии при обнаружения микродефектов, в геофизике при разведке месторождений полезных ископаемых, в медицине при локализации онкологических новообразований, а также в оборудовании спутниковой связи, радиолокации,

микроволновой обработки пищевых продуктов, магнетронного напыления и при проведении научных исследований (например исследования космического пространства) и т.д.

## Выводы

1. Новый способ недостаточно пока изучен, поэтому требует многократных натуральных испытаний с уже эмпирическими описаниями, с возможностью их инженерного применения, с выводами для уточненной инструкции использования.

2. Возможно, еще есть неизученные технические и технологические возможности для использования в наземных объектах.

3. Авторы планируют усилить технические возможности предлагаемого устройства за счет использования параллельного высоковольтного источника напряжения на базе магнитокумулятивного генератора типа ВМГ-80.

## Список источников

1. Лобанов А.В., Кiekбаева Г.Ф. Плазменная система зажигания для наземных ГТХ. Уфа: УГАТУ, 2014. 211 с.
2. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Каримова А.Г., Салихова А.Р. Схемы построения емкостных систем зажигания аperiодического разряда и задачи их совершенствования. Уфа: УГАТУ, 2014. С. 131-136.
3. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с.
4. Пат. 59159 РФ, МПК F 02 P 3/06. Комбинированная система зажигания / Гизатуллин Ф.А., Лобанов А.В. 2008108637/22, Заявлено 05.03.2006; Оpubл. 10.12.2006. Бюл. 34.
5. Кукса Н.Н., Птах Г.К. Системы зажигания высокой энергии // Известия вузов. Электромеханика. 2004. № 1. С. 42-44.
6. Янгиров И.Ф. Датчик перемещений и ускорений // Изобретатели машиностроению. 2002. № 1. С. 1-8.
7. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Электромеханический преобразователь со спиральной вторичной системой. Электротехника. 1997. № 4. С. 40-43.

8. Схема измерения электрических параметров [Электронный ресурс]. URL: [www.avkenargo.ru/](http://www.avkenargo.ru/) (дата обращения 13.01.2011).
9. Третьяков Д.В. Влияние изоляции проводов спирального магнитокумулятивного генератора на его функционирование. Электричество. 2001. № 6. С. 49-55.
10. Попов В.П. Основы теорий цепей. М.: Высшая школа, 1985. 495 с.
11. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом. М.: Электротехника, 1994. № 9. С. 12-14.
12. Пат. 1157383 РФ, МПК H 02 N 11/00. Электромеханический магнитокумулятивный генератор / Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Волкова Т.А. 2015112705/07, Заявлено 07.04.2015; Оpubл. 27.11.2015. Бюл. 33.

## References

1. Lobanov A.V., Kiekbaeva G.F. *Plazmennaya sistema zazhiganiya dlya nazemnykh GTKh* [Plasma Ignition System for Ground GTX]. Ufa, USATU, 2014. 211 p. [in Russian].

2. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Karimova A.G., Salikhova A.R. *Skhemy postroeniya emkostnykh sistem zazhiganiya aperiodicheskogo razryada i zadachi ikh sovershenstvovaniya* [Schemes for the Construction of Capacious Ignition Systems of Aperiodic Discharge and the Tasks of Their Improvement]. Ufa, USATU, 2014, pp. 131-136. [in Russian].
3. Gizatullin F.A. *Emkostnye sistemy zazhiganiya* [Capacitive Ignition Systems]. Ufa, USATU, 2002. 249 p. [in Russian].
4. Gizatullin F.A., Lobanov A.V. *Kombinirovannaya sistema zazhiganiya* [Combined Ignition System]. Patent RF, No. 59159, 2006. [in Russian].
5. Kuksa N.N., Ptakh G.K. *Sistemy zazhiganiya vysokoi energii* [High-Energy Ignition Systems]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika — Izvestiya vuzov. Electromechanics*, 2004, No. 1, pp. 42-44. [in Russian].
6. Yangirov I.F. *Datchik peremeshchenii i uskorenii* [Displacement and Acceleration Sensor]. *Izobretateli mashinostroeniya — Inventors for Mechanical Engineering*, 2002, No. 1, pp. 1-8. [in Russian].
7. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F. *Elektromekhanicheskii preobrazovatel' so spiral'noi vtorichnoi sistemoi* [Electromechanical Converter with Spiral Secondary System]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 1997, No. 4, pp. 40-43. [in Russian].
8. *Skhema izmereniya elektricheskikh parametrov* [Electrical Parameters Measurement Scheme] [Electronic Resource]. URL: [www.avkenergo.ru/](http://www.avkenergo.ru/) (data obrashcheniya 13.01.2011). [in Russian].
9. Tret'yakov D.V. *Vliyanie izolyatsii provodov spiral'nogo magnitokumulyativnogo generatora na ego funktsionirovanie* [Influence of Insulation of Wires of a Spiral Magneto-Accumulative Generator on Its Functioning]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2001, No. 6, pp. 49-55. [in Russian].
10. Popov V.P. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of Circuit Theories]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 495 p. [in Russian].
11. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F. *Vibratsionnyi elektrodvigatel' so spiral'nym vtorichnym elementom* [Vibrating Electric Motor with a Spiral Secondary Element]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 1994, No. 9, pp. 12-14. [in Russian].
12. Ismagilov F.R., Khairullin I.Kh., Yangirov I.F., Maksudov D.V., Volkova T.A. *Elektromekhanicheskii magnitokumulyativnyi generator* [Electromechanical Magnetic Accumulative Generator]. Patent RF, No. 1157383, 2015. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 05.12.2022; одобрена после рецензирования 10.01.2023; принята к публикации 17.01.2023.*

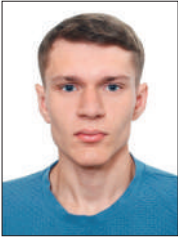
*The article was submitted 05.12.2022; approved after reviewing 10.01.2023; accepted for publication 17.01.2023.*

Обзорная статья

УДК 504.062, 620.92, 620.93

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-117-124

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



**Богдан Алексеевич Соловьев**

**Bogdan A. Solov'ev**

магистрант, инженер кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Андрей Сергеевич Бодылев**

**Andrey S. Bodylev**

аспирант, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Александр Дмитриевич Павлов**

**Alexander D. Pavlov**

учащийся,

МБОУ «Инженерный лицей № 83 имени Пинского М.С. УГНТУ»,  
Уфа, Россия



**Ильгиза Далховна Каекбирдина**

**Ilgiza D. Kaekbirdina**

магистрант, инженер-исследователь кафедры

«Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

Вопрос производства электроэнергии всегда занимает наиболее актуальную позицию в вопросе мироздания и формирования жизненного цикла человечества. На сегодняшний день известен целый ряд альтернативных источников энергии, являющихся экологически чистыми и находящимися в тренде развития современного общества. Наибольшее распространение на сегодняшний день получили источники энергии, работающие от энергии Солнца и ветра. Геотермальная же энергетика на сегодня не успела войти так плотно в мир электроэнергетики, но при этом имеет высокий потенциал, а также большой

### Ключевые слова

геотермальные источники энергии, геотермальная энергетика, геотермальная электростанция, теплоноситель

показатель запаса энергии, хранящегося в недрах Земли. Именно данный источник энергии предлагается изучить в статье, а также рассмотреть перспективы развития в самое ближайшее время.

#### **Цель исследования**

Проанализировать состояние геотермальной энергетики в Российской Федерации, изучить крупнейшие электростанции, работа которых основана на получении электроэнергии из геотермальных источников, оценить перспективы будущего развития изучаемой области.

#### **Методы исследования**

В рамках исследования был проведен анализ существующих моделей работы геотермальных электростанций, а также сформирован аналитический обзор перспективных регионов.

#### **Результаты**

По итогам исследования были проанализированы существующие типы электростанций, принцип работы которых основан на получении электроэнергии из геотермальных источников, а также проведен анализ наиболее перспективных регионов для наращивания мощности электростанций.

**Для цитирования:** Соловьев Б. А., Бодылев А. С., Павлов А. Д., Каекбирдина И. Д. Анализ перспектив развития геотермальной энергетики // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 117-124. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-117-124>.

Original article

## **ANALYSIS OF GEOTHERMAL POWER ENGINEERING AND DEVELOPMENT PROSPECTS**

#### **The relevance**

The issue of electricity generation always occupies the most relevant position in the issue of the universe and the formation of the life cycle of mankind. To date, a number of alternative energy sources are known that are environmentally friendly and are in the trend of the development of modern society. The most widely used energy sources today are those powered by solar and wind energy. Geothermal engineering, on the other hand, has not yet entered the world of electric power industry so tightly, but at the same time it has a high potential, as well as a large indicator of the energy reserve stored in the bowels of the Earth. It is this source of energy that is proposed to be studied in the article, as well as to consider development prospects in the very near future.

#### **Aim of research**

To analyze the state of geothermal engineering in the Russian Federation, to study the largest power plants, the operation of which is based on obtaining electricity from geothermal sources, to assess the prospects for the future development of the study area.

#### **Research methods**

As part of the study, an analysis was made of existing models of operation of geothermal power plants, and an analytical review of promising regions was formed.

#### **Results**

Based on the results of the study, the existing types of power plants were analyzed, the principle of operation of which is based on obtaining electricity from geothermal sources, and an analysis was made of the most promising regions for increasing the capacity of power plants.

#### **Ключевые слова**

geothermal energy sources, geothermal engineering, geothermal power plant, coolant

**For citation:** Solovev B. A., Bodylev A. S., Pavlov A. D., Kaekbirdina I. D. Analiz perspektiv razvitiya geotermal'noi energetiki [Analysis of Geothermal Power Engineering and Development Prospects]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 117-124 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-117-124>.

## Введение

Геотермальной энергией является энергия, генерируемая из природного тепла Земли, добраться до этого тепла позволяют скважины, температура в которых растет каждые 36 м глубины на 1 °С. На поверхность данная теплота доставляется в виде горячей воды и пара.

На Земле запасы тепла велики. Так, если рассматривать остывания одного лишь ядра, не включая мантию и кору, то при снижении температуры на 1 °С мы получаем порядка  $2 \cdot 10^{20}$  кВт·ч энергии, температура же ядра доходит до показателя в 6000 °С, а остывания за миллиард лет по предварительным оценкам исчисляется в пределах 400 °С [1].

Особое распространение геотермальные источники получили в ряде различных стран: Исландия, Индонезия, Мексика, Новая Зеландия, Франция, Коста-Рика, Кения, Япония и Филиппины [2, 3].

## Классификация

Классификация геотермальных источников энергии [4] происходит по нескольким направлениям:

- по способу извлечения теплоносителя:
  - традиционные;
  - фонтанные (в случае высокого давления из недр Земли происходит самоизлив теплоносителя);
  - насосные (в случае недостаточного давления для самоизлива/фонтанирования);
  - геоциркуляционные (в случае закачки под землю охлажденного теплоносителя);

- по типу используемых ресурсов:
  - гидротермальные (в случае использования теплоты естественных геотермальных вод);
  - петротермальные (в случае использования теплоты горных пород).

На сегодняшний день можно выделить три основные схемы производства электрической энергии на основе гидротермальных источников:

1. Прямая с использованием сухого пара. Работают в основном на гидротермальном пару (рисунок 1), который поступает в турбину, питающую генератор. Одним из преимуществ является отказ от сжигания топлива;
2. Непрямая с использованием водяного пара (рисунок 2);
3. Смешанная схема (бинарный цикл). В данном случае зачастую используются перегретые гидротермы, температура которых превышает 182 °С.

Принцип работы заключается в использовании гидротермального раствора в испарителе, куда он нагнетается и достаточно быстро выпаривается, полученный пар и приводит турбину в действие [5]. В случае, когда жидкость не испаряется полностью, ее можно использовать в следующем испарителе, тем самым увеличивая мощность. Помимо раствора в большинстве источников имеется вода с умеренной температурой (менее 200 °С), эта вода может быть использована для получения энергии на геотермальных электростанциях с бинарным циклом производства (рисунок 3). Данная вода с дополнительной жидкостью, имеющей более низкую точку кипения, пропускается через теплооб-



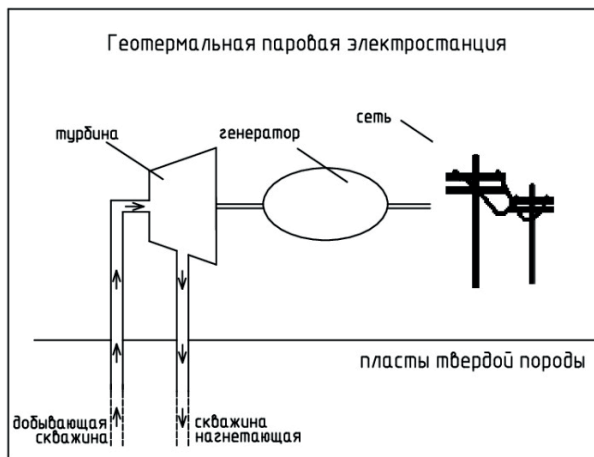
менник, вследствие этого дополнительная жидкость выпаривается геотермальной водой, и полученный пар оказывает воздействие на турбину. Данная система является закрытой, что сводит к минимуму воздействие на экологию в связи с отсутствием выбросов в атмосферу.

Геотермальная энергетика используется для получения электроэнергии и обогрева домов и производственных помещений [6]. Использование геотермального источника зависит от формы получаемой энергии, мы можем получать как «сухой пар», используемый для вра-

щения турбины, так и пар с водой, который необходимо отделить.

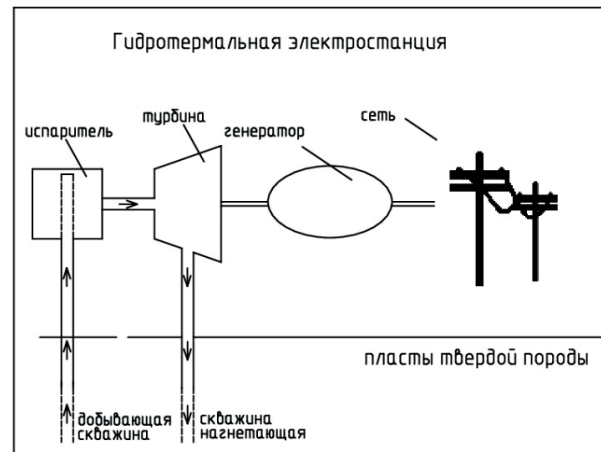
### Преимущества и недостатки геотермальных источников

Одним из главных достоинств геотермального источника следует выделить неиссякаемость и отсутствие зависимости от условий, сильно влияющих на сторонние альтернативные источники энергии, такие как время суток, года, погоды и окружающей среды [7]. Еще одной отличительной особенностью является возможность достижения показателя



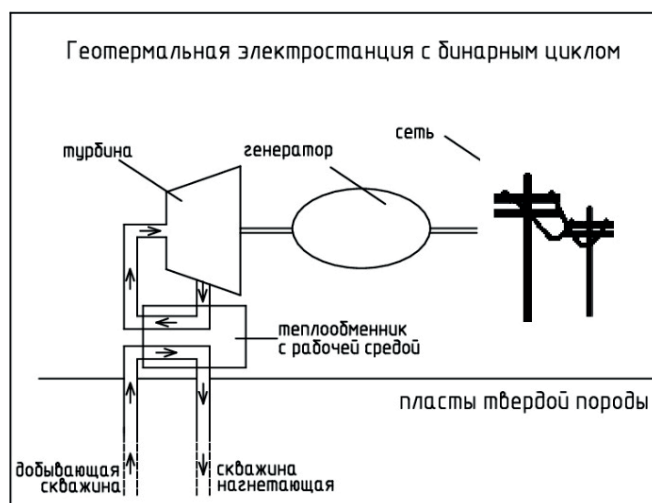
**Рисунок 1.** Геотермальная паровая электростанция

**Figure 1.** Geothermal steam power plant



**Рисунок 2.** Гидротермальная электростанция

**Figure 2.** Hydrothermal power plant



**Рисунок 3.** Геотермальная электростанция с бинарным циклом

**Figure 3.** Binary cycle geothermal power plant

коэффициента использования установленной мощности 80 %, чего не могут достичь остальные источники «зеленой» энергетики.

При этом использование геотермальных источников имеет ряд ключевых недостатков, связанных с экологическими и экономическими аспектами. С экологической стороны проблема заключается в необходимости создания возобновляемого цикла обратной закачки отработанный воды в подземный водоносный горизонт. Эти воды невозможно сбрасывать в природные водные системы, находящиеся на поверхности, в связи с высоким содержанием токсичных металлов (цинк, свинец), неметаллов (мышьяк, бор) и химических соединений (фенол, аммиак). В дополнение к этому стоит помнить о проблеме отложения солей и коррозии трубопроводов. С экономической точки зрения проблема заключается в необходимости поддержания температуры воды от 150 °С и выше для достаточного показателя КПД тепловой машины в области генерации электроэнергии [5]. Для отопления же температура необходима не ниже 50 °С, тем не менее, даже данного показателя достаточно тяжело добиться. Связано это с геотермическим градиентом, который растет на 30 °С при углублении на 1 км. Таким образом, рассматривая только отопление, необходима скважина глубиной более 1,5 км, для генерации электроэнергии — более нескольких километров. Глубинное бурение подобных скважин

экономически нецелесообразно, в связи с чем геотермальные электростанции пытаются располагать в районах с высоким геотермическим градиентом и близким расположением геотермальных вод к поверхности. Зачастую такими территориями являются области с повышенным вулканизмом.

### Геотермальные источники энергии в России

В настоящее время в Российской Федерации разведано более 65 геотермальных месторождений, на 30 % из них ведется промышленная эксплуатация (Карачаево-Черкесия и Ставропольский край, Дагестан, Краснодарский край, Камчатка и т.д.) [8].

Регион Камчатки стоит выделить отдельно, так как именно в нем процент вырабатываемой электроэнергии посредством геотермальных источников достигает 40 %. По оценкам геотермальные ресурсы Камчатки достигают 5000 МВт, в настоящий же момент используется не более 100 МВт установленной мощности и порядка 500 млн кВт·ч. Геотермальные электростанции России представлены в таблице 1.

### Перспективы использования геотермальных источников в России

Геотермальная энергетика будет занимать особое место в развитии энергетики в мире в ближайшие десятилетия. Это обусловлено доступностью в связи с использованием тепловых насосов, а

**Таблица 1.** Геотермальные электростанции Российской Федерации

**Table 1.** Geothermal power plants of the Russian Federation

Геотермальная электростанция	Установленная мощность, МВт	Выработка, кВт·ч/год
Мутновская ГеоЭС	50	362
Верхне-Мутновская ГеоЭС	12	69,5
Паужетская ГеоТЭС	14,5	44,3
Океанская ГеоТЭС	2,6	–
Менделеевская ГеоТЭС	7,4	–

также экономической эффективностью использования данного вида возобновляемых источников энергии. Например, в России в будущем использование ГеоЭС может составить 1/5 часть в общем балансе теплоснабжения.

Развитие геотермальной энергетики в РФ позволит открыть дополнительные возможности в обеспечении теплом и электричеством таких отдаленных от ЕЭС районов, как Камчатка и Курильские острова. В данных регионах имеющиеся ресурсы горячих подземных источников практически не используются, а теплоэлектроэнергию в основном дают дорогостоящие дизель-генераторы. Таким образом, геотермальные электростанции вполне могут заменить дизель-генераторы. В перспективе ГеоЭС можно будет строить также в Сибири и на Кавказе.

Суммарно геотермальное электро- и теплоснабжение на Камчатке, Курильских островах, Северном Кавказе, некоторых районах Сибири может составить до 50–90 % от общего потребления энергии [4].

В последние годы, благодаря постоянным и активным действиям РАО «ЕЭС России», АО «Геотерм» и АО «Наука», ОАО «РусГидро» при поддержке Минпромнауки и Минэнерго РФ, осуществлен прорыв в области создания и строительства геотермальных электростанций в нашей стране.

Радикальным решением энергетической проблемы Камчатской области является создание энергогенерирующих мощностей, независимых от привозного топлива, путем перехода на собственные геотермальные источники энергии. Регион обладает уникальными запасами геотермального тепла, способными обеспечить суммарную электрическую и тепловую мощность, превышающую 2000 МВт.

Создание и строительство Мутновской ГеоЭС стало крупным энергетическим проектом на Камчатке, который принес важный социальный и экономический эффект всем участникам проекта и помог решить ряд важных научных и практических задач. Камчатка получила самую современную геотермальную электростанцию с дешевой электроэнергией до 55 МВт. Также планируется увеличение мощности данной геотермальной электростанции [9].

Опыт создания Мутновской ГеоЭС стал толчком к развитию нового направления в отечественной науке и технике и укрепил базы наших заводов и институтов в данной области энергетики.

Многолетний опыт обслуживания и эксплуатации первой ГеоЭС с бинарным циклом — Паужетской ГеоЭС — играет важную роль для современного развития данного вида возобновляемых источников энергии.

Значительными запасами геотермального тепла обладает и Чукотка, здесь также ведутся работы по строительству объектов геотермального теплоснабжения [8].

Очень богаты запасами тепла Земли и Курильские острова [10]:

1. На самом крупном острове архипелага — острове Итуруп — были обнаружены запасы двухфазного геотермального теплоносителя, которых по прогнозам хватит для производства 30 МВт электроэнергии;
2. На южном острове Кунашир запасы геотермального тепла уже используются для получения электроэнергии и для теплоснабжения;
3. Известно, что на северном острове Парамушир есть значительные запасы геотермальной воды температурой от 70 °С до 95 °С.

На Северном Кавказе хорошо изучены геотермальные месторождения с темпе-

ратурой в резервуаре от 70 °С до 180 °С, которые находятся на глубине от 300 до 5000 м. Разведанные ресурсы могут позволить обеспечить электроэнергией мощностью 200 МВт. В Дагестане известно о 14 месторождениях геотермального тепла, на сегодняшний день геотермальным отоплением пользуются более 100 тысяч человек [11].

Приморье, Прибайкалье, Западно-Сибирский регион также располагают запасами геотермального тепла, пригодного для широкомасштабного использования в промышленности и сельском хозяйстве.

Создание локальных систем тепло- и электроснабжения на основе геотермальных ресурсов позволяет в короткие сроки решить проблему энергообеспечения многих гражданских, промышленных объектов на Камчатке, Чукотке, Курильских островах, в Магаданской области и Сибири.

Уже в ближайшие 5–10 лет за счет использования геотермальной энергии РФ могла бы на 20–30 % сэкономить расходы органического топлива на тепло-снабжение городов, поселков и военных объектов [12].

Применение современных технологий ГеоЭС: ГеоЭС с бинарным циклом, тепловые насосы, эффективные системы отопления и сушки материалов, — позво-

ляют получить максимальный эффект от геотермального теплоносителя.

### Выводы

Основное направление развития геотермальной энергетики в мире и в России — это создание геотермальных электростанций, использующих в качестве топлива низкопотенциальный теплоноситель.

Сегодня геотермальные электростанции в России работают на Камчатке, в Республике Саха (Якутия), в Ленинградской области, на острове Сахалин.

По данным журнала «Энергия из недр земли», за последние годы в мире построено более 20 геотермальных электростанций.

Анализ показал, что в настоящее время геотермическая энергетика занимает весьма скромное место в топливно-энергетическом балансе мира, хотя по выработке электроэнергии она превосходит любой из других видов возобновляемых источников энергии, включая гидроэнергетику и солнечную.

По данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2016 г. в мире было использовано около 35 ГВт геотермических электростанций, что составляет 0,2 % от мирового потребления электроэнергии.

### Список источников

1. Елистратов В.В. Современное состояние и тренды развития ВИЭ в мире // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2017. № 1-3. С. 84-100.
2. Поваров О.А., Томаров Г.В. Развитие геотермальной энергетики в России и за рубежом // Теплоэнергетика. 2006. № 3. С. 2-10.
3. Ахмедзянов А.Р., Богданова Ю.З. Геотермальная энергетика в Германии // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения. 2017. С. 183-185.
4. Сибикин Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. М.: Knorus, 2010. 227 с.

5. Роза А.В. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.
6. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. М.: Энергоатомиздат, 2008. 233 с.
7. Гзенгер Ш., Елистратов В.В., Денисов Р.С. Ветроэнергетика в России: перспективы, возможности и барьеры // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность. 2016. С. 216-220.
8. Шпильрайн Э.Э. Проблемы и перспективы возобновляемой энергии в России // Перспективы энергетика. 2003. Т. 7. С. 393-403.

9. Богуславский Э.И., Певзнер Л.А., Хахаев Б.Н. Перспективы развития геотермальной технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2000. № 5. С. 142-148.

10. Безруких П.П. и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. СПб, 2002. 314 с.

11. Алхасов А.Б. и др. Вопросы республиканской целевой программы «Использование возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан» // Региональные проблемы преобразования экономики. 2015. № 9 (59). С. 36-42.

12. Каркин М.А., Кулаков В.Ю., Селюнин А.А. Геотермальная энергия // Научные труды студентов ижевской ГСХА. 2015. С. 52-54.

### References

1. Elistratov V.V. *Sovremennoe sostoyanie i trendy razvitiya VIE v mire* [Current Situation and Trends of the World Res Development]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya — International scientific journal Alternative Energy and Ecology*, 2017, No. 1-3, pp. 84-100. [in Russian].

2. Povarov O.A., Tomarov G.V. *Razvitie geotermal'noi energetiki v Rossii i za rubezhom* [Development of Geothermal Energy in Russia and Abroad]. *Teploenergetika — Thermal Power Engineering*, 2006, No. 3, pp. 2-10. [in Russian].

3. Akhmedzyanov A.R., Bogdanova Yu.Z. *Geotermal'naya energetika v Germanii* [Geothermal Energy in Germany]. *Aktual'nye voprosy nauki i khozyaistva: novye vyzovy i resheniya* [Topical Issues of Science and Economy: New Challenges and Solutions]. 2017, pp. 183-185. [in Russian].

4. Sibikin Yu.D. *Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii* [Non-Traditional and Renewable Sources of Energy]. Moscow, Knorus Publ., 2010. 227 p. [in Russian].

5. Roza A.V. *Vozobnovlyaemye istochniki energii. Fiziko-tehnicheskie osnovy* [Renewable Energy Sources. Physical and Technical Foundations]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2010. 704 p. [in Russian].

6. Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova E.B. *Vozobnovlyaemaya energetika v detsentralizovannom elektrosnabzhenii* [Renewable Energy in Decentralized Power Supply]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2008. 233 p. [in Russian].

7. Gzenger Sh., Elistratov V.V., Denisov R.S. *Vetroenergetika v Rossii: perspektivy, vozmozhnosti i bar'ery* [Wind Power in Russia: Prospects, Opportunities and Barriers]. *Vozobnovlyaemaya energetika XXI vek: Energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost' — Renewable Energy XXI Century: Energy and Economic Efficiency*, 2016, pp. 216-220. [in Russian].

8. Shpil'rain E.E. *Problemy i perspektivy vozobnovlyaemoi energii v Rossii* [Problems and Prospects of Renewable Energy in Russia]. *Perspektivy energetiki — Prospects of Energy*, 2003, Vol. 7, pp. 393-403. [in Russian].

9. Boguslavskii E.I., Pevzner L.A., Khakhaev B.N. *Perspektivy razvitiya geotermal'noi tekhnologii* [Prospects for the Development of Geothermal Technology]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) — Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2000, No. 5, pp. 142-148. [in Russian].

10. Bezrukikh P.P. e.a. *Resursy i effektivnost' ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Rossii* [Resources and Efficiency of the Use of Renewable Energy Sources in Russia]. Saint-Petersburg, 2002. 314 p. [in Russian].

11. Alkhasov A.B. e.a. *Voprosy respublikanskoi tselevoi programmy «Ispol'zovanie vozobnovlyaemykh istochnikov energii v Respublike Dagestan»* [Questions of the Republican Target Program «Use of Renewable Energy Sources in the Republic of Dagestan»]. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki — Regional Problems of Transformation of the Economy*, 2015, No. 9 (59), pp. 36-42. [in Russian].

12. Karkin M.A., Kulakov V.Yu., Selyunin A.A. *Geotermal'naya energiya* [Geothermal Energy]. *Nauchnye trudy studentov izhevskoi GSKhA* [Scientific Works of Students of the ISAA]. 2015, pp. 52-54. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 26.01.2023; принята к публикации 31.01.2023.*

*The article was submitted 12.01.2023; approved after reviewing 26.01.2023; accepted for publication 31.01.2023.*

Научная статья

УДК 621.314

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-125-134

## ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СХЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

**Роберт Эдуардович Петков****Robert E. Petkov**

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

**Александр Измайлович Ишемгузин****Aleksandr I. Ishemguzhin**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет, Уфа, Россия

### Актуальность

Преобразователь с передачей энергии на обратном ходу (при запертых силовых транзисторах) является одной из самых популярных топологий импульсных преобразователей постоянного напряжения. Топология обратного преобразователя является уникальной в плане эффективной взаимосвязи электромагнитных процессов в нем. Несомненное достоинство преобразователя — предельная простота и дешевизна. Область его широкого использования ограничена устройствами малой и средней мощности как стандартного, так и нестандартного применения. Однако некоторые свойства преобразователя позволяют эффективно решать сложные задачи по построению мощных преобразовательных устройств. В целом разработка и исследование обратных преобразователей является актуальной задачей в деле совершенствования устройств современной преобразовательной техники.

### Цель работы

Моделирование обратного преобразователя с быстродействующей двухконтурной системой управления по току и напряжению.

### Методы исследования

В работе использованы методы исследования силовых электронных устройств импульсного действия, методы исследования цифровых устройств на КМОП структурах (структура металл-оксид-полупроводник). Компьютерное моделирование выполнено в программной среде Electronics Workbench.

### Ключевые слова

обратного преобразователя,  
обратного преобразователя  
с непрерывным  
и прерывистыми  
режимами работы, схема  
управления  
обратного преобразователя,  
компаратор, логический  
элемент, трансформатор

**Результаты**

Предложены методы построения быстродействующей системы управления для обратного преобразователя на основе применения двух контуров регулирования по току и напряжению. За счет предложенных методов повышаются быстродействие, устойчивость работы преобразователя, обеспечивается защита от короткого замыкания и превышения напряжения на выходе преобразователя. Результаты и выводы подтверждены моделированием.

**Для цитирования:** Петков Р. Э., Ишемгужин А. И. Обратного преобразователя с быстродействующей схемой управления // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. № 1. Т. 19. С. 125-134. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-125-134>.

Original article

## REVERSE-PASS CONVERTER WITH A HIGH-SPEED CONTROL CIRCUIT

**The relevance**

The converter with reverse power transmission (with locked power transistors) is one of the most popular topologies of DC voltage pulse converters. The topology of the reverse-pass converter is unique in terms of the effective interconnection of electromagnetic processes in it. The undoubted advantage of the converter is its extreme simplicity and cheapness, the scope of its widespread use is limited to devices of low and medium power, both standard and non-standard applications. However, some properties of the converter make it possible to effectively solve complex problems of building powerful converter devices. In general, the development and research of reverse-flow converters is an urgent task in improving the devices of modern conversion technology.

**Aim of research**

Simulation of a reverse-flow converter with a high-speed dual-circuit current and voltage control system.

**Research methods**

The research methods of pulsed power electronic devices, methods of studying digital devices on CMOS structures (metal-oxide-semiconductor) are used in the work. The computer simulation was performed in the Electronics Workbench software environment.

**Results**

Methods of constructing a high-speed control system for a reverse-flow converter based on the use of two current and voltage control circuits are proposed. Due to the proposed methods, the speed and stability of the converter increases, protection against short circuit and excess voltage at the output of the converter is provided. The results and conclusions are confirmed by modeling.

**Ключевые слова**

reverse-pass converter, reverse-pass converter with continuous intermittent operation modes, control circuit of the reverse-pass converter, comparator, logic element, transformer

**For citation:** Petkov R. E., Ishemgужin A. I. Obratnokhodovoi preobrazovatel' s bystrodeistvuyushchei skhemoi upravleniya [Reverse-Pass Converter with a High-Speed Control Circuit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 125-134 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-125-134>.

## Введение

Преобразователь с передачей энергии на обратном ходу (при запертых силовых транзисторах) является одной из самых популярных топологий импульсных преобразователей постоянного напряжения [1–3]. Топология обратного преобразователя является уникальной в плане эффективной взаимосвязи электромагнитных процессов в нем. Несомненное достоинство преобразователя — предельная простота и дешевизна. Область его широкого использования ограничена устройствами малой и средней мощности как стандартного, так и нестандартного применения. Однако некоторые свойства преобразователя позволяют эффективно решать сложные задачи по построению мощных преобразовательных устройств. В целом разработка и исследование обратных преобразователей является актуальной задачей в деле совершенствования устройств современной преобразовательной техники [4, 5].

Обратной преобразователь (ОП) часто используют как инвертирующий преобразователь или как преобразователь с гальванической развязкой при относительно небольших мощностях, меньших 1 кВт [6].

В данной работе рассматривается модель обратного преобразователя [6, 7], имеющего предельно простую систему стабилизации выходного напряжения с высоким быстродействием. Одно из достоинств рассматриваемого преобразователя — простая схема стабилизации (управления). Кроме того, в схеме ОП обеспечивается защита от перегрузок и коротких замыканий, а также плавное (без бросков) установление выходного напряжения при включении. Также ОП по рассматриваемой схеме может синхронизироваться от внешнего источника частоты.

## Схема обратного преобразователя

### с быстродействующим управлением

Обратной преобразователь может работать в следующих режимах:

- в режиме непрерывного тока дросселя (или трансформатора);
- в режиме прерывистого тока дросселя (или трансформатора);
- в режиме граничной проводимости. В этом режиме ток падает до нуля, затем без паузы начинает нарастать [8].

В настоящее время становится популярным режим граничной проводимости. В режиме интервал времени между проводящим состоянием силового ключа и выпрямительного диода уменьшается до нуля, но перекрытие открытых состояний диода и транзистора отсутствует. Частота коммутации становится переменной, уменьшается кратность импульсного тока по отношению к среднему току, уменьшаются пульсации выходного напряжения, сохраняется устойчивость работы обратного преобразователя. В режиме при максимальной нагрузке и меньшем входном напряжении преобразователь работает на меньшей частоте. С уменьшением нагрузки частота работы преобразователя повышается [6].

Режим граничной проводимости может оказаться неприемлемым при необходимости синхронизации от внешнего источника частоты. В двух других режимах преобразователь может работать при постоянной частоте и синхронизироваться от внешнего источника частоты.

На рисунке 1 представлена схема модели обратного преобразователя с одним ключом без гальванической развязки (инвертирующий преобразователь напряжения). Схема включает в себя силовую часть: транзистор VT, диод VD<sub>1</sub>, дроссель L, конденсатор C. При необхо-



димости гальванической развязки вместо дросселя устанавливается трансформатор. Система стабилизации выполнена на элементах  $DD_1 \dots DD_4$ . Генератор задающей частоты (триггер Шмита  $DD_4$  и элементы  $VD_2, C_3, R_7, R_8$ ) вырабатывает узкие импульсы длительностью  $\sim 1$  мкс. Частота импульсов устанавливается резистором  $R_7$  [5]. Она может быть установлена в широких пределах  $\sim 10 \dots 100$  кГц (на модели частота установлена 20 кГц). В системе стабилизации два канала управления:

- канал управления по току;
- канал управления по выходному напряжению.

### Канал управления по току

Канал управления по току организован с помощью датчика тока и элементов  $DD_1, DD_2$ . Канал по выходному напряжению реализуется с помощью делителя  $R_5, R_6$  и элементов  $DD_3$  и  $DD_2$ .

Канал управления по току ограничивает амплитуду тока через силовой тран-

зистор  $VT$ . При превышении заданного уровня тока в транзисторе  $VT$  элемент  $DD_1$  переходит в состояние логической единицы и устанавливает RS-триггер  $DD_2$  в нулевое состояние. На выходе  $DD_3$  при этом появляется логический ноль — транзистор  $VT$  переходит в непроводящее состояние. Отпирание  $VT$  произойдет с приходом очередного запускающего импульса с задающего генератора. Таким образом, амплитуда тока через силовой транзистор  $VT$  всегда ограничена и не может быть выше значения, определяемого коэффициентом передачи датчика тока и порогом срабатывания элемента  $DD_1$ . Это ограничение тока происходит при запуске преобразователя, при перегрузке и коротком замыкании на его выходе.

### Канал управления по напряжению

Канал управления по напряжению ограничивает выходное напряжение на уровне, определяемым делителем  $R_5, R_6$  и порогом переключения элемента  $DD_3$ . При увеличении выходного напряжения

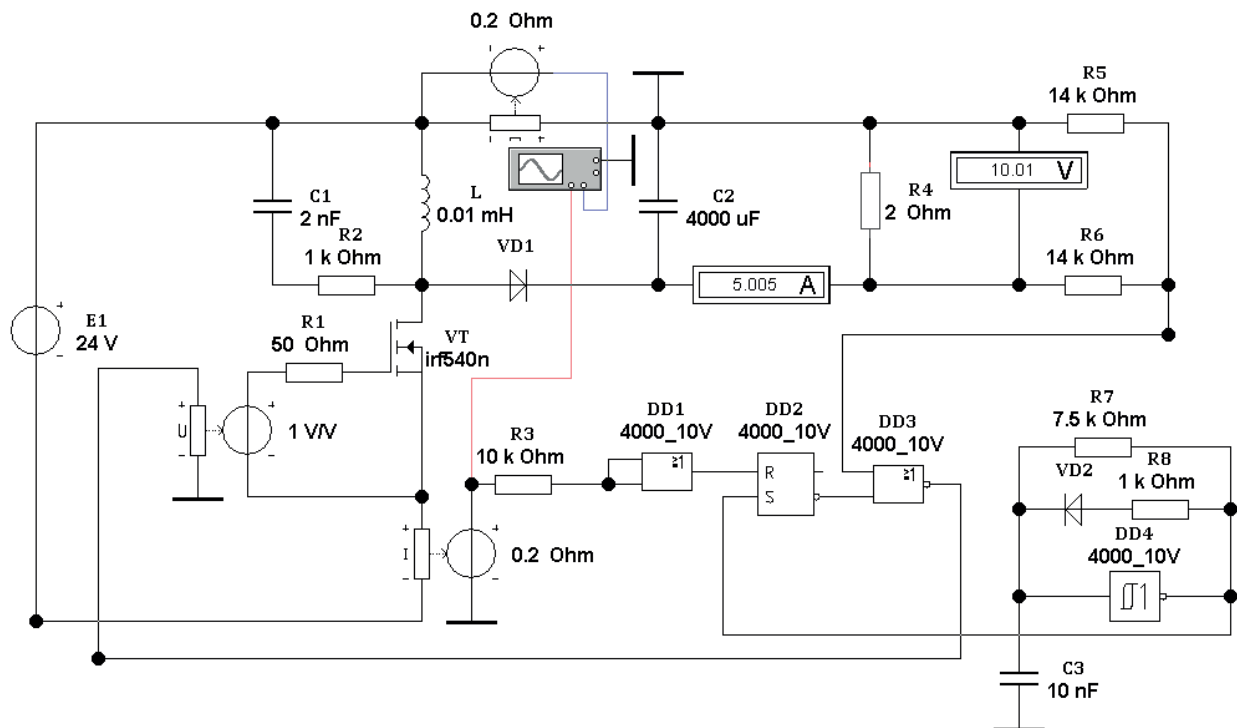


Рисунок 1. Схема модели обратного преобразователя

Figure 1. Scheme of the reverse-pass converter model

элемент  $DD_3$  переключается в нулевое состояние и блокирует прохождение отпирающих импульсов на затвор силового транзистора VT. При уменьшении выходного напряжения частота прохождения отпирающих импульсов на затвор силового транзистора VT увеличивается вплоть до частоты задающего генератора [9].

Таким образом, при заданных входном и выходном напряжениях амплитуда тока остается постоянной, интервалы открытого состояния силового ключа VT и открытого состояния силового диода  $VD_1$  также остаются постоянными при неизменном сопротивлении нагрузки. На рисунке 2 приведены осциллограммы тока в транзисторе VT (1) и диоде  $VD_1$  (2) для двух значений сопротивлений нагрузки. В верхней части рисунка показаны осциллограммы при токе нагрузки 5 А. В нижней части рисунка приведены осциллограммы при токе нагрузки 0,5 А. Форма токов одна и та же, однако частота работы при токе нагрузки 0,5 А примерно в 10 раз меньше. В обоих случаях частота работы задаю-

щего генератора постоянна, а сам преобразователь может быть синхронизирован с внешней частотой.

Рассмотрим основные соотношения для модели ОП в соответствии с рисунком 1. Напряжение на дросселе L при открытом VT [3, 6, 10]:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}.$$

Считая, что ток нарастает линейно и, принимая прерывистый режим тока ОП, получаем

$$U_L = L \frac{I_{Lm}}{t_1},$$

где  $t_1$  — время открытого состояния ключа VT;

$I_{Lm}$  — максимальное значение тока через дроссель L;

$U_L$  — напряжение на дросселе L в течение времени  $t_1$ .

Для  $I_{Lm}$  имеем [11, 12]

$$I_{Lm} = \frac{U_L t_1}{L}. \tag{1}$$

Энергия, запасаемая в дросселе за время  $t_1$ :

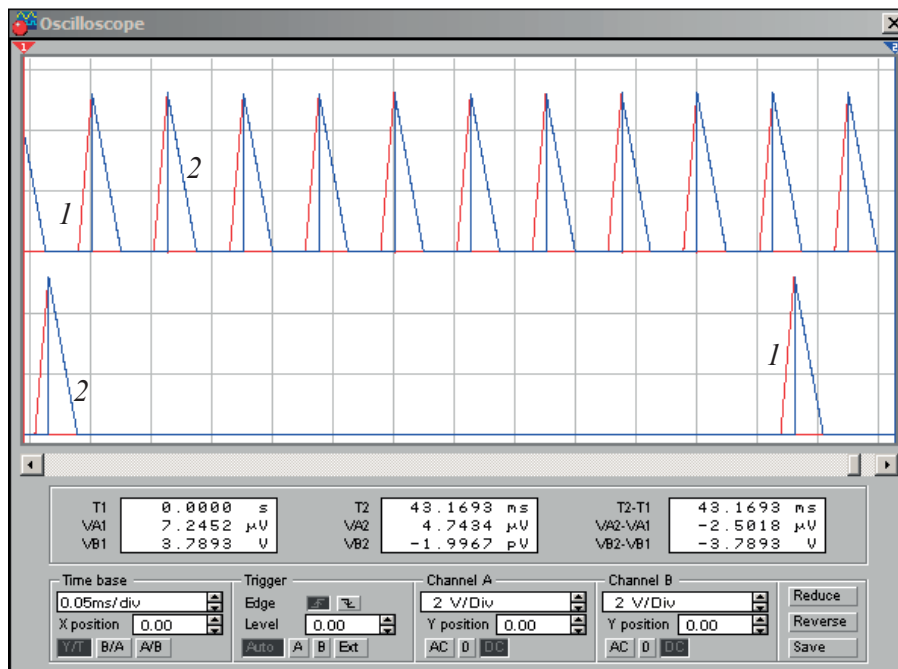


Рисунок 2. Осциллограммы тока в транзисторе VT (1) и диоде  $VD_1$  (2)

Figure 2. Current waveforms in transistor VT (1) and diode  $VD_1$  (2)

$$W_L = \frac{I_{Lm}^2 L}{2}.$$

Мощность, передаваемая дросселем в нагрузку [13, 14]:

$$P_H = U_H I_H = \frac{U_H^2}{R_H} = \frac{I_{Lm}^2 L}{2T} = \frac{I_{Lm}^2 L}{2} f, \quad (2)$$

где  $T$ ,  $f$  — период и частота отпираания ключа  $VT$ .

Из выражения (2) получаем формулы для определения напряжения на нагрузке:

$$U_H = I_{Lm} \sqrt{\frac{R_H L}{2T}} = I_{Lm} \sqrt{\frac{R_H L f}{2}}. \quad (3)$$

Подставляя  $I_{Lm}$  из (1), получаем формулу связи входного и выходного напряжений:

$$U_H = U_L t_1 \sqrt{\frac{R_H}{2TL}} = U_L t_1 \sqrt{\frac{R_H f}{2L}}. \quad (4)$$

Обратимся к рисунку 1:

$$R_H = 2 \text{ Ом}, L = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, I_{Lm} = 25 \text{ А}, \\ T = 61.76 \cdot 10^{-6} \text{ с}, t_1 = 11 \cdot 10^{-6} \text{ с}, U_L \cong 24 \text{ В}.$$

По формуле (3) имеем:

$$U_H = I_{Lm} \sqrt{\frac{R_H L}{2T}} = 25 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 61,76 \cdot 10^{-6}}} \cong 10,0 \text{ В}.$$

По формуле (4) имеем:

$$U_H = U_L t_1 \sqrt{\frac{R_H}{2TL}} = 24 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \times \\ \times \sqrt{\frac{2}{2 \cdot 61,76 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01 \cdot 10^{-3}}} \cong 10,623 \text{ В}.$$

Отличие результата расчета по формуле (4) от значения 10 В объясняется тем, что в не учтены потери в силовых элементах ОП, то есть силовые элементы приняты идеальными. Результаты расчета по формуле (3) учитывают эти потери за счет непосредственного измерения тока в действующей модели.

Пульсации выходного напряжения определяются в основном тремя факторами [13]:

- значением емкости  $C_2$ ;
- значением сопротивления нагрузки;

— значением периода тактовой частоты.

Качественно влияние этих факторов в предложенной модели следующее.

При увеличении емкости пульсации напряжения на нагрузке ожидаемо уменьшаются.

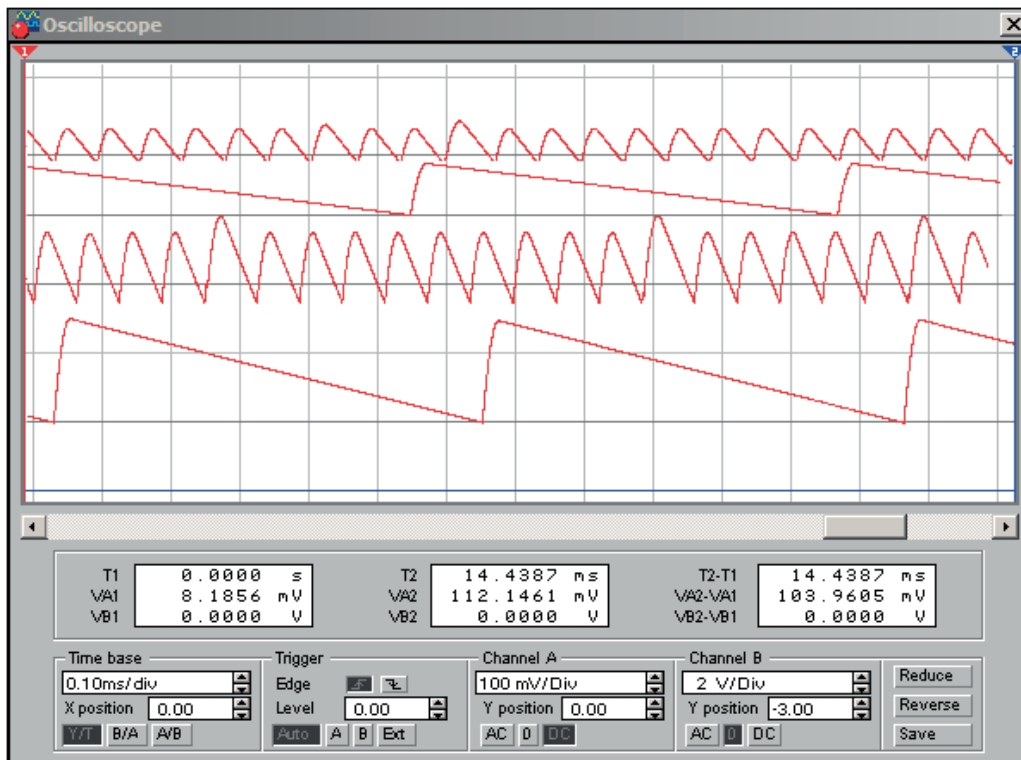
При уменьшении сопротивления нагрузки конденсатор  $C_2$  разряжается медленнее, однако в этом случае уменьшается и частота работы преобразователя, что не дает существенного уменьшения пульсаций.

При уменьшении частоты задающего генератора при неизменной нагрузке пульсации возрастают.

На рисунке 3 показаны осциллограммы, иллюстрирующие эти факторы.

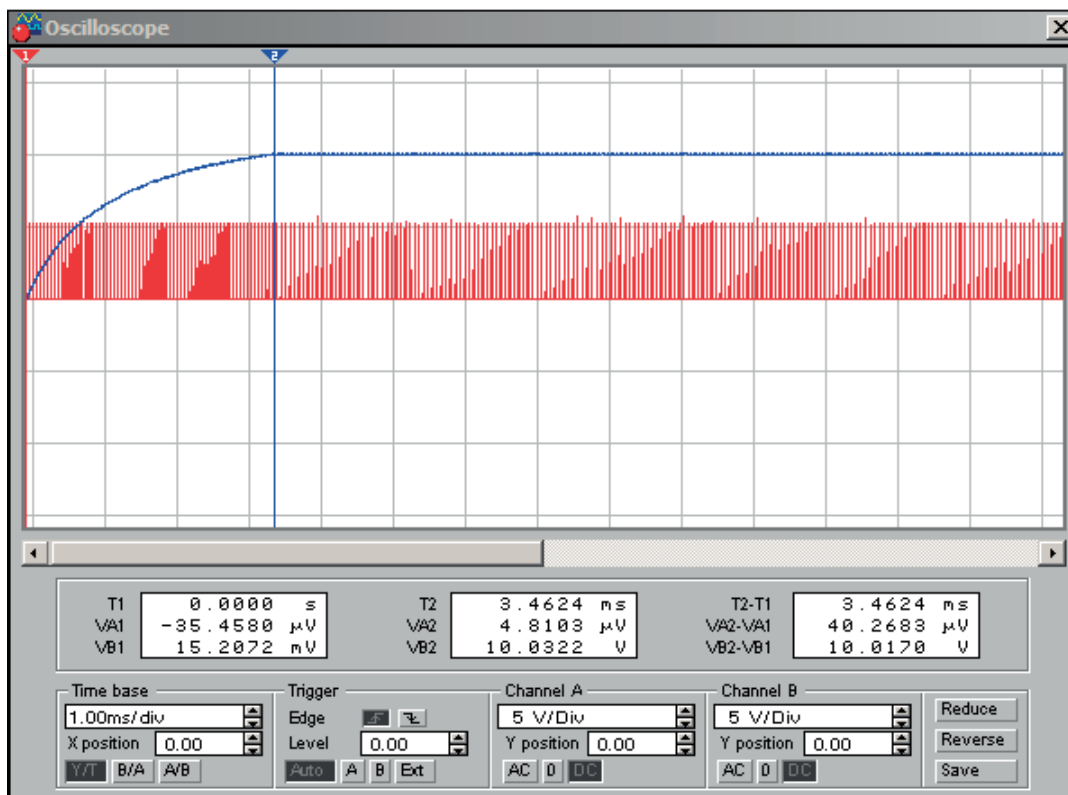
Самая верхняя осциллограмма — это пульсации выходного напряжения при сопротивлении нагрузки 2 Ом и емкости конденсатора  $C_2$  4000 мкФ. Размах пульсаций не превышает 50 мВ. Вторая осциллограмма — пульсации выходного напряжения при сопротивлении нагрузки 20 Ом и емкости конденсатора  $C_2$  4000 мкФ. Размах пульсаций не превышает 80 мВ. Следующие осциллограммы — это пульсации выходного напряжения при сопротивлениях нагрузки 2 Ом и 20 Ом и емкости конденсатора  $C_2$  2000 мкФ. Размах пульсаций примерно составляет 150 мВ. Как видно из осциллограмм, пульсации выходного напряжения при уменьшении сопротивления нагрузки не уменьшаются, а даже несколько увеличиваются, что связано с уменьшением частоты ОП и увеличением времени разряда конденсатора  $C_2$ .

При включении в работу ОП не наблюдается бросков напряжения на выходе и перегрузок по току. ОП плавно переходит из режима стабилизации по току в режим стабилизации по напряжению. На рисунке 4 показаны осциллограммы тока и напряжения при включении ОП. Время включения составляет примерно 3,5 мс.



**Рисунок 3.** Осциллограммы пульсаций напряжения на выходе обратного преобразователя

**Figure 3.** Waveforms of voltage ripples at the output of a reverse-pass converter



**Рисунок 4.** Осциллограммы тока VT и напряжения на выходе преобразователя при включении

**Figure 4.** Waveforms of the current VT and voltage at the output of the converter when turned on

Максимальный ток стабилизируется на уровне, определяемом каналом управления по току.

При коротком замыкании в нагрузке ОП переходит в режим стабилизации по току [14–17].

Осциллограммы тока транзистора VT и тока диода VD<sub>1</sub> при коротком замыкании представлены на рисунке 5.

В режиме короткого замыкания наблюдается непрерывный режим [15–17]. Транзистор VT открывается на короткое время, затем в оставшуюся часть периода течет ток через диод VD<sub>1</sub>. Если необходимо предусмотреть режим длительного короткого замыкания, следует выбирать диод с допустимым постоянным током, равным амплитудному току [14].

Данные преобразователи используются в устройствах электропитания: сетевые и несетевые (внутри аппаратуры). Примерами несетевых являются компьютеры и различные современные промышленные приборы [3].

Также используются для управления двигателями с реверсами и без реверсов, для преобразования широкого диапазона регулирования; используются в мощных многофазных преобразовательных устройствах на несколько киловатт [18]; применяются для управления двигателями постоянного тока для системы автоматического регулирования и робототехники [19].

### Выводы

В представленной модели обратного преобразователя применена новая схема управления, отличающаяся простотой и высоким быстродействием.

В представленной модели преобразователя реализовано двухконтурное управление — по току и напряжению.

Обратноходовой преобразователь с предложенной схемой управления может нормально функционировать при пуске, перегрузке и коротком замыкании на выходе.

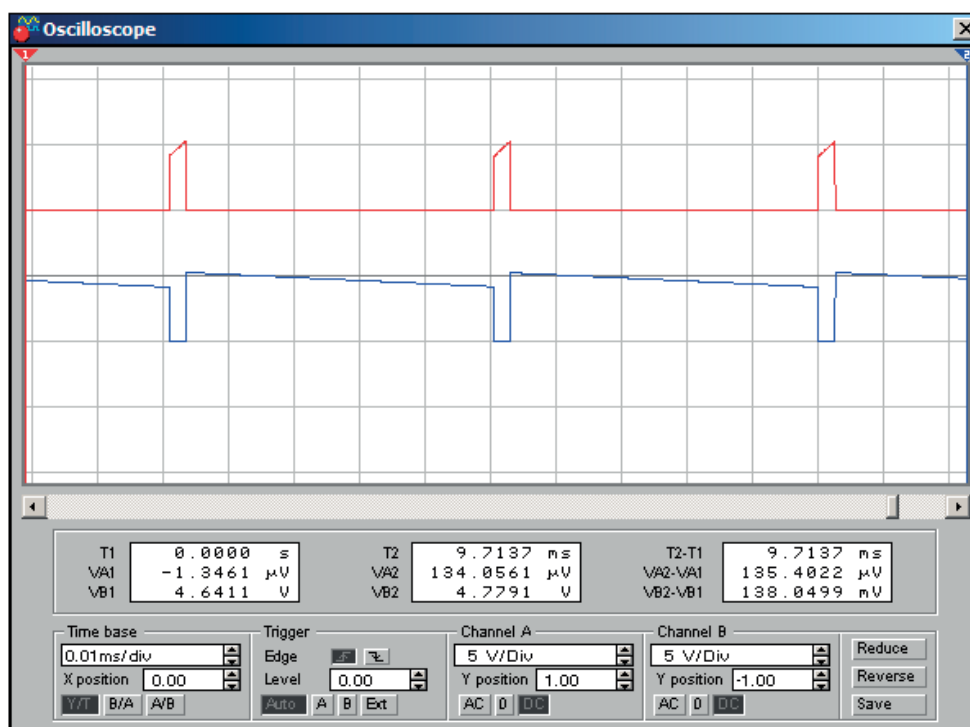


Рисунок 5. Осциллограммы тока VT и тока VD<sub>1</sub> при коротком замыкании на выходе обратноходового преобразователя

Figure 5. Waveforms of current VT and current VD<sub>1</sub> in case of a short circuit at the output reverse-pass converter

## Список источников

1. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. 272 с.
2. Макашов Д. Обратногодовой преобразователь [Электронный ресурс]. 2005. URL: <https://zipstore.ru/wa-data/public/blog/download/flyback.pdf?ysclid=lddcpdsf70617986049> (дата обращения: 24.01.2023).
3. Володин В. Я. Модель малого сигнала обратногодовой преобразователя [Электронный ресурс]. 2022. URL: [http://valvolodin.narod.ru/articles/Flyback\\_SSM.pdf?ysclid=ldg4hzuazb879554160](http://valvolodin.narod.ru/articles/Flyback_SSM.pdf?ysclid=ldg4hzuazb879554160) (дата обращения: 25.01.2023).
4. Савелов А.А. Расчет импульсных источников питания устройств авионики. М.: МГТУ ГА, 2015. 96 с.
5. Букреев И.Н., Горячев В.И., Мансуров Б.М. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. М.: Техносфера, 2009. 712 с.
6. Ненахов С.М. Расчет обратногодовой преобразователя напряжения в установившемся режиме [Электронный ресурс]. ИЦ «АпельсИнн» URL: <https://mp36c.ru/pdf/library/articles/PowerSupply/ru/opn-ust.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
7. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
8. Петков Р.Э., Ишемгузин А.И. Быстродействующая система управления обратногодовым преобразователем постоянного напряжения // Научный альманах Центрального Черноземья. 2022. № 1. Ч. 7. С. 110-115.
9. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
10. Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. 448 с.
11. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Пер. с нем. 12е изд. Т. II. М.: ДМК Пресс, 2007. 942 с.
12. Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. Справочник инженера-схемотехника. М.: Техносфера, 2008. 608 с.
13. Найвелт Г.С. и др. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1985. 576 с.
14. Чети П. Проектирование ключевых источников электропитания: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
15. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. М.: Солон-ПРЕСС, 2011. 416 с.
16. Семенов Б.Ю. Силовая электроника от простого к сложному. М.: Солон-Р, 2005. 416 с.
17. Chryssis G. High Frequency Switching Power Supplies. McGrawHill, 1984.
18. Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. 2nd ed. Prentice Hall, 1993.
19. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. Киев: МК-Пресс, 2005. 288 с.

## References

1. Mek R. *Impul'snye istochniki pitaniya. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu* [Switching Power Supplies. Theoretical Foundations of Design and a Guide to Practical Application]: Transl. from Engl. Moscow, Izdatel'skii dom «Dodeka-KhKh1», 2008. 272 p. [in Russian].
2. Makashov D. *Obratnokhodovoi preobrazovatel'* [Reverse-Pass Converter] [Electronic Resource]. 2005. URL: <https://zipstore.ru/wa-data/public/blog/download/flyback.pdf?ysclid=lddcpdsf70617986049> (accessed 24.01.2023). [in Russian].
3. Volodin V. Ya. *Model' malogo signala obratnokhodovogo preobrazovatelya* [Model of a Small Signal of a Reverse-Pass Converter] [Electronic Resource]. 2022. URL: [http://valvolodin.narod.ru/articles/Flyback\\_SSM.pdf?ysclid=ldg4hzuazb879554160](http://valvolodin.narod.ru/articles/Flyback_SSM.pdf?ysclid=ldg4hzuazb879554160) (accessed 25.01.2023). [in Russian].
4. Savelov A.A. *Raschet impul'snykh istochnikov pitaniya ustroystv avioniki* [Calculation of Switching Power Supplies for Avionics Devices]. Moscow, MGTU GA, 2015. 96 p. [in Russian].
5. Bukreev I.N., Goryachev V.I., Mansurov B.M. *Mikroelektronnyye skhemy tsifrovyykh ustroystv* [Microelectronic Circuits of Digital Devices]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009. 712 p. [in Russian].
6. Nenakhov S.M. *Raschet obratnokhodovogo preobrazovatelya napryazheniya v ustanovivshemsya rezhime* [Calculation of a Reverse Voltage Converter in Steady-State Mode] [Electronic Resource]. ITs «Apel'sInn» URL: <https://mp36c.ru/pdf/library/articles/PowerSupply/ru/opn-ust.pdf> (accessed 24.01.2023). [in Russian].
7. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. *Upravlenie tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii* [Control of Transistor Converters of Electric Power]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 576 p. [in Russian].

8. Petkov R.E., Ishemguzhin A.I. Bystrodeistvuyushchaya sistema upravleniya obratnokhodovym preobrazovatelem postoyannogo napryazheniya [High-Speed Control System of a Reverse-Pass DC Voltage Converter]. *Nauchnyi al'manakh Tsentral'nogo Chernozem'ya — Scientific Almanac of the Central Chernozem Region*, 2022, No. 1, Ch. 7, pp. 110-115. [in Russian].
9. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor Converter Technology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 632 p. [in Russian].
10. Geitenko E.N. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya. Skhemotekhnika i raschet* [Sources of Secondary Power Supply. Circuit Design and Calculation]. Moscow, SOLON-PRESS Publ., 2008. 448 p. [in Russian].
11. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika* [Semiconductor Circuitry]: Transl. from Germ. 12 ed. Vol. II. Moscow, DMK Press Publ., 2007. 942 p. [in Russian].
12. Koris R., Shmidt-Val'ter X. *Spravochnik inzhenera-skhemotekhnika* [Handbook of a Circuit Engineer]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 608 p. [in Russian].
13. Naivel't G.S. e.a. *Istochniki elektropitaniya radioelektronnoi apparatury* [Power Sources of Electronic Equipment]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 576 p. [in Russian].
14. Cheti P. *Proektirovanie klyuchevykh istochnikov elektropitaniya* [Design of Key Power Sources]: Transl. from Engl. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. [in Russian].
15. Semenov B.Yu. *Silovaya elektronika: professional'nye resheniya* [Power Electronics: Professional Solutions]. Moscow, Solon-PRESS Publ., 2011. 416 p. [in Russian].
16. Semenov B.Yu. *Silovaya elektronika ot prostogo k slozhnomu* [Power Electronics from Simple to Complex]. Moscow, Solon-R Publ., 2005. 416 p. [in Russian].
17. Chryssis G. *High Frequency Switching Power Supplies*. McGrawHill, 1984.
18. Rashid M.H. *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall, 1993.
19. Braun M. *Istochniki pitaniya. Raschet i konstruirovaniye* [Power Sources. Calculation and Construction]. Kiev, MK-Press Publ., 2005. 288 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 23.02.2023.

The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 20.02.2023; accepted for publication 23.02.2023.

Научная статья

УДК 004.582

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-135-143

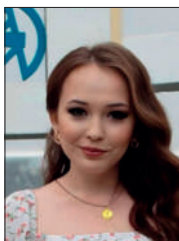
## УДАЛЕННЫЙ ДОСТУП К МОБИЛЬНОМУ РОБОТУ



**Фанур Анурович Баязитов**

**Fanur A. Bayazitov**

магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Юлия Раилевна Юсупова**

**Julia R. Yusupova**

магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Владимир Николаевич Филиппов**

**Vladimir N. Filippov**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия



**Азат Ахатович Альмухаметов**

**Azat A. Almukhametov**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Уфа, Россия

### Актуальность

За счет постоянно меняющихся рыночных условий, высокой скорости принятия решений, многозадачности и необходимости уменьшения рисков требуются все более современные подходы к организационной деятельности предприятий. В настоящее время компании начали активно входить в цифровое пространство, создавая и развивая свои информационные системы с поддержкой удаленного доступа. По результатам опроса портала TAdviser 35 % компаний перевели более 50 % своих сотрудников на удаленный или гибридный формат работы. Еще 18 % опрошенных поделились, что в их компаниях на удаленной работе находятся от 25 % до 50 % сотрудников. Однако управление

### Ключевые слова

разработка, чат-бот, робот, информационная система, автоматизация, удаленный доступ



робототехническими комплексами требует периодического контроля. Для управления подобными платформами предприятиям необходимо создавать интерфейсы и обеспечивать их возможностью удаленного доступа. Поэтому использование чат-бота в качестве интерфейса для удаленного доступа к мобильным роботам может предоставить альтернативное решение данной проблемы. Применение чат-ботов обеспечивает обслуживание пользователя круглосуточно, что позволяет мгновенно получать необходимую информацию, собирать данные и автоматизировать процесс взаимодействия пользователя и робота.

#### **Цель исследования**

Исследовать возможность применения чат-бота для предоставления удаленного доступа к недоступным или труднодоступным для человека местам. Спроектировать и создать информационную систему для проведения исследования.

#### **Методы исследования**

Для достижения цели исследования было решено провести физическое моделирование. Был выбран определенный технический состав для мобильной платформы и написан чат-бот для взаимодействия с роботом.

#### **Результаты**

Разработан и изготовлен чат-бот, с помощью которого можно управлять движением робота и подключаться к его камере. В качестве основного языка программирования было решено использовать Python. Платформой для реализации информационного продукта выбран Telegram, который является мультиплатформенным, его версии доступны для iOS, Android, Windows, Linux. Кроме того, есть возможность использования мессенджера посредством веб-браузера.

**Для цитирования:** Баязитов Ф. А., Юсупова Ю. Р., Филиппов В. Н., Альмухаметов А. А. Удаленный доступ к мобильному роботу // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 135-143. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-135-143>.

Original article

## **REMOTE ACCESS TO MOBILE ROBOT**

#### **The relevance**

Due to constantly changing market conditions, high decision-making speed, multitasking and the need to reduce risks, more and more modern approaches are required in the organizational activities of enterprises. Currently, companies have begun to actively migrate to the digital space, creating and developing their information systems with remote access support. According to the survey results of the TAdviser portal, 35 % of companies have transferred more than 50 % of their employees to a remote or hybrid work format. Another 18 % of respondents shared that in their companies 25 % to 50 % of employees work remotely. However, the control of robotic systems requires periodic monitoring. To manage such platforms, enterprises need to create interfaces and provide them with remote access. Therefore, using a chatbot as an interface for remote access to mobile robots can provide an alternative solution to this problem. The use of chatbots provides user service around the clock, which allows you to instantly receive the necessary information, collect data and automate the process of interaction between the user and the robot.

#### **Ключевые слова**

development, chatbot, robot, information system, automation, remote access

**Aim of research**

The main aim of the research is to explore the possibility of using a chatbot to provide remote access to inaccessible or hard-to-reach places for humans. Design and create an information system for research.

**Research methods**

To achieve the study aim, it was decided to conduct a physical simulation. A certain technical composition for the mobile platform was chosen and a chat bot was written to interact with the robot.

**Results**

A chatbot has been developed and manufactured with which you can control the movement of the robot and connect to its camera. It was decided to use Python as the main programming language. The platform for the implementation of the information product is Telegram, which is multiplatform, its versions are available for iOS, Android, Windows, Linux. In addition, it is possible to use the messenger through a web browser.

**For citation:** Bayazitov F. A., Yusupova J. R., Filippov V. N., Almukhametov A. A. Udalennyy dostup k mobil'nomu robotu [Remote Access to Mobile Robot]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 135-143 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-135-143>.

**Введение**

В процессе деятельности как главы компании, так и рядового сотрудника очень часто может возникнуть проблема удаленного доступа к ресурсам предприятия. Данное препятствие может возникнуть в случае, если работники компании пребывают в другой части света или принадлежат к группе людей с ограниченными возможностями. Опыт пандемии коронавирусной инфекции в 2020 г. доказал, что есть значительная потребность организации рабочего процесса не только в стенах самой компании, но и в дистанционном режиме [1].

Предложен новый подход в использовании чат-бота для применения в управлении мобильным роботом. Уникальность заключается в исследовании способа применения чат-бота как интерфейса для управления мобильным роботом.

Практическая значимость заключается в обосновании возможности использования системы для контроля робототехнической платформы при помощи чат-бота, без разработки собственного интерфейса и резервирования для него

интернет-ресурсов, таких как выделенный ip-адрес, а также для удаленного доступа работников к ресурсам организации в случае, если они относятся к людям с ограниченными возможностями или являются внештатными сотрудниками, пребывающими в другой точке земного шара.

**Обзор современных методов дистанционного управления роботами**

В настоящий момент устройствами удаленно можно управлять несколькими способами.

Во-первых, по локальной сети. Каждое устройство, подключающееся по сети, имеет свой уникальный IP-адрес в пределах данной сети. Использование данного способа позволяет быстро подключаться и обмениваться информацией между пользователями, однако необходимо, чтобы каждый из них был подключен к этой сети [2].

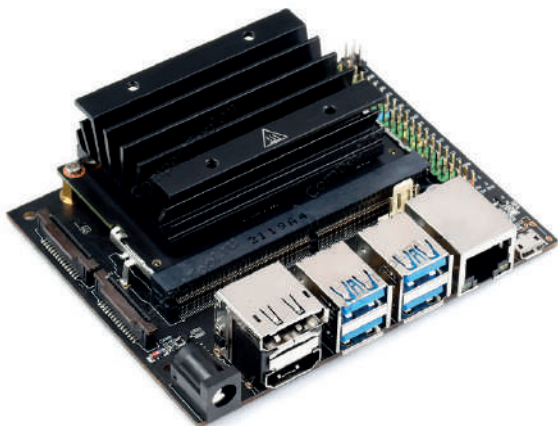
Во-вторых, через «белый» публичный IP-адрес. Наличие публичного IP-адреса на устройстве позволит организовать

собственный сервер, удаленный доступ к компьютеру, камерам видеонаблюдения и получить к ним доступ из любой точки глобальной сети. Однако обычно данный способ — платная услуга, так как количество подобных адресов ограничено.

В-третьих, использование web-сервера. Использование сервера позволяет обмениваться информацией между несколькими устройствами. Для этого необходимо создать структуру сервера на отдельном компьютере, чтобы не снижать скорость отклика робота на команды [3].

### Программное и техническое содержание мобильного робота

Основой робота является микрокомпьютер NvidiaJetsonNano 2GB (рисунок 1). При маленьком размере 70 мм × 45 мм данный модуль позволяет обрабатывать видео с разрешением 4Кс частотой 60 кадров, параллельно управляя моторами [4].

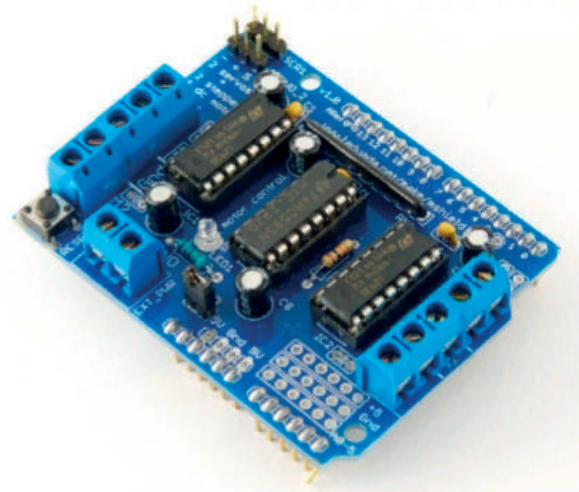


**Рисунок 1.** Микрокомпьютер Nvidia Jetson Nano

**Figure 1.** NvidiaJetsonNano Microcomputer

Для управления моторами был использован Motorshield L293D, состоящий из двух H-Bridge и микросхемы 74HC595 (рисунок 2). Использование двух установленных микросхем L293D позволяет

управлять четырьмя двигателями. Управление четырьмя колесами обеспечивает большую маневренность и быстрый отклик при торможении, что необходимо в условиях удаленного управления.



**Рисунок 2.** Motor shield для Arduino l293d

**Figure 2.** Motor shield for Arduino l293d

Трансляция осуществляется с помощью камеры IMX219-160, подключенной к плате через интерфейс CSI (рисунок 3). Преимущество использования CSI-камеры состоит в низкой нагрузке на центральный процессор (ЦП), хорошем качестве съемки и в освобождении порта USB в отличие от использования USB-камеры. Для активации камеры применяются команды GStreamer, вводимые в консоль [5]. Применение данных команд создает отдельное окно, что позволяет ссылаться на него при подключении к конференции.

В качестве основного языка программирования было решено использовать Python, поскольку на сегодняшний день он является наиболее актуальным языком для разработки чат-ботов в силу простоты использования и удобства. Также среди основных преимуществ данного языка можно выделить:

— высокую производительность — благодаря простоте Python разработчики

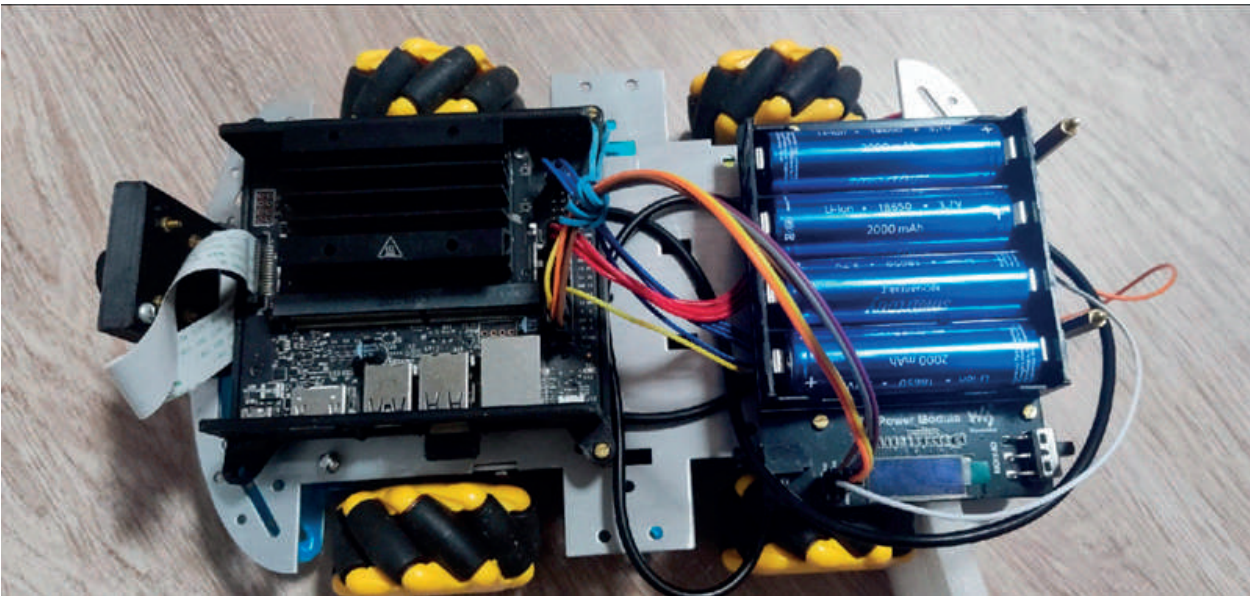


Рисунок 3. Текущий вид робота

Figure 3. The current form of the robot

могут сконцентрироваться на решении более сложных задач, не затрачивая большого объема времени на понимание синтаксиса и поведения языка программирования;

- бесплатное использование и открытый исходный код, что дает возможность загрузки исходного кода, его редактирования и распространения своей версии Python. Это полезно для организаций, которые желают изменить определенное поведение кода и использовать свою версию для разработки;

- поддержку обширных библиотек — стандартная библиотека вышеуказанного языка огромна, и пользователь может отыскать любую функцию для реализации собственной задачи, благодаря чему нет необходимости привязки к внешним библиотекам;

- кроссплатформенность — во многих языках, таких как C или C++, разработчику приходится неоднократно изменять код для запуска проекта на разных платформах. Тогда как на Python код можно написать один раз и запускать абсолютно, где угодно [6].

Система реализована без использования интегрированной среды разработки.

Это обосновано тем, что пользователь не имеет прямого доступа к роботу, поэтому нужно снизить нагрузку на центральный процессор, уменьшить энергопотребление и нагрев процессора. При реализации программного средства использовались следующие библиотеки:

- Selenium — представляет собой отличный инструмент для эмуляции действий браузера при использовании всего нескольких строк кода в проекте. Благодаря данной библиотеке также есть возможность имитации взаимодействия пользователя с ее элементами при учете характеристик человеческого пользования;

- Pyautogui — библиотека для имитации действий пользователя с клавиатурой (нажатие клавиш, ввод текста) и компьютерной мышью (нажатие на правую, левую кнопки) [7];

- Telebot — библиотека для реализации чат-бота в мессенджере Telegram при помощи языка Python [8];

- Pi74hc595 — библиотека подключения драйвера для мотора разрабатываемого робота.

Платформой для реализации информационного продукта выбран Telegram,

так как он является популярным кросс-платформенным приложением для обмена сообщениями, которое широко используется по всему миру в связи с расширенным функционалом конфиденциальности и шифрования. Приложение является мультиплатформенным, его версии доступны для iOS, Android, Windows, Linux. Кроме того, есть возможность использования мессенджера посредством веб-браузера. При помощи Telegram можно совершать видео- и аудиозвонки, организовывать конференции, многопользовательские группы и каналы. Также на базе данного продукта можно создавать и редактировать уникального чат-бота, что необходимо для дальнейшей работы [9].

Моделью управления аппаратным комплексом была выбрана клиент-серверная модель, где клиентская часть реализована средствами web-разработки.

Модель клиент-сервер или архитектура клиент-сервер представляют собой распределенную структуру приложений, распределяющую задачи между серверами и клиентами, которые либо находятся в одной системе, либо обмениваются данными через компьютерную сеть или Интернет. Клиент полагается на отправку запроса другой программе, чтобы получить доступ к услуге, предоставляемой сервером. Сервер запускает одну или несколько программ, которые

совместно используют ресурсы и распределяют работу между клиентами.

Отношения клиент-сервер взаимодействуют по шаблону обмена сообщениями запрос-ответ и должны соответствовать общему протоколу связи, который формально определяет используемые правила, язык и диалоговые шаблоны. Связь клиент-сервер обычно соответствует набору протоколов TCP/IP.

Данный способ дает возможность осуществлять управление аппаратного комплекса с использованием различных устройств. Ключевое требование для устройства — возможность поддержки http-протокола, наличие web-браузера для управления аппаратным комплексом и наличие интернет-соединения [10].

#### Метод управления мобильным роботом посредством чат-бота

*Концепция метода.* Система представляет собой чат-бот в популярном мессенджере Telegram, состоящий из ряда функций управления передвижением роботом и соединения с сервисом для проведения видеоконференций, не требующим установки сторонних приложений и функционирующим в любом браузере (рисунок 4).

*Принцип работы:*

1. пользователь заходит через своё устройство (смартфон, ПК) в чат-бот и проходит процесс авторизации;

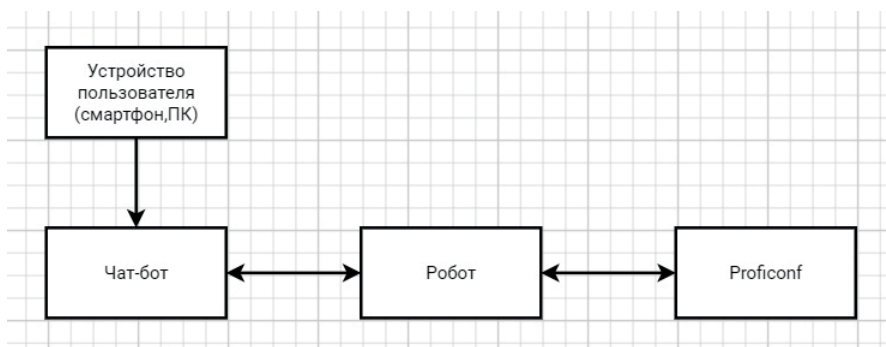


Рисунок 4. Структура принципа работы информационной системы

Figure 4. The operation principle structure of the information system

2. для контроля управления в чат-боте реализованы следующие функции: Вперед, Влево, Вправо, Камера. Первые три функции необходимы для возможности направления передвижения робота. При нажатии на кнопку «Камера» чат-бот высылает активную ссылку на видеоконференцию в сервис Proficonf (или любой аналогичный);

3. при нажатии на ссылку в браузере пользователя открывается сайт с вышеуказанным сервисом, где ему предоставляется доступ к просмотру трансляции через камеру робота.

Данный метод позволяет в краткие сроки без создания сервера или резервирования IP-адреса создать интерфейс для взаимодействия с роботом. Однако полученное программное решение не позволяет в удобном виде передавать сложные команды, к примеру, при движении впе-

ред невозможно передать точное время движения или расстояние.

При использовании зарезервированных функций в чат-боте передаются определенные значения, которые затем передаются в одноименные функции (рисунок 5).

Управление движением («Вперед», «Вправо», «Влево») передает определенный сигнал на моторы, после чего робот начинает движение.

Включение камеры «Камера» имеет следующий алгоритм: после нажатия кнопки на экран выводится сообщение с просьбой ожидания, во время этого через функции библиотек автоматического тестирования производится вход на сайт, создание комнаты конференции и включение камеры. После успешного включения камеры в чат передается ссылка, перейдя по которой, можно посмотреть видео (рисунок 6).

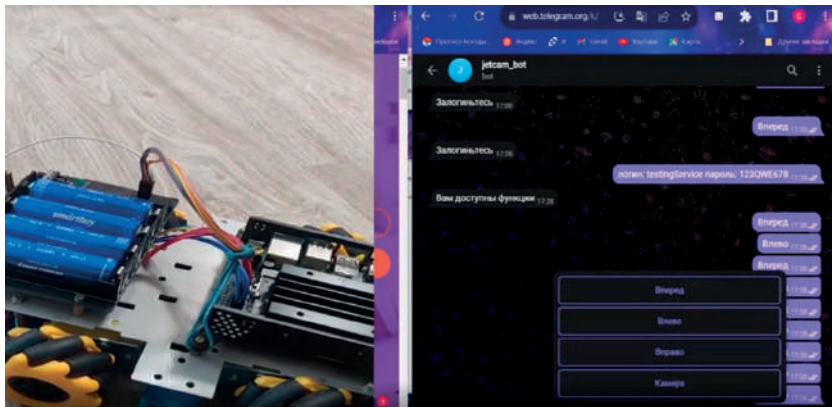


Рисунок 5. Результат работы чат-бота

Figure 5. The result of the chatbots service



Рисунок 6. Алгоритм программы

Figure 6. Program algorithm

## Выводы

В ходе работы над проектом был реализован чат-бот на платформе Telegram и робот на базе Jetson nano с csi-камерой, позволяющей предоставлять доступ к видеоконференциям через веб-браузер. Данный метод был выбран благодаря возможности быстро спроектировать интерфейс с быстрым откликом без дополнительных затрат. Однако необходимо точно формулировать команды и предусмотреть отмену действия через повторное нажатие кнопки или через отдельно выделенную кнопку, также сложные последовательности действия с привязкой к расстоянию или времени

будет затруднительно описать одной командой, что может привести к перегрузке интерфейса.

Использование выбранных технических средств позволило проводить потоковую трансляцию и одновременно управлять роботом с минимальной задержкой.

В дальнейшем возможно улучшение аппаратного и программного комплексов в рамках задач, которые могут быть поставлены, к примеру управление заранее заданными действиями манипуляторами, так как программный код проекта полностью это допускает.

## Список источников

1. Дубинина М.Г. Распространение услуг видеоконференцсвязи в период пандемии коронавируса // Вестник ЦЭМИ РАН. 2021. № 2.
2. Поротиков А.А. Локальные сети. Принципы функционирования // Аллея науки. 2020. Т. 1. № 7. С. 900-902.
3. Шаветов С.В., Ведяков А.А., Пыркин А.А. Архитектура системы удаленного управления робототехническими объектами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 161-163.
4. Süzen A.A., Duman B., Şen B. Benchmark Analysis of Jetson tx2, Jetson Nano and Raspberry PI Using Deep-CNN // 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). IEEE. 2020. С. 1-5.
5. Лобойко А.В. Выбор оптимальной конфигурации системы для передачи видеосигнала на основе одноплатного микрокомпьютера // Актуальные проблемы авиации и космонавтики Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: В 3 т. 2019. Т. 2. С. 143-145.
6. Van Rossum G. An Introduction to Python. Bristol: Network Theory Ltd., 2003. 115 p.
7. Jaganeshwari M.S.K., Djodilatchoumy D.R.S. An Automated Testing Tool Based on Graphical User Interface with Exploratory Behavioural Analysis // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2022. Vol. 100. No. 22.
8. Стрельцова А.С., Политковский Д.Б. Разработка чат-бота на Python // Актуальные вопросы науки и практики. 2022. С. 230-235.

9. Dargahi Nobari A., Reshadatmand N., Neshati M. Analysis of Telegram, an Instant Messaging Service // Proceedings of the 2017 ACM on Conference on Information and Knowledge Management. 2017. P. 2035-2038.

10. Некрасова Е.А. Принципиальные особенности и сравнительные характеристики файло-серверной, клиент-серверной и интранет-технологий распределения и обработки данных // Вестник Северо-Кавказского гуманитарного института. 2015. № 2 (14). С. 194-198.

## References

1. Dubinina M.G. Rasprostranenie uslug videokonferentsyvyazi v period pandemii koronavirusa [The Diffusion of Video Conferencing Services during the Coronavirus Pandemic]. *Vestnik TsEMI RAN — Bulletin CEMI RAS*, 2021, No. 2. [in Russian].
2. Porotikov A.A. Lokal'nye seti. Printsipy funktsionirovaniya [Local Networks. Functioning Principles]. *Alleya nauki — Science Alley*, 2020, Vol. 1, No. 7, pp. 900-902. [in Russian].
3. Shavetov S.V., Vedyakov A.A., Pyrkin A.A. Arkhitektura sistemy udalennogo upravleniya robototekhnicheskimi ob'ektami [The Architecture of the Remote Control System of Robotic Objects]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki — Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, No. 2 (90), pp. 161-163. [in Russian].
4. Süzen A.A., Duman B., Şen B. Benchmark Analysis of Jetson tx2, Jetson Nano and Raspberry PI Using Deep-CNN. *2020 International Congress*

on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). *IEEE*, 2020, pp. 1-5.

5. Loboiko A.V. Vybor optimal'noi konfiguratsii sistemy dlya peredachi videosignala na osnove odnoplattnogo mikrokom'pyutera [Choosing the Optimal Configuration of a System for Transmitting a Video Signal Based on a Single-Board Micro-computer]. *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики», posvyashchennoi Dnyu kosmonavтики: V 3 t.* [Collection of Materials of the V International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Aviation and Cosmonautics» Dedicated to the Day of Cosmonautics: In 3 vol.]. 2019, Vol. 2, pp. 143-145. [in Russian].

6. Van Rossum G. *An Introduction to Python*. Bristol, Network Theory Ltd., 2003. 115 p.

7. Jaganeshwari M.S.K., Djodilatchoumy D.R.S. An Automated Testing Tool Based on Graphical User Interface with Exploratory Behavioural

Analysis. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2022, Vol. 100, No. 22.

8. Strel'tsova A.S., Politkovskii D.B. Razrabotka chat-bota na Python [Development of a Chat-Bot on Python]. *Aktual'nye voprosy nauki i praktiki — Actual Questions of Science and Practice*, 2022, pp. 230-235. [in Russian].

9. Dargahi Nobari A., Reshadatmand N., Neshati M. Analysis of Telegram, an Instant Messaging Service. *Proceedings of the 2017 ACM on Conference on Information and Knowledge Management*, 2017, pp. 2035-2038.

10. Nekrasova E.A. Printsipial'nye osobennosti i sravnitel'nye kharakteristiki fail-servernoi, klient-servernoi i intranet-tekhnologii raspredeleniya i obrabotki dannykh [Principal Features and Comparative Data File Server, Client-Server and Intranet Technology Distribution and Data]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gumanitarnogo instituta — Bulletin of the North Caucasian Humanitarian Institute*, 2015, No. 2 (14), pp. 194-198. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 26.12.2022; одобрена после рецензирования 29.12.2022; принята к публикации 17.01.2023.*

*The article was submitted 26.12.2022; approved after reviewing 29.12.2022; accepted for publication 17.01.2023.*



Научная статья

УДК 681.5

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-144-155

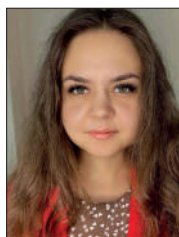
## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ ПРЕДПРИЯТИЯ



*Екатерина Анатольевна Шулаева*

*Ekaterina A. Shulaeva*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» Института химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия*



*Алена Андреевна Маринич*

*Alena A. Marinich*

*магистрант кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» Института химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия*

### Актуальность

Актуальность обеспечения информационной безопасности (ИБ) обусловлена увеличением объемов информации, циркулирующих в локальных вычислительных сетях (ЛВС), и расширением спектра задач, решаемых с помощью информационных систем (ИС). Проблема возникает в связи с ростом числа угроз и повышением уязвимости информационных ресурсов, что обусловлено действием таких факторов, как расширение спектра задач, решаемых ИС; повышение сложности алгоритмов обработки информации; увеличение объемов обрабатываемой информации; усложнение программных и аппаратных компонентов ЛВС, и соответственно — повышение вероятности наличия ошибок и уязвимостей; повышение агрессивности внешних источников данных (глобальных сетей); появление новых видов угроз.

К традиционным средствам обеспечения ИБ корпоративных сетей относят антивирусы, детекторы уязвимостей, межсетевые экраны и детекторы вторжений. Функции подобных систем защиты информации (СЗИ) специфичны и решают отдельные задачи обеспечения ИБ корпоративной сети и, как правило, могут быть преодолены при командной работе квалифицированной группы нарушителей. Подобные группы осведомлены о возможностях средств защиты, используемых в корпоративной сети, реагируют на обновления базы уязвимостей широко применяемого программного обеспечения (ПО), публикуемые в специальных изданиях и Интернете, оперативно обмениваются результатами зондирования защиты атакуемой корпоративной сети и гибко изменяют тактику осуществления вторжения.

### Ключевые слова

маршрутизатор, система мониторинга, среднее квадратическое отклонение, система, триггер, атака, алгоритм, защита, интеллектуальные средства, угрозы

**Цель работы**

Внедрение системы мониторинга СКС Zabbix и межсетевого экрана / маршрутизатора pfsense с реализацией управления информационным трафиком.

**Методы исследования**

- среда программирования Zabbix;
- среда программирования pfsense.

**Результаты**

В данной статье рассмотрено создание системы мониторинга Zabbix и системы pfsense на предприятии ООО «АСТ», г. Стерлитамак, Республика Башкортостан. В результате проведенной настройки и создания правил, а также внедрения мониторинга СКС предприятие получает систему защиты от несанкционированного доступа и системы защиты от атак корпоративной сети.

**Для цитирования:** Шулаева Е. А., Маринич А. А. Разработка системы мониторинга безопасности информационной среды предприятия // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 144-155. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-144-155>.

Original article

## DEVELOPMENT OF AN ENTERPRISE INFORMATION ENVIRONMENT SECURITY MONITORING SYSTEM

**The relevance**

The urgency of ensuring information security (IS) is due to the increase in the volume of information circulating in local area networks (LAN) and the expansion of the range of tasks solved with the help of information systems (IS), there is a problem associated with an increase in the number of threats and increased vulnerability of information resources. This is due to the action of factors such as: expanding the range of tasks solved by the IP; increasing the complexity of information processing algorithms; increasing the volume of processed information; complication of LAN software and hardware components, and, accordingly, an increase in the likelihood of errors and vulnerabilities; increased aggressiveness of external data sources (global networks); the emergence of new types of threats.

Traditional means of ensuring the information security of corporate networks include antiviruses, vulnerability detectors, firewalls and intrusion detectors. The functions of such information security systems are specific and solve individual tasks of ensuring the information security of a corporate network and, as a rule, can be overcome with the teamwork of a qualified group of violators. Such groups are aware of the capabilities of the security tools used in the corporate network, respond to updates of the vulnerability database of widely used software (software) published in special publications and the Internet, promptly exchange the results of probing the protection of the attacked corporate network and flexibly change the tactics of the invasion.

**Aim of research**

Implementation of Zabbix SCS monitoring system and pfsense firewall/router with implementation of information traffic management.

**Research methods:**

- Zabbix programming environment;
- pfsense programming environment.

**Ключевые слова**

router, monitoring system, standard deviation, system, trigger, attack, algorithm, protection, intellectual means, threats

## Results

This article discusses the creation of the Zabbix monitoring system and the pfSense system at the AST LLC enterprise, Bashkortostan Republic, Sterlitamak. As a result of the configuration and creation of rules, as well as the implementation of SCS monitoring, the enterprise receives a system of protection against unauthorized access and a system of protection against corporate network attacks.

**For citation:** Shulaeva E. A., Marinich A. A. Razrabotka sistemy monitoringa bezopasnosti informatsionnoi sredy predpriyatiya [Development of an Enterprise Information Environment Security Monitoring System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 144-155 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-1-144-155>.

Актуальность обеспечения информационной безопасности (ИБ) обусловлена увеличением объемов информации, циркулирующих в локальных вычислительных сетях (ЛВС), и расширением спектра задач, решаемых с помощью информационных систем (ИС). Проблема возникает в связи с ростом числа угроз и повышением уязвимости информационных ресурсов, что обусловлено действием таких факторов, как расширение спектра задач, решаемых ИС; повышение сложности алгоритмов обработки информации; увеличение объемов обрабатываемой информации; усложнение программных и аппаратных компонентов ЛВС, и соответственно — повышение вероятности наличия ошибок и уязвимостей; повышение агрессивности внешних источников данных (глобальных сетей); появление новых видов угроз [1].

К традиционным средствам обеспечения ИБ корпоративных сетей относят антивирусы, детекторы уязвимостей, межсетевые экраны и детекторы вторжений. Функции подобных систем защиты информации (СЗИ) специфичны и решают отдельные задачи обеспечения ИБ корпоративной сети и, как правило, могут быть преодолены при командной работе квалифицированной группы нарушителей. Подобные группы осведомлены о возможностях средств защиты, используемых в корпоративной сети, реагируют на обновления базы уязвимо-

стей широко применяемого программного обеспечения (ПО), публикуемые в специальных изданиях и Интернете, оперативно обмениваются результатами зондирования защиты атакуемой корпоративной сети и гибко изменяют тактику осуществления вторжения [2].

Информационная безопасность ЛВС все в большей степени обеспечивается за счет включения интеллектуальных средств в состав систем обнаружения компьютерных атак (СОА).

Достоинством интеллектуальных средств защиты является наличие элементов самоорганизации и эволюции, которые используются для оперативных действий в СЗИ по классификации угроз и нейтрализации последствий вторжения.

Общей чертой большинства существующих систем защиты информации является наличие средств идентификации атак (задача классификации) и оперативной реакции на несанкционированные проникновения в корпоративную сеть, а общим недостатком — отсутствие в системах защиты функций накопления и обобщения опыта взаимодействия корпоративной сети с внешней средой и нейтрализацию угроз.

Атаки бывают активные и пассивные. Активные делятся на активный сбор информации, нарушение работы и без последствий. В работе рассматривается классификация атак активные, а именно отказ в обслуживании. Наиболее извест-

ная форма хакерских атак Denial of Service (DoS). Кроме того, против атак такого типа труднее всего создать сто-процентную защиту.

DDoS-атака — распределенная атака, направленная на отказ в обслуживании. В результате атаки такого типа атакуемый сетевой ресурс получает лавинообразное количество запросов, которые не успевает обработать. Источником вредоносных запросов являются так называемые зомби-сети, состоящие большей частью из компьютеров обычных пользователей, в силу каких-то причин, зараженных вредоносным ПО. Нападения DDoS-атак являются одними из самых пугающих угроз, с которыми сталкиваются современные предприятия. Некоторые формы атаки могут иметь финансовые последствия. Успешная атака DDoS не только выводит из строя на значительный период времени, но может даже привести к сбоям в работе некоторых систем [3–5].

К наиболее популярным методам можно отнести группу методов, основанных на количественном анализе. Методы данной группы пытаются обнаружить атаку по возрастающей нагрузке. Среди этой группы методов можно выделить следующие:

— метод MULTOPS анализирует соотношение принятых и отправленных пакетов;

— метод MIB variables учитывает количество пакетов, их тип и количество запросов. Методы ACC учитывают количество пакетов из различных подсетей;

— в Network-Aware Clustering происходит группировка входящих запросов по подсетям и их сравнение. В Hop-Count Filtering ведется учет расстояний в хопх (скачках) до подсетей для фильтрации пакетов с ложным адресом отправителя. Метод Gateway based разделяет проходящий трафик на потоки на основе величины «поражающего воздействия».

D-Ward проверяет легитимность трафика по протоколам [6–8].

Начало DDoS-атаки связано с увеличением числа запросов к атакуемому серверу. Таким образом, для фиксации факта атаки необходимо установить границу по количеству запросов к серверу, при нарушении которой однозначно будет фиксироваться нештатная ситуация [9].

Для решения необходимо использовать скользящую оценку, характеризующую текущую сетевую активность. На основании этой оценки устанавливать динамическую границу, актуальную для периода возможного начала атаки [10, 11]. В качестве скользящей оценки можно использовать среднееквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — среднееквадратическое отклонение;

$n$  — количество рассматриваемых временных периодов;

$x_i$  — количество запросов за  $i$ -период;

$\bar{x}$  — среднее арифметическое запросов во всем периоде.

Разрабатываем алгоритм, который составляет основу способа обнаружения DDoS-атак и вредоносного трафика, и в общем виде может быть записан следующим образом.

1) С помощью накопленных статистических данных определяем существующие сезонные периоды.

2) Для каждого сезонного периода определяем допустимую верхнюю границу количества запросов.

3) В случае нарушения границы фиксируем точку начала атаки.

4) Относим весь, предшествующий началу атаки, трафик к кластеру, соответствующему благонадежному трафику.

5) С помощью алгоритма  $k$ -means классифицируем смешанный трафик на благонадежный и вредоносный.

6) Сравниваем трафик, предшествующий началу атаки, с кластером благонадежного трафика, выделенного из смешанного трафика.

7) На основании результатов, полученных в предыдущем шаге, и с учетом выработанных критериев успешности корректируем кластеры.

8) Весь поступающий трафик анализируем с учетом полученных в предыдущем пункте результатов.

Алгоритм адаптации СКС ООО «АСТ» к атакам и выделению вредоносного трафика реализован в следующем программном комплексе (рисунки 1–14).

Определение начала атаки.

Базовое состояние (рисунок 1).

Время ответа сервера составляет в среднем 0,25 мс (рисунки 2, 3).

Для определения атак используем сбор элементов данных, в данном случае этот элемент данных обрабатывает «время ответа сервера» (рисунки 4–6).

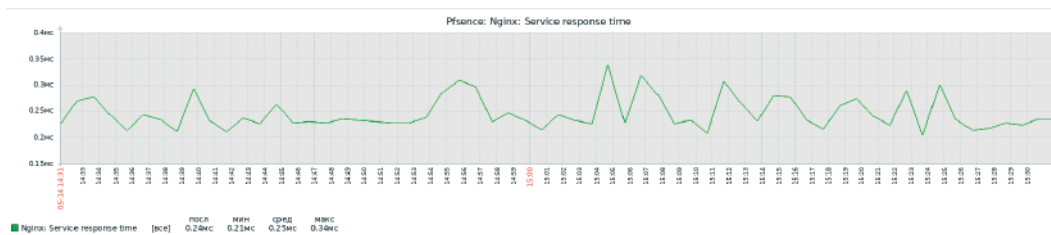


Рисунок 1. Базовое состояние Pfsense

Figure 1. Basic state of Pfsense



Рисунок 2. Нормальное состояние процессора

Figure 2. Normal state of the processor

Рисунок 3. Элементы данных

Figure 3. Data elements

Настройка триггера по среднеквадратическому отклонению, на основе «времени ответа сервера» прописываем рассчитанное значение порога.

При срабатывании триггера Zabbix отправит оповещение и запустит скрипт изменения NAT и маршрутизации (рисунок 7).

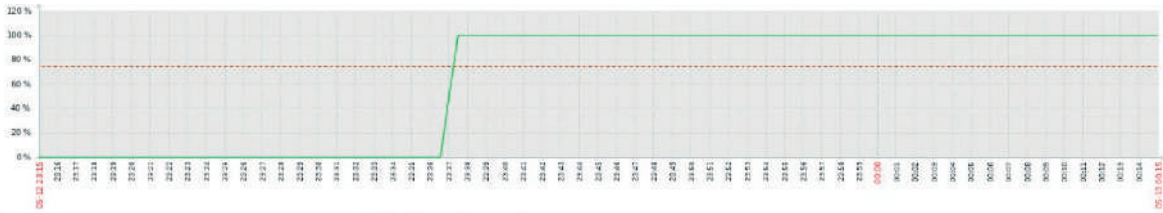


Рисунок 4. Граница нарушена

Figure 4. The border is broken

Рисунок 5. Настройка триггера по среднеквадратическому отклонению

Figure 5. Setting the trigger by standard deviation



Рисунок 6. Среднеквадратическое отклонение

Figure 6. Standard deviation

Имя	Последняя проверка	Последнее значение	Изменение	Иконка	Имя
Узел сети					
ProbeNet	Available memory	47с	3.45 GB	-80 KB	График
ProbeNet	Checksum of infopassed				История
ProbeNet	Control switches per second	2с	3.4 Kpps	-487 app	График
ProbeNet	CPU idle time	1m 1с	98.2362 %	+0.6956 %	График
ProbeNet	CPU interrupt time	1m	1.2544 %	+0.1934 %	График
ProbeNet	CPU nice time	59с	0.1241 %	-0.01347 %	График
ProbeNet	CPU system time	58с	0.3201 %	-0.07084 %	График
ProbeNet	CPU user time	57с	0.09799 %	-0.7807 %	График
ProbeNet	Filesystem: Free disk space on /	44с	260.59 GB	-28 KB	График
ProbeNet	Filesystem: Free disk space on / (percentage)	41с	99.4655 %	-0.00001 %	График
ProbeNet	Filesystem: Free disk space on /varrun	43с	3 MB		График
ProbeNet	Filesystem: Free disk space on /varrun (percentage)	41с	95.0259 %		График
ProbeNet	Filesystem: Free inodes on / (percentage)	46с	99.9365 %	+0.000003 %	График
ProbeNet	Filesystem: Free inodes on /varrun (percentage)	45с	95.489 %		График
ProbeNet	Filesystem: Total disk space on /	51m 40с	264.77 GB		График
ProbeNet	Filesystem: Total disk space on /varrun	51m 39с	2.4 MB		График
ProbeNet	Filesystem: Used disk space on /	39с	1.4 GB	-24 KB	График
ProbeNet	Filesystem: Used disk space on /varrun	37с	140 KB		График
ProbeNet	Free swap space	54с	4 GB		График
ProbeNet	Free swap space in %	43с	100 %		График
ProbeNet	Host boot time	3m 7с	08.04.2022 17:07:28		График
ProbeNet	Host local time	55с	14.05.2022 17:14:28	+00:01:00	График
ProbeNet	Host name	21m 52m 56с	probeNet-EventLocal		История
ProbeNet	Host name of Zabbix agent running	21m 52m 14с	ProbeNet		История
ProbeNet	Interrupts per second	6с	1.49 Kpps	-245 ops	График
ProbeNet	Maximum number of opened files	53m 11с	120091		График
ProbeNet	Maximum number of processes	53m 10с	9428		График

Рисунок 7. Таблица данных накопленных Zabbix на текущий момент

Figure 7. Table of data accumulated by Zabbix at the moment

Определяем нелегитимный трафик при ошибках на сервере, сервер их запишет в Log файл.

```
2022/05/14 11:34:54 [error] 76073#100154: *422469 open() "/usr/local/www/server-status" failed (2: No such file or directory), client: 178.134.52.70, server: , request: "GET /server-status?auto HTTP/1.1", host: "178.134.52.70".
```

```
2022/05/14 11:34:54 [error] 76073#100154: *422469 open() "/usr/local/www/server-status" failed (2: No such file or directory), client: 173.77.217.250, server: , request: "GET /server-status?auto HTTP/1.1", host: "173.77.217.250".
```

```
2022/05/14 11:34:54 [error] 76073#100154: *422469 open() "/usr/local/www/server-status" failed (2: No such file or directory), client: 125.229.42.80, server: , request: "GET /server-status?auto HTTP/1.1", host: "125.229.42.80".
```

```
2022/05/14 11:34:54 [error] 76073#100154: *422469 open() "/usr/local/www/server-status" failed (2: No such file or directory), client: 37.0.11.130, server: , request: "GET /server-status?auto HTTP/1.1", host: "37.0.11.130".
```

```
2022/05/14 11:34:54 [error] 76073#100154: *422469 open() "/usr/local/www/server-status" failed (2: No such file or directory), client: 173.77.217.250, server: , request: "GET /server-status?auto HTTP/1.1", host: "173.77.217.250".
```

```
2022/05/14 11:34:54 [error] 76073#100154: *422469 open() "/usr/local/www/server-status" failed (2: No such file or directory), client: 173.77.217.250, server: , request: "GET /server-status?auto HTTP/1.1", host: "173.77.217.250".
```

Получение из логов IP адреса (рисунок 8).

```
cat /var/log/nginx/access.log | cut -d' ' -f15 | sort | uniq -c >> /etc/advhosts
```

**Рисунок 8.** Листинг 1.1 — Ошибка на сервере

**Figure 8.** Listing 1.1 — Error on the server

Добавим их в список как нелегитимный трафик, данный список будет вызываться триггером «среднеквадратичное отклонение» (рисунок 9).

Указываем условие, наш триггер создан выше (рисунок 10).

В деталях операции включаем оповещение (рисунок 11).

Следующим шагом указываем запуск скрипта (рисунки 12, 13).

Действия

Действие    Операции

\* Имя

Условия	Подпись	Имя	Действие
A	Триггер равно	$RfSense: \text{среднеквадратическое отклонение}$	<a href="#">Удалить</a>

[Добавить](#)

Активировано

\* Должна существовать по крайней мере одна операция.

[Добавить](#)    [Отмена](#)

**Рисунок 9.** Условие

**Figure 9.** Condition

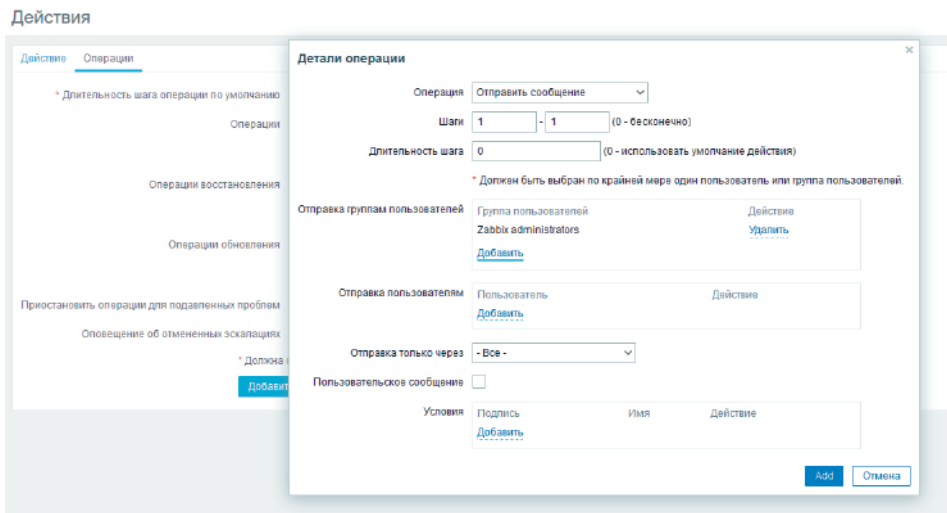


Рисунок 10. Детали операции

Figure 10. Operation details

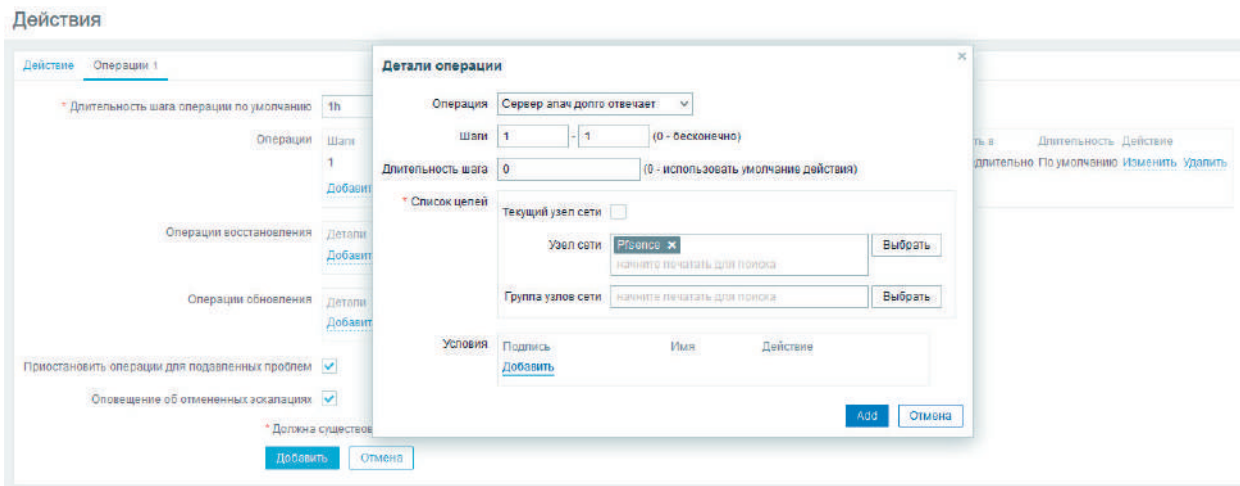


Рисунок 11. Детали операции

Figure 11. Operation Details

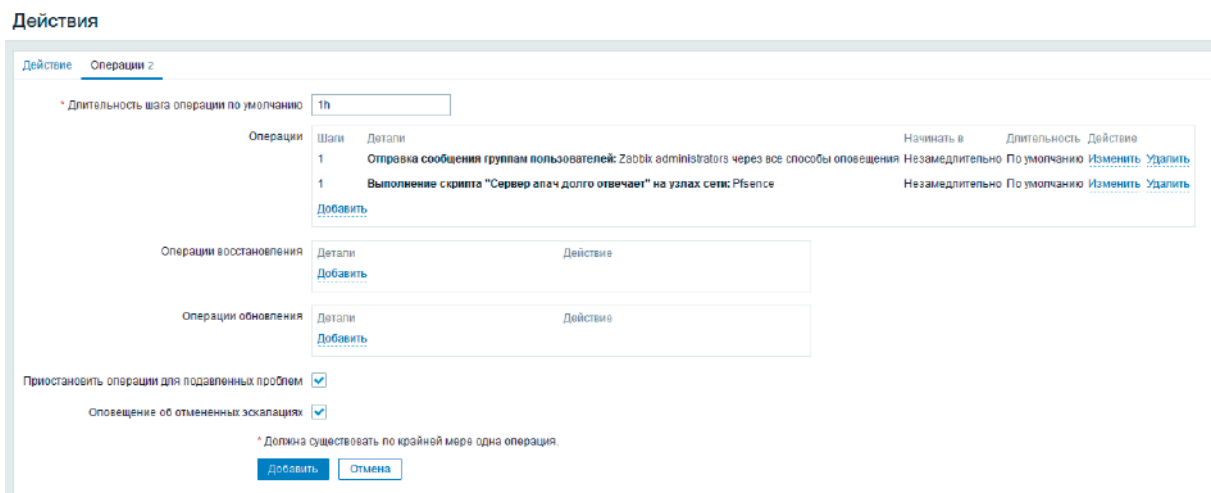


Рисунок 12. Содержание действия

Figure 12. The content of the action



## Скрипты

\* Имя:

Область:  Операция действия  Действие вручную над узлом сети  Действие вручную над событиями

Тип:  Webhook  Скрипт  SSH  Telnet  IPMI

Выполнение на:  Zabbix агент  Zabbix сервер (прокси)  Zabbix сервер

\* Команды: 

```
pfctl -t addhosts -j replace -f /etc/addhosts
```

Описание:

Группа узлов сети:

Рисунок 13. Содержание скрипта

Figure 13. The content of the script

Содержание скрипта, передаваемого посредством Zabbix на pfSense (рисунок 14).

Для возврата в исходное состояние добавим операции восстановления таким же образом.

Таким образом, описана процедура разработки Zabbix-системы для мониторинга информационной среды предприятия и межсетевого экрана / маршрутизатора pfSense в виде блок-схемы алго-

ритма адаптации СКС ООО «АСТ» к атакам и выделению вредоносного трафика и реализована в программном комплексе [12–14].

Эффективная и надежная система обнаружения атак позволяет собирать, обобщать и анализировать информацию от множества удаленных сенсоров на центральной консоли. Она позволяет сохранять эту информацию для более позднего анализа и предоставляет сред-

## Действия

Действие:

\* Длительность шага операции по умолчанию:

Операции	Шаги	Детали	Начинать в	Длительность	Действие
Операции	1	Отправка сообщения группам пользователей: Zabbix administrators через все способы оповещения	Незамедлительно	По умолчанию	<a href="#">Изменить</a> <a href="#">Удалить</a>
	1	Выполнение скрипта "Сервер апач долго отвечает" на узлах сети: PfSense	Незамедлительно	По умолчанию	<a href="#">Изменить</a> <a href="#">Удалить</a>
<a href="#">Добавить</a>					
Операции восстановления	Детали				Действие
	Выполнение скрипта "нормализация сервера" на узлах сети: PfSense				<a href="#">Изменить</a> <a href="#">Удалить</a>
	Отправка сообщения группам пользователей: Zabbix administrators через все способы оповещения				<a href="#">Изменить</a> <a href="#">Удалить</a>
<a href="#">Добавить</a>					
Операции обновления	Детали				Действие
<a href="#">Добавить</a>					

Приостановить операции для подавленных проблем:

Оповещение об отмененных эскалациях:

\* Должна существовать по крайней мере одна операция.

Рисунок 14. Возврат в исходное состояние

Figure 14. Return to the original state

ства для проведения такого анализа. Эта система постоянно контролирует все установленные модули слежения и мгновенно реагирует в случае возникновения тревоги [16–20].

### Выводы

Описана процедура разработки Zabbix-системы для мониторинга информационной среды предприятия и межсетевого экрана / маршрутизатора pfSense в

виде блок-схемы алгоритма адаптации СКС ООО «АСТ» к атакам и выделению вредоносного трафика и реализована в программном комплексе.

В результате проведенной настройки и создания правил, а также внедрения мониторинга СКС предприятие получает систему защиты от несанкционированного доступа и системы защиты от атак корпоративной сети.

### Список источников

1. DDoS Attacks in Q1 2020 [Электронный ресурс]. <https://securelist.com/ddos-attacks-in-q1-2020/96837/> (дата обращения: 10.04.2022).
2. AWS and Akamai Fend off Two Record DDoS Attacks [Электронный ресурс]. <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/aws-and-akamai-fend-two-record-ddos-attacks/> (дата обращения: 10.04.2022).
3. Duration of Application DDoS Attacks Increasing, Some go on for Days [Электронный ресурс]. <https://www.helpnetsecurity.com/2020/06/25/application-ddos-attacks/> (дата обращения: 10.04.2022).
4. Securelist — DDoS-атаки в I квартале 2021 года. 2021. <https://securelist.ru/ddos-attacks-in-q1-2021/101390/> (дата обращения: 10.04.2022).
5. Басканов А.Н. Способы противодействия и средства раннего выявления DDoS-атак // Экономика и качество систем связи. 2019. № 3 (13). С. 68-76. <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-protivodeystviya-i-sredstva-rannego-vyyavleniya-ddos-atak> (дата обращения: 10.04.2022).
6. Афанасьева Д.В. Проблема DDoS-атак // Наука, образование и культура. 2019. № 2 (36). С. 21-22. <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-ddos-atak> (дата обращения: 10.04.2022).
7. Doriguzzi-Corin R. Lucid: A Practical, Lightweight Deep Learning Solution for DDoS Attack Detection // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2020. Feb. P. 1-14.
8. Марухленко А.Л., Плугатарев А.В., Таныгин М.О. Вариант разграничения доступа к информационным ресурсам на основе неявной аутентификации и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 108-121. DOI: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-108-121>.
9. Описание RabbitMQ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rabbitmq.com/> (дата обращения: 21.04.2022).
10. Wani A., Revathi S. DDoS Detection and Alleviation in IoT Using SDN (SDIoT-DDOS-DA) // Journal of the Institution of Engineers (India): Series B. 2020. Vol. 101. No. 2. P. 117-128.
11. Камышев С.В., Карманов И.Н. Проблемы DDoS-атак в современной IT-индустрии и методы защиты от них // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 9. С. 121-125.
12. Galeano-Brajones J., Carmona-Murillo J., Valenzuela-Valdés J.F., Luna-Valero F. Detection and Mitigation of DoS and DDoS Attacks in IoT-Based stateful SDN: an Experimental Approach // Sensors. 2020. Vol. 20. No. 3. P. 816.
13. Крыгин Н.Д. DDoS-атаки и защиты от них // Столыпинский вестник. 2022. Т. 4. № 4. С. 121-125.
14. Ермакова А.Ю. Модели DDoS-атак и исследование защищенности информационной системы от данного типа угроз // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 12. С. 54-59.
15. Gaur V., Kumar R. FSMDAD: Feature Selection Method for DDoS Attack Detection // Proceedings of the International Conference on Electronics and Renewable Systems, ICEARS 2022. 2022. P. 939-944.
16. Wei Y., Jang-Jaccard J., Singh A., Xu W., Sabrina F., Camtepe S. AE-MLP: a Hybrid Deep Learning Approach for DDoS Detection and Classification // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 146810-146821.
17. Zhang M., Liu X., Tang J., Kong H. Study on Modeling and Simulation of DDoS Active Defense // Xitong Fangzhen Xuebao. 2014. Vol. 26. No. 11. P. 2698-2703.
18. Зебров Д.А. Виды DDoS атак и методы защиты распределенной сети // Научный альманах. 2020. № 11-2 (73). С. 60-66.

19. Chugunkov I.V., Fedorov L.O., Achmiz B.S., Sayfullina Z.R. Development of the Algorithm for Protection against DDoS-Attacks of Type Pulse Wave // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. 2018. P. 292-294.

20. Пат. 2676021 РФ, МПК С 06 F 21/25. Система и способ определения DDoS-атак / Халимоненко А.А., Тихомиров А.В., Коноплев С.В. 2017125333, Заявлено 17.07.2017; Опубл. 25.12.2018. Бюл. 36.

### References

1. *DDoS Attacks in Q1 2020* [Electronic Resource]. <https://securelist.com/ddos-attacks-in-q1-2020/96837/> (accessed 10.04.2022).

2. *AWS and Akamai Fend off Two Record DDoS Attacks* [Electronic Resource]. <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/aws-and-akamai-fend-two-record-ddos-attacks/> (accessed 10.04.2022).

3. *Duration of Application DDoS Attacks Increasing, Some Go on for Days* [Electronic Resource]. <https://www.helpnetsecurity.com/2020/06/25/application-ddos-attacks/> (accessed 10.04.2022).

4. *Securelist — DDoS-ataki v I kvartale 2021 goda* [Securelist — DDoS Attacks in Q1 2021]. 2021. <https://securelist.ru/ddos-attacks-in-q1-2021/101390/> (accessed 10.04.2022). [in Russian].

5. Baskanov A.N. Sposoby protivodeistviya i sredstva rannego vvyavleniya DDoS-atak [Ways to Counter and Early Detection of DDoS Attacks]. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi — Economy and Quality of Communication Systems*, 2019, No. 3 (13), pp. 68-76. <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-protivodeystviya-i-sredstva-rannego-vvyavleniya-ddos-atak> (accessed 10.04.2022). [in Russian].

6. Afanas'eva D.V. Problema DDoS-atak [The Problem of DDoS Attacks]. *Nauka, obrazovanie i kul'tura — Science, Education and Culture*, 2019, No. 2 (36), pp. 21-22. <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-ddos-atak> (accessed 10.04.2022). [in Russian].

7. Doriguzzi-Corin R. Lucid: A Practical, Lightweight Deep Learning Solution for DDoS Attack Detection. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2020, Feb., pp. 1-14.

8. Marukhlenko A.L., Plugatarev A.V., Tanygin M.O. Variant razgranicheniya dostupa k informatsionnym resursam na osnove neyavnoi autentifikatsii i dr. [Variant of Differentiation of Access to Information Resources on the Basis of

Implicit Authentication, etc.]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta — Proceedings of the South-Western State University*, 2020, Vol. 24, No. 2, pp. 108-121. doi: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-108-121>. [in Russian].

9. *Opisanie RabbitMQ* [Description of RabbitMQ]. [Electronic Resource]. URL: <http://www.rabbitmq.com/> (accessed 21.04.2022). [in Russian].

10. Wani A., Revathi S. DDoS Detection and Alleviation in IoT Using SDN (SDIOT-DDOS-DA). *Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*, 2020, Vol. 101, No. 2, pp. 117-128.

11. Kamyshov S.V., Karmanov I.N. Problemy DDoS-atak v sovremennoi IT-industrii i metody zashchity ot nikh [Problems of DDoS Attacks in the Modern IT Industry and Protection against Them]. *Interespo Geo-Sibir' — Interexpo Geo-Siberia*, 2018, No. 9, pp. 121-125. [in Russian].

12. Galeano-Brajones J., Carmona-Murillo J., Valenzuela-Valdés J.F., Luna-Valero F. Detection and Mitigation of DoS and DDoS Attacks in IoT-Based stateful SDN: an Experimental Approach. *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 3, pp. 816.

13. Krygin N.D. DDoS-ataki i zashchity ot nikh [DDoS Attacks and Protection against Them]. *Stolypinskii vestnik — Stolypin Bulletin*, 2022, Vol. 4, No. 4, pp. 121-125. [in Russian].

14. Ermakova A.Yu. Modeli DDoS-atak i issledovanie zashchishchennosti informatsionnoi sistemy ot dannogo tipa ugroz [Models of DDoS Attacks and Studies of System Security against This Type of Threat]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery — Industrial ACS and Controllers*, 2019, No. 12, pp. 54-59. [in Russian].

15. Gaur V., Kumar R. FSMDDAD: Feature Selection Method for DDoS Attack Detection. *Proceedings of the International Conference on Electronics and Renewable Systems, ICEARS 2022*, 2022, pp. 939-944.

16. Wei Y., Jang-Jaccard J., Singh A., Xu W., Sabrina F., Camtepe S. AE-MLP: a Hybrid Deep Learning Approach for DDoS Detection and Classification. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 146810-146821.

17. Zhang M., Liu X., Tang J., Kong H. Study on Modeling and Simulation of DDoS Active Defense. *Xitong Fangzhen Xuebao*, 2014, Vol. 26, No. 11, pp. 2698-2703.

18. Zebrov D.A. Vidy DDoS atak i metody zashchity raspredelennoi seti [Types of DDoS Attacks and Methods for Protecting a Distributed Network]. *Nauchnyi al'manakh — Scientific Almanac*, 2020, No. 11-2 (73), pp. 60-66. [in Russian].

19. Chugunkov I.V., Fedorov L.O., Achmiz B.S., Sayfullina Z.R. Development of the Algorithm for Protection against DDoS-Attacks of Type Pulse Wave. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*, 2018, pp. 292-294.

20. Khalimonenko A.A., Tikhomirov A.V., Konoplev S.V. *Sistema i sposob opredeleniya DDoS-atak* [System and Method for Detecting DDoS Attacks]. Patent RF, No. 2676021, 2018. [in Russian].

*Статья поступила в редакцию 28.11.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 17.01.2023.*

*The article was submitted 28.11.2022; approved after reviewing 15.12.2022; accepted for publication 17.01.2023.*

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Альмухаметов Азат Ахатович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Афлятунов Радмир Рифович**

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

### **Баязитов Фанур Анурович**

магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Бодылев Андрей Сергеевич**

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

### **Васильев Петр Игоревич**

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

### **Гарифуллина Алсу Радиковна**

кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия

### **Гильманов Эдуард Ахнафович**

кандидат технических наук, главный энергетик, ГУП РБ «Уфаводоканал», Уфа, Россия

### **Евдокимов Александр Андреевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и электроэнергетика», Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

### **Ишемгужин Александр Измайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Каекбирдина Ильгиза Далховна**

магистрант, инженер-исследователь кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

### **Кириллов Роман Вячеславович**

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

### **Копытин Игорь Иванович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровая энергетика», Курганский государственный университет, Курган, Россия

---

**Лобанов Андрей Владимирович**

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

**Маринич Алена Андреевна**

магистрант кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» Института химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

**Павлов Александр Дмитриевич**

учащийся, МБОУ «Инженерный лицей № 83 имени Пинского М.С. УГНТУ», Уфа, Россия

**Петков Роберт Эдуардович**

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

**Раков Иван Витальевич**

инженер 1 категории группы внедрения инноваций и изобретательской деятельности, ООО «Газпром трансгаз Томск», Томск, Россия

**Ревякин Егор Евгеньевич**

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

**Саттаров Роберт Радилович**

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

**Сидоров Алексей Владимирович**

аспирант кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Сидоров Сергей Владимирович**

старший преподаватель кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Соловьев Богдан Алексеевич**

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

**Сухачев Илья Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**Сушков Валерий Валентинович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика», Нижневартковский государственный университет, Нижневартковск, Россия; профессор кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

---

**Филиппов Владимир Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Хазиева Регина Тагировна**

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

**Халиков Альберт Рашитович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

**Хамитов Рустам Нуриманович**

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

**Чарыков Виктор Иванович**

доктор технических наук, профессор, профессор структурного подразделения высшего образования «Курганский институт железнодорожного транспорта» – филиал Уральского государственного университета путей сообщения, Курган, Россия

**Чернявская Ирина Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер СП «Татнефть-Добыча», Альметьевск, Россия

**Шулаева Екатерина Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» Института химических технологий и инжиниринга, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

**Юсупова Юлия Раилевна**

магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Янгиров Ильгиз Флюсович**

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

**Ярыш Равия Фоатовна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики, Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Aflyatunov Radmir R.**

Postgraduate Student, Assistant of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Almukhametov Azat A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Bayazitov Fanur A.**

Undergraduate Student of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Bodylev Andrey S.**

Postgraduate Student, Assistant of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Charykov Viktor I.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Kurgan Institute of Railway Transport – branch of the Ural State University of Railway Transport, Kurgan, Russia

### **Chernyavskaya Irina A.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Engineer of the Tatneft-Dobycha JV, Almetyevsk, Russia

### **Evdokimov Alexander A.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Radioelectronics and Electric Power Engineering Department, Surgut State University, Surgut, Russia

### **Filippov Vladimir N.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Garifullina Alsu R.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia

### **Gilmanov Eduard A.**

Candidate of Engineering Sciences, Chief Power Engineer, State Unitary Enterprise of Bashkortostan Republic «Ufavodokanal», Ufa, Russia

### **Ishemgulin Aleksandr I.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### **Kaekbirdina Ilgiza D.**

Undergraduate Student, Research Engineer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia



---

**Khalikov Albert R.**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Khamitov Rustam N.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electrical Equipment Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia; Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Khazieva Regina T.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, 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

**Kopytin Igor I.**

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Digital Power Engineering Department, Kurgan State University, Kurgan, Russia

**Lobanov Andrey V.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Marinich Alena A.**

Undergraduate Student of Automated Technological and Information Systems Department, Institute of Chemical Technology and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Sterlitamak, Russia

**Pavlov Alexander D.**

Student, MBEI «Engineering Lyceum No. 83 named after Pinsky M.S. USPTU», Ufa, Russia

**Petkov Robert E.**

Undergraduate Student of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Rakov Ivan V.**

Innovations and Inventive Activity Engineer 1 Category, Gazprom transgaz Tomsk LLC, Tomsk, Russia

**Revyakin Egor E.**

Postgraduate Student of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Sattarov Robert R.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities 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

**Sidorov Alexei V.**

Postgraduate Student of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Sidorov Sergei V.**

Senior Lecturer of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Solovev Bogdan A.**

Undergraduate Student, Engineer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Sukhachev Ilya S.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor. Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Sushkov Valery V.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Power Engineering Department, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia; Professor of Electric Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

**Vasilyev Petr I.**

Postgraduate Student, Assistant of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

**Yangirov Ilgiz F.**

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

**Yarysh Raviya F.**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia

**Yusupova Julia R.**

Undergraduate Student of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

## Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 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 работы, 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.**