

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3, т. 19, 2023

Подписной индекс ПБ092 в каталоге «Почта России».

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

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



Electrical and data processing facilities and systems

No. 3, Vol. 19, 2023

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

№ 3, т. 19, 2023

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

Учредитель

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

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458

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

Журнал включен:

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

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

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

Свободная цена. **12+**

Дата выхода в свет: 17.11.2023 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 24.99.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 141.

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

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

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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



Зам. главного редактора:

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



Члены редакционной коллегии:

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

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

No. 3, Vol. 19, 2023

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

Founder

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

International standard serial number
ISSN 1999-5458

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

The journal is included:

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

Subscription through Russian Post. Subscription Index ПБ092.

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

Price is free. **12+**

Date of publication 17.11.2023. Paper format 60×84/8.
Offset printing. 24.99 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 141.

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

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

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

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

Editorial board:

Editor-in-chief:

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



Deputy editor-in-chief:

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



Members of editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Николаев А. А., Афанасьев М. Ю., Маклаков А. С., Буланов М. В.

Методика выбора параметров пассивного фильтра для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с активными выпрямителями 9

Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Уразбахтин Р. Р., Месропян А. В.

Разработка и исследования бесконтактного электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов 26

Демин А. Ю., Пашали Д. Ю., Заманова Г. И., Нафикова Р. М.

Адаптация диагностики по методу И. Накатани к использованию измерительных генераторов заданной электрической мощности и цифровой обработке данных 39

Барвинов А. В., Хамитов Р. Н., Ганичева Л. С., Жеребцов С. Н.

Электроснабжение маломощных потребителей, установленных на нефтепроводах в удаленных районах Крайнего Севера 49

Косарев Б. А., Кошук Г. А., Лазарев Д. В., Охотников А. А., Хамитов Р. Н.

Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах в условиях распределенной генерации при резкопеременном характере нагрузки потребителя 64

Кондрашова Ю. Н., Ефименко А. М., Снигур А.

Оценка влияния баланса мощностей на результирующую устойчивость генераторов с учетом реконструкции в аварийных и послеаварийных режимах применительно к энергетическому узлу предприятия черной металлургии 74

Королев В. И.

Прогнозный мониторинг технического состояния путем анализа составляющих сигнала вибрации подшипников вращающихся электрических машин 89

Раков И. В.

Методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности 101

Янгиров И. Ф., Халиков А. Р., Федосов Е. М., Лобанов А. В., Тергулов Т. Р., Максудов Д. В., Стыскин А. В.

Электромеханический вибрационный преобразователь с замкнутым спиральным вторичным элементом и улучшенными характеристиками 118

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

Анализ современных методов диагностирования газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами на объектах добычи нефти 133

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Хамитов Р. Н., Зыкин П. В.

Синтез системы управления шероховатостью на основе нечеткой логики
посредством программного пакета MATLAB SIMULINK 145

Сафиуллин Р. А.

Управление плаванием композитного электромеханического микроробота 153

Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Зайцев Е. А., Култаев Д. Р., Белявцев М. В.

Разработка алгоритма навигации и формирование безопасных траекторий
автономного полета беспилотного летательного аппарата в условиях
многочисленных помех и препятствий 167

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

Разработка алгоритма управления группой беспилотных летательных аппаратов
самолетного типа 179

Рохлов В. А., Хамитов Р. Н., Захаров И. Л., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С.

Информационное обеспечение системы оптимального управления конфигурацией
распределительной сети 189

Об авторах 206

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Nikolaev A. A., Afanasev M. Yu., Maklakov A. S., Bulanov M. V.</i>	
Methodology for selecting parameters of a passive filter to improve the quality of electricity in electric networks with an active rectifier	9
<i>Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Urazbakhtin R. R., Mesropyan A. V.</i>	
Development and research of brushless electric motor for unmanned aerial vehicles	26
<i>Demin A. Yu., Pashali D. Yu., Zamanova G. I., Nafikova R. M.</i>	
Adaptation of diagnostics by I. Nakatani's method to the use of measuring generators with prescribed electrical power and digital data processing	39
<i>Barvinov A. V., Khamitov R. N., Ganicheva L. S., Zhrebtsov S. N.</i>	
Power supply for low-power consumers installed on oil pipelines in remote areas of the Far North	49
<i>Kosarev B. A., Koshchuk G. A., Lazarev D. V., Okhotnikov A. A., Khamitov R. N.</i>	
Methods for maintaining voltage and frequency values within acceptable limits in conditions of distributed generation with a sharply variable nature of the load of the consumer	64
<i>Kondrashova Yu. N., Efimenko A. M., Snigur A.</i>	
Estimation of the influence of the capacity balance on the resulting stability of generators taking into account reconstruction in emergency and post-emergency modes as applied to the power unit of the ferrous metallurgy enterprise	74
<i>Korolev V. I.</i>	
Predictive monitoring of technical condition by analyzing the vibration signal components of rotating electric machine bearings	89
<i>Rakov I. V.</i>	
Methodology for evaluating parameters of the electrical complex «Cable line – Induction motor» based on power consumption balance	101
<i>Yangirov I. F., Khalikov A. R., Fedosov E. M., Lobanov A. V., Teregulov T. R., Maksudov D. V., Styskin A. V.</i>	
Electromechanical vibration transducer with a closed spiral secondary element and improved characteristics	118
<i>Zayniev A. V., Shaydullin V. F., Khakimyanov M. I.</i>	
Analysis of modern methods for diagnosis of gas piston units with synchronous generators at oil production facilities	133

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

Khamitov R. N., Zykin P. V.

Synthesis of fuzzy logic roughness control system by MATLAB SIMULINK software package 145

Safullin R. A.

Swimming control of a composite electromechanical microrobot 153

Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Zaitsev E. A., Kultaev D. R., Belyavtsev M. V.

Development of navigation algorithm and formation of safe trajectories of autonomous flight of an unmanned aerial vehicle under conditions of numerous interferences and obstacles 167

Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Zaitsev E. A., Kultaev D. R., Belyavtsev M. V., Silin I. P.

Development of a control algorithm for a group of aircraft-type unmanned aerial vehicles 179

Rokhlov V. A., Khamitov R. N., Zakharov I. L., Zherebtsov S. N., Ganicheva L. S.

Information support of optimal distribution network configuration management system 189

About the Authors 206

Научная статья

УДК [621.314.26+621.316.94+621.317.757]:621.311.1

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-9-25

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ



Александр Аркадьевич Николаев

Aleksandr A. Nikolaev

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



Максим Юрьевич Афанасьев

Maksim Yu. Afanasev

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



Александр Сергеевич Маклаков

Alexander S. Maklakov

*кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник научно-инновационного сектора,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия*



Михаил Викторович Буланов

Mikhail V. Bulanov

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

Актуальность

В связи с большим распространением компактных металлургических заводов, использующих в своем составе мощные приводы с преобразователями частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ), актуальной задачей стала борьба с резонансными явлениями в электрических сетях среднего напряжения, поскольку данные преобразователи несмотря на их значительные достоинства обладают недостатком — ухудшается качество электроэнергии в системе электроснабжения 6–35 кВ.

Существующие способы борьбы с резонансными явлениями в электрических сетях среднего напряжения, в которых присутствуют нели-

Ключевые слова

преобразователь частоты, активный выпрямитель, высшие гармоники, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость, резонанс токов, специализированный пассивный фильтр

нейные элементы, такие как мощные приводы прокатных станов с ПЧ-АВ, применяемых в системах электроснабжения металлургических предприятий, не всегда позволяют изменить ситуацию в лучшую сторону.

Одним из способов решения данной проблемы является применение классических традиционных фильтров. Зачастую применение традиционных фильтров для устранения сильных искажений напряжения на секциях 6–35 кВ не оказывает должного эффекта. Установка традиционных фильтров сопровождается дополнительными паразитными резонансами тока, которые усиливают промежуточные гармоники. Данные гармоники многократно усиливают колебания и сильно искажают форму напряжения при наложении частотной характеристики распределительной сети с областью высокочастотных гармоник, генерируемых современными ПЧ-АВ.

Цель исследования

Статья посвящена вопросам улучшения электромагнитной совместимости (ЭМС) ПЧ-АВ в составе электроприводов клетей прокатных станов с системой внутризаводского электроснабжения металлургических заводов при наличии резонансных явлений за счет использования специализированных пассивных фильтров (СПФ).

Методы исследования

В работе применены методы теоретических и экспериментальных исследований. При изучении причин возникновения резонансных явлений использовались экспериментальные данные, полученные в ходе проведения научно-исследовательской работы на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково». Для обработки экспериментальных данных использовались методы математического моделирования в среде Matlab с приложением Simulink.

Результаты

Значимость результатов работы заключается в улучшении показателей качества электроэнергии в распределительных электрических сетях мини-заводов с ПЧ-АВ в условиях наличия резонансных явлений в частотной характеристике сети за счет применения СПФ. Внедрение результатов работы — улучшение показателей качества и, как следствие, повышение надежности работы всех силовых преобразователей в системе внутризаводского электроснабжения и уменьшение аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя силовых элементов. Результаты работы внедрены на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково». Количественный показатель технического эффекта по изменению уровня коэффициента суммарных гармонических составляющих напряжения на общих секциях заводской ГПП K_U составляет: 1) без применения СПФ $K_U = 10,26 \%$; 2) при использовании СПФ $K_U = 1,42 \%$ (относительное изменение $\delta K_U = -72 \%$). Данные результаты могут быть использованы на других компактных металлургических предприятиях с протяженными кабельными линиями среднего напряжения 6–35 кВ и мощными электроприводами с ПЧ-АВ.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-20069).

Для цитирования: Николаев А. А., Афанасьев М. Ю., Маклаков А. С., Буланов М. В. Методика выбора параметров пассивного фильтра для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с активными выпрямителями // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 9–25. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-9-25>.

METHODOLOGY FOR SELECTING PARAMETERS OF A PASSIVE FILTER TO IMPROVE THE QUALITY OF ELECTRICITY IN ELECTRIC NETWORKS WITH AN ACTIVE RECTIFIER

The relevance

Due to the wide spread of compact metallurgical plants, which use powerful drives with frequency converters with active rectifiers (FC-AR), an urgent task has become the fight against resonant phenomena in medium voltage electrical networks, since these converters, despite their significant advantages, have a disadvantage — the deterioration of the quality of electricity in the power supply system 6–35 kV.

Existing methods of dealing with resonant phenomena in medium voltage electrical networks, in which non-linear elements are present, such as powerful drives of rolling mills with FC-AR used in power supply systems of metallurgical enterprises, do not always allow changing the situation for the better.

One way to solve this problem is to use classic traditional filters. Often, the use of traditional filters to eliminate strong voltage distortions in sections of 6–35 kV does not have the desired effect. The installation of traditional filters is accompanied by additional parasitic current resonances, which amplify the intermediate harmonics. These harmonics multiply the oscillations and strongly distort the voltage shape when the frequency response of the distribution network is superimposed with the region of high-frequency harmonics generated by modern FC-AR.

Aim of research

The article is devoted to the issues of improving the electromagnetic compatibility (EMC) of FC-AR as part of electric drives of rolling mill stands with an internal power supply system for metallurgical plants in the presence of resonant phenomena through the use of specialized passive filters (SPF).

Research methods

Methods of theoretical and experimental researches are applied in the work. When studying the causes of the occurrence of resonant phenomena, experimental data obtained in the course of research work at the metallurgical plant JSC Metallurgical Plant Balakovo were used. For the processing of experimental data, mathematical modeling methods were used in the Matlab environment with the Simulink application.

Results

The significance of the results of the work lies in improving the quality of electricity in the distribution electrical networks of mini-plants with FC-AR in the presence of resonant phenomena in the frequency response of the network through the use of SPF. The implementation of the results of the work is an improvement in quality indicators and, as a result, an increase in the reliability of the operation of all power converters in the internal power supply system and a decrease in emergency situations associated with the failure of power elements. The results of the work were implemented at the metallurgical plant of JSC Metallurgical Plant Balakovo. The quantitative indicator of the technical effect of changing the level of the coefficient of the total harmonic components of the voltage

Keywords

frequency converter, active rectifier, higher harmonics, power quality indicators, electromagnetic compatibility, current resonance, specialized passive filter

in the general sections of the factory GPP K_U is: 1) without the use of SPF $K_U = 10.26\%$; 2) when using SPF $K_U = 1.42\%$ (relative change $\delta K_U = -72\%$). These results can be used at other compact metallurgical enterprises with extended cable lines of medium voltage 6–35 kV and powerful electric drives with FC-AR.

Acknowledgments: The project is supported by the Grant of the Russian Research Foundation (Project No. 22-19-20069).

For citation: Nikolaev A. A., Afanasev M. Yu., Maklakov A. S., Bulanov M. V. Metodika vybora parametrov passivnogo fil'tra dlya povysheniya kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh s aktivnymi vypryamitelyami [Methodology for Selecting Parameters of a Passive Filter to Improve the Quality of Electricity in Electric Networks with an Active Rectifier]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 9-25 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-9-25>.

Введение

За последние годы преобразователи частоты с активными выпрямителями получили большое распространение ввиду своих преимуществ, таких как возможность рекуперации энергии в тормозных режимах электропривода и поддержка заданного значения коэффициента мощности на входе активного выпрямителя. При этом данные преобразователи обладают существенным недостатком, заключающемся в ухудшении качества напряжения во внутриводской распределительной электрической сети 6–35 кВ из-за наложения высокочастотных гармоник входного напряжения и тока активного выпрямителя на резонансные области частотной характеристики питающей сети. Данный недостаток можно устранить за счет использования во внутриводских электрических сетях специализированных пассивных фильтров (СПФ), обеспечивающих смещение основного резонанса токов в зону, свободную от высокочастотных гармоник преобразователя частоты с активным выпрямителем. Это позволяет снизить коэффициент гармонических искажений напряжения на секциях главной понижающей подстанции предприятия [1].

В научных исследованиях А. А. Николаева, А. С. Маклакова, М. В. Буланова, И. Г. Гилемова, Т. Jing, К. O'Brien, R. Teichmann, Т. М. Blooming, D. J. Carno-

vale рассматривались вопросы, исследования и способы решения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприводов прокатных станков с питающей сетью. Как следует из обзора данных источников, задача эффективного применения различных способов, позволяющих устранять резонансные явления в системе электроснабжения (СЭС), содержащей в себе электроприводы с ПЧ-АВ, а также обеспечивающих ЭМС элементов автоматизированного электропривода (АЭП) оказывается весьма сложной [2–6]. Существующие и перспективные способы ЭМС в условиях резонансных явлений в сетях 6–35 кВ за счет коррекции алгоритмов ШИМ и систем управления автоматического выключателя (АВ) не всегда можно реализовать на практике из-за закрытых систем управлений АВ, при этом альтернативные способы обеспечения ЭМС за счет применения фильтрокомпенсирующих устройств должным образом не рассмотрены.

В связи с этим актуальными задачами являются: 1) обеспечение ЭМС мощных ПЧ с АВ с питающей сетью с резонансными явлениями, заключающееся в применении в распределительных сетях 6–35 кВ СПФ, благодаря которым обеспечивается сдвиг резонансов тока в безопасную зону, где нет значимых гармоник генерируемых ПЧ-АВ; 2) разработка

новой методики выбора мощности и расчета параметров СПФ для коррекции частотной характеристики питающей сети.

Описание системы электроснабжения

АО «Металлургический завод Балаково»

Анализ необходимости применения СПФ для обеспечения ЭМС мощных ПЧ-АВ с системой электроснабжения среднего напряжения проводился на примере системы внутризаводского электроснабжения металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково».

Упрощенная схема электроснабжения завода приведена на рисунке 1.

На схеме можно выделить главную понизительную подстанцию предприятия

ГПП 220/35/10 кВ, от которой получают питание электросталеплавильный комплекс «шахтная печь — агрегат ковшепечь — статический тиристорный компенсатор» и остальные электроприемники электросталеплавильного и сортопрокатного цехов, а также других вспомогательных объектов, таких как участки газоочистки и водоподготовки, скрапное отделение, блок разделения воздуха [7, 8].

На рисунке 2 приведена схема электроснабжения главных приводов сортового стана АО «Металлургический завод Балаково». От РП-4 (МЕСО1) получают питание электроприводы 18 клетей с приводными двигателями 630–1300 кВт, электроприводы трех скоростных проволочных блоков (СПБ) с двигателями большой мощности 2500 кВт (СПБ № 1

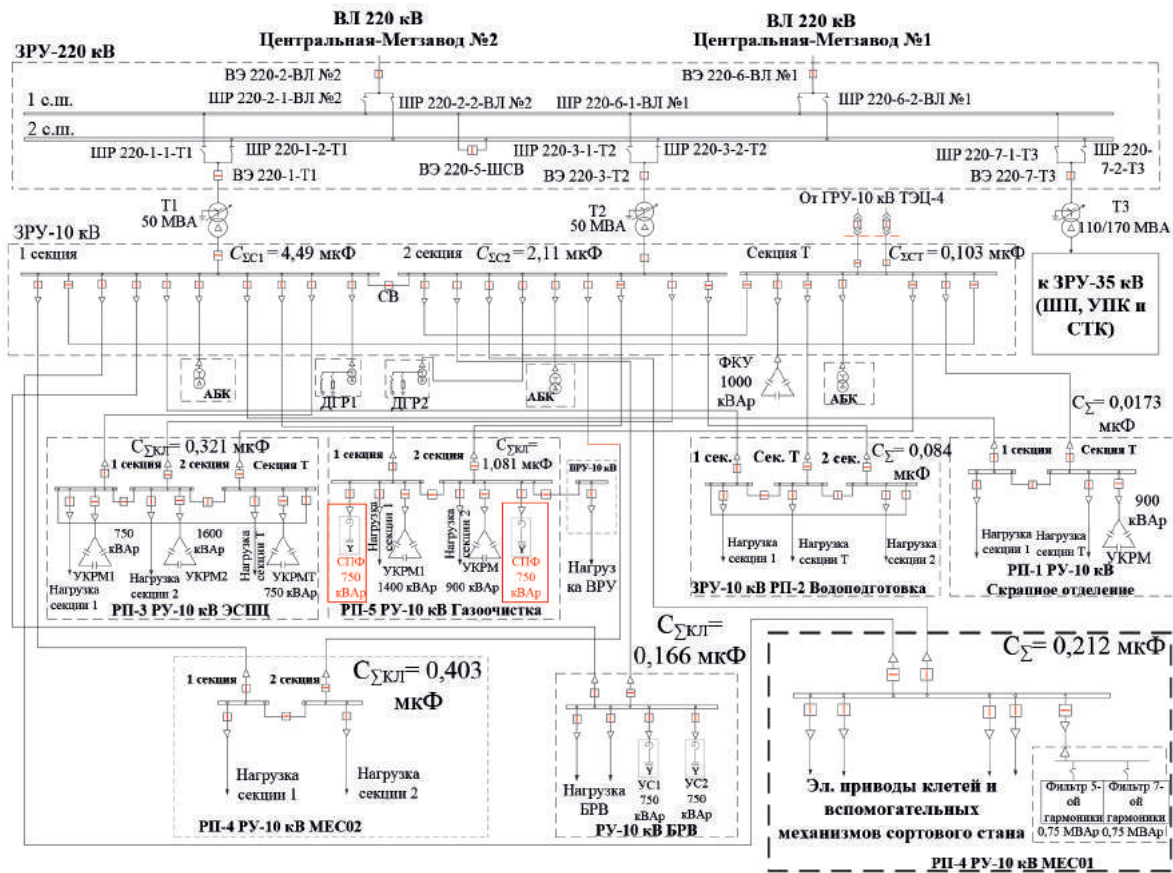


Рисунок 1. Схема электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково»

Figure 1. Power supply scheme for 10 kV electrical receivers of Balakovo Metallurgical Plant JSC

и № 2) и 6300 МВт (СПБ № 3), а также электроприводы ножниц и правильной машины мощностью 290–600 кВт. Трансформаторы Т15–Т18 питают ПЧ производства ТМЕИС TMdrive-70 с мощными асинхронными двигателями 2500 кВт (ТМЕИС №№ 1, 2) и 6300 (ТМЕИС № 3) скоростных проволочных блоков №№ 1–3.

Большая протяженность линий обуславливает наличие значительной распределенной емкости (в случае АО «Металлургический завод Балаково» — около 7 мкФ), которая вместе с индуктивностью сетевого трансформатора 220/10 кВ может создать неблагоприятный резонанс токов, частота которого может совпасть с частотной областью генерирования гармоник различными силовыми преобразователями. Данная особенность характерна для систем внутризаводского электроснабжения небольших металлургических заводов, где имеет место одна главная понизительная подстанция (ГПП) с ЗРУ-10 кВ, от которой получают питание по кабельным линиям основная часть электроприемников цехов. В этом случае вся емкость разветвленной сети 10 кВ сосредоточена на секциях одной ЗРУ-10 кВ [9, 10].

Описание математической модели системы электроснабжения и электропривода с ПЧ-АВ

При определенной конфигурации сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» возникают опасные резонансные явления, приводящие к сильнейшему искажению формы напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП. Резонанс обусловлен взаимным влиянием суммарной распределенной емкости кабельных линий и индуктивности сетевого трансформатора 220/10 кВ. Описанные искажения с высокой долей вероятности могут приводить к сбою в работе преобразователей частоты Siemens Sinamics S120, которые оснащены активными выпрямителями, функционирующими в режиме Smart, с последующим выходом из строя силовых выпрямительных модулей.

Для анализа частотных характеристик при различных конфигурациях сети 10 кВ в математическом пакете Matlab с приложением Simulink была разработана имитационная модель системы электроснабжения завода (рисунки 3, 4). В модели были учтены параметры питающей сети 220 кВ и сетевых трансформаторов

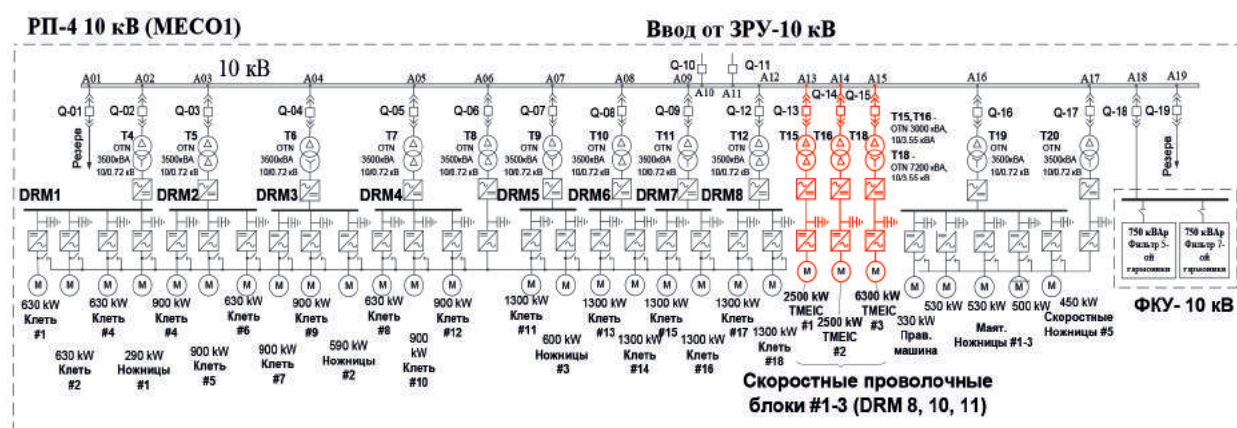


Рисунок 2. Схема электроснабжения главных приводов сортового стана АО «Металлургический завод Балаково»

Figure 2. Scheme of power supply of the main drives of the long section mill «Metallurgical Plant Balakovo» JSC

T1 и T2 220/10 кВ, также реализованы схемы ЗРУ-10 кВ и всех РУ-10 кВ цеховых распределительных подстанциях (РП). Была разработана математическая модель ПЧ ТМЕИС1-3 в виде управляемых источников напряжения, адекватно воспроизводящая гармонический состав токов, потребляемых преобразователями. Кроме этого, реализована эквивалентная модель ПЧ Siemens Sinamics S120 в виде группы источников тока, параметры которых задавались на основании гармонического анализа суммарного тока всех клетевых блоков, полученного в ходе экспериментальных исследований. Остальные электроприемники цеховых РП были представлены эквивалентными линейными моделями в виде активно-индуктивных сопротивлений с фиксированными параметрами. Для адекватного анализа частотных характеристик при моделировании кабельных линий были использованы П-образные схемы замещения с учетом активного сопротивления, индуктивности и сосредоточенных емкостей в начале и конце линии, так называемые

«П-секции». Параметры П-секций задавались на основе известных удельных параметров R0, L0 и C0, определенных из справочников и каталогов в соответствии с марками кабелей, а также согласно фактическим длинам кабелей и числу параллельных ниток [11].

Исследования показали, что ключевыми элементами в системе внутриводского электроснабжения 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково», влияющими на параметры резонанса токов в высокочастотной области частотной характеристики сети 10 кВ, являются рекомендованные к установке СПФ №№1,2, работающие последовательно с малой индуктивностью. Из-за высокой емкости батарей конденсаторов при подключении к РП-5 «газоочистка», одной из секций ЗРУ-10 кВ ГПП возникает перемещение резонанса токов из высокочастотной области в низкочастотную зону с одновременным уменьшением резонансного пика. В этом случае гармоники, генерируемые ПЧ ТМЕИС1-3 в области $n = 49-77$, перестают усили-

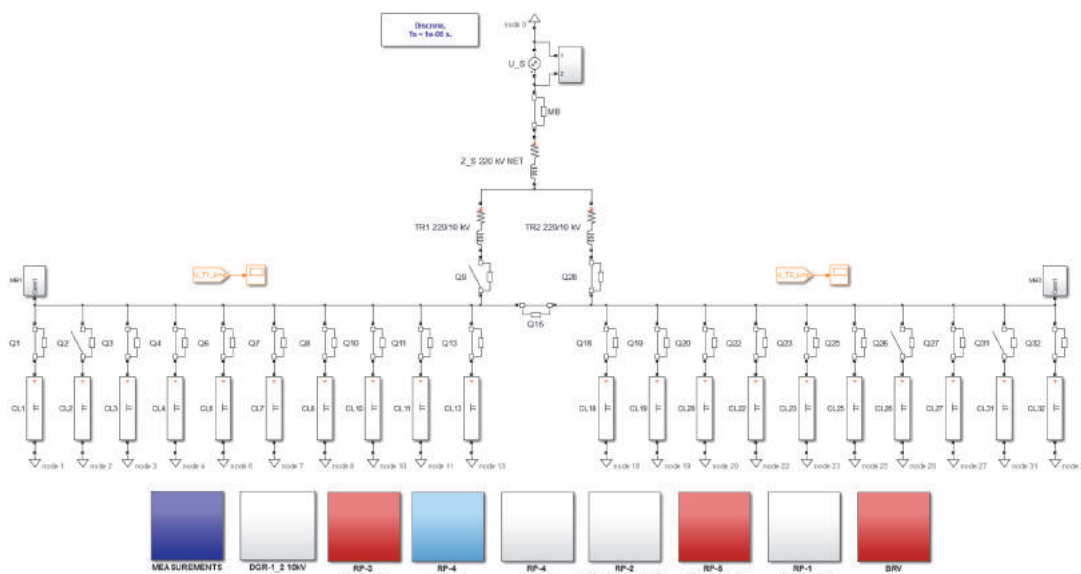


Рисунок 3. Имитационная модель системы электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково», реализованная в математическом пакете Matlab с приложением Simulink

Figure 3. Simulation model of the power supply system for 10 kV electrical receivers of JSC «Balakovo Metallurgical Plant», implemented in the Matlab mathematical package with the Simulink application

ваться частотной характеристикой сети, и их содержание в напряжении 10 кВ становится минимальным.

Для устранения сильных искажений напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ и обеспечения надежной работы электроприводов сортового стана и электросталеплавильного цеха необходимо предусмотреть технические мероприятия по исключению ситуаций возникновения резонанса токов в сети 10 кВ, совпадающего по своему частотному диапазону с областью генерирования высших гармоник мощных ПЧ ТМЕИС 1-3 [12].

Наиболее эффективным способом решения данной задачи является установка в системе внутриводского электроснабжения дополнительных СПФ, представляющих собой последовательное соединение батарей конденсаторов с воздушными реакторами, имеющими малую индуктивность порядка 100 мкГн. В данном случае использование дополнительных СПФ позволит при объединенной работе секций № 1 и № 2 ЗРУ-10 кВ исключить появление резонансных, а при раздельной работе секций — постоянно обеспечить оптимальный вид

частотной характеристики сети 10 кВ на секции № 2 с отсутствием резонанса токов в области гармоник с $n = 49-77$. Проведенные расчеты и результаты математического моделирования показывают, что для обеспечения оптимального качества напряжения при работе новых СПФ 2x750 с точки зрения сохранения коэффициента искажения тока на исходном ($KI = 35-45\%$ с анализом гармоник до $n = 150$), необходимо обеспечить суммарную величину индуктивности кабельных линий от точки подключения компенсатора до секции РП4 около 309 мкГн.

Для выбора мощности дополнительных СПФ необходимо выполнить анализ частотных характеристик сети 10 кВ для двух вариантов схемы электроснабжения с учетом различных комбинаций режимов работы СПФ №№ 1, 2 2×750 кВАр.

При исследовании частотных характеристик анализировались следующие параметры возникающего резонанса тока: 1) частота резонанса $f_{РЕЗ.Т}$; 2) максимальное значение полного сопротивления (импеданса) при резонансе $Z_{МАХ}$; 3) начало частотного диапазона резонанса $f_{РЕЗ.Т.Н}$, при котором частотная

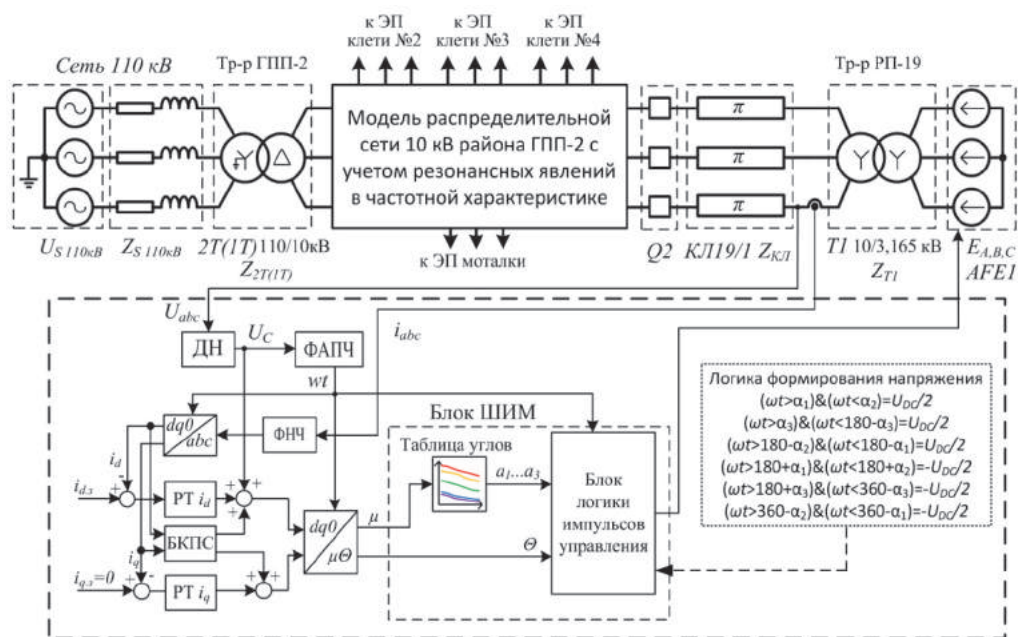


Рисунок 4. Имитационная модель преобразователя частоты ТМЕИС, подключенных к РП-4

Figure 4. Simulation model of TMEIC frequency converter, connected to RP-4

характеристика сети 10 кВ $Z(f)$ становится выше естественной характеристики $Z_{\text{ЕСТ.}(f)}$, т.е. возникает эффект усиления гармоник; 4) конец частотного диапазона резонанса $f_{\text{РЕЗ.Т.К}}$, при котором частотная характеристика $Z(f)$ опускается ниже $Z_{\text{ЕСТ.}(f)}$, что сопровождается эффектом ослабления гармоник. Частотные характеристики для каждого из рассматриваемых режимов приведены на рисунке 4. В режиме, когда отключены СПФ (рисунок 5, а), присутствуют сильные резонансы токов, частоты которых попадают в область генерирования высших гармоник преобразователей с АВ. Это приводит к сильным искажениям напряжения на секции. В режиме, когда включены СПФ (рисунок 5, б), видно, что резонансы токов переместились в низкочастотную часть характеристики возле области генерирования гар-

моник классических ПЧ, при этом практически не перекрывая эту зону. Резонансный пик значительно снизился. Это привело к существенному уменьшению искажения напряжения на секциях 10 кВ, за счет чего резонанс токов невозможен.

Для исключения подобных ситуаций необходимо провести комплексные исследования частных характеристик сети 10 кВ и разработать мероприятия по их коррекции с целью перемещения резонанса токов в другой частотный диапазон с его одновременным ослаблением. Для этого необходимо проанализировать основные рабочие конфигурации сети 10 кВ и разработать математическую модель системы электроснабжения завода, на базе которой можно проводить исследования влияния тех или иных параметров системы на резонансный максимум [13].

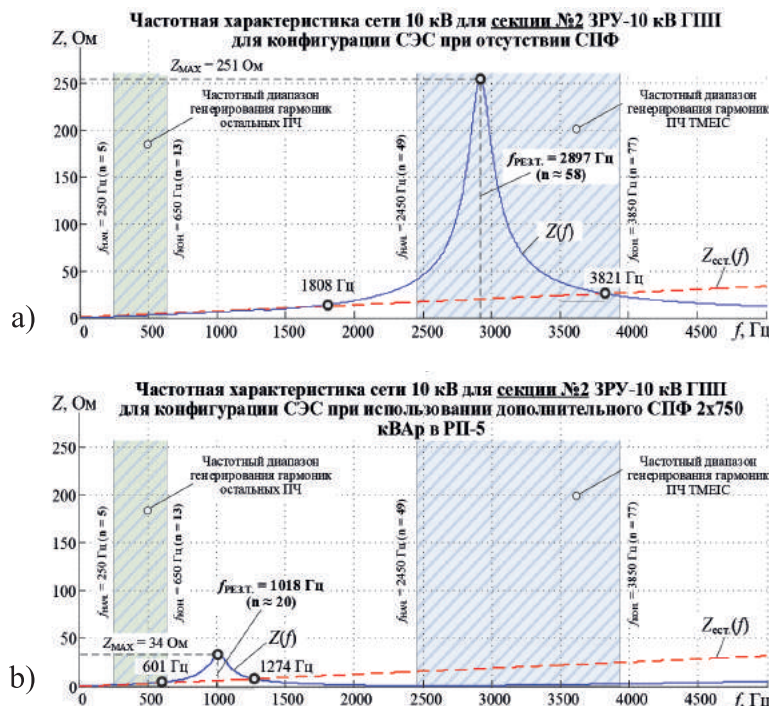


Рисунок 5. Анализ частотных характеристик сети 10 кВ внутривзаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» для исходных режимов без использования СПФ характеристики при раздельной работе секций № 1 и № 2 ЗРУ-10 кВ ГПП (а) и после включения специализированного корректора частотной характеристики (б)

Figure 5. Analysis of the frequency characteristics of the 10 kV internal power supply network of Balakovo Metallurgical Plant JSC for initial modes without using SPF characteristics with separate operation of sections No. 1 and No. 2 of ZRU-10 kV GPP (a) and after switching on a specialized frequency response corrector (b)

Разработка методики расчета параметров СПФ

Для обеспечения электромагнитной совместимости мощных электроприводов с ПЧ-АВ прокатного стана с сетью 10 кВ в системе электроснабжения предприятия были установлены СПФ, состоящие из конденсаторных батарей, соединенных в две параллельные звезды, и последовательно включенных воздушных реакторов с малой индуктивностью. Значение емкости C в составе СПФ выбирается таким образом, чтобы осуществить перемещение резонанса тока в частотной характеристике сети из области генерирования высокочастотных гармоник ПЧ с АВ. Использование малой индуктивности L делает возможным коррекцию частотной характеристики и смещение ее из области генерирования высокочастотных гармоник. Собственная частота резонанса напряжения СПФ должна быть выше, чем частота резонанса тока исходной характеристики сети, чтобы сместить частотную характеристику влево и не попасть в область высокочастотных гармоник, генерируемых ПЧ с АВ [14].

В ходе проведенных исследований была доказана возможность применения специализированных конденсаторных батарей в составе СПФ, способных функционировать при высоких значениях суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_1 (вплоть до 45 %) без перегрева и риска выхода из строя (температура конденсаторов составляла 27 °С в летний период времени в помещении с естественной вентиляцией).

Определение основных параметров СПФ проводилось по разработанной методике с использованием имитационной модели металлургического комплекса АО «Металлургический завод Балаково». В соответствии с методикой необходимо выбрать место установки СПФ. Как правило, это общие секции ГПП-10 кВ. Далее необходимо произвести моделирование с подключенным СПФ, где задается различная мощность данного устройства с различными индуктивностью и емкостью. По полученным результатам производится выбор оптимальных параметров СПФ, при которых достигается минимальное значение коэффициента суммарных гармониче-

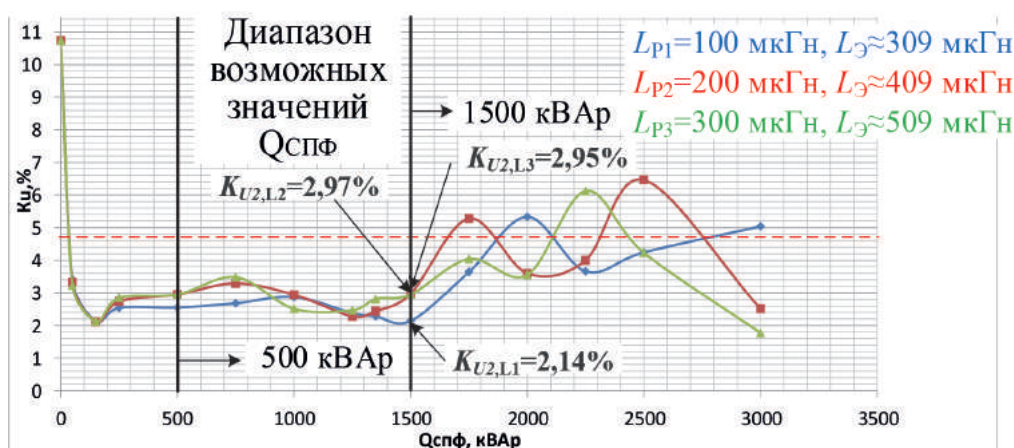


Рисунок 6. Сравнение коэффициентов нелинейных искажений напряжения на секции 2 ЗРУ-10 кВ ГПП в зависимости от мощности СПФ при разных индуктивностях реактора в составе компенсатора (установка СПФ в РП-5 «Газоочистка») при отдельной работе секций 1 и 2

Figure 6. Comparison of the coefficients of non-linear voltage distortion at section 2 ZRU-10 kV GPP depending on the power of the SPF at different inductances of the reactor as part of the compensator (installation of the SPF in RP-5 «Gas cleaning») with separate operation of sections 1 and 2

ских искажений напряжений K_U (рисунок 6). Далее для выбранной конфигурации необходимо определить величину тока, протекающего через конденсаторы, и коэффициент искажения по току K_I . На последнем этапе проводится оценка величины броска тока при включении СПФ с заданными параметрами.

С учетом вышеизложенного было определено две возможные точки подключения СПФ 2x750 кВАр: 1) на секциях РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка»; 2) на секциях РУ-10 кВ РП-4 МЕСО1. В первом случае величина индуктивности воздушных реакторов может составлять $L_{P1} = 100$ мкГн, во втором — $L_{P2} = 250$ мкГн. Сечения кабелей были выбраны с учетом превышения в 1,3–1,7 раза значения длительно допустимого тока $I_{длит.доп.}$ максимально возможных действующих значений токов СПФ с учетом высших гармоник при $K_{I,max} = 45$ %.

Результаты математического моделирования, представленные на рисунке 5, показали, что для достижения наилучшего технического эффекта по улучшению гармонического состава напряжения со снижением исходных значений K_U на секциях 1 и 2 РУ-10 кВ ГПП более чем на 48 % (до $K_U = 2,14$ – $2,68$ %) значение номинальной мощности СПФ должно составлять от 500 до 1500 кВАр, при этом величина суммарной эквивалентной индуктивности между конденсаторами СПФ и секциями ЗРУ-10 кВ ГПП должна составлять примерно $L_{\Sigma} = 309$ мкГн (рисунок 6). В соответствии с этим, величина индуктивности воздушного реактора СПФ может быть определена как разница между граничной индуктивностью L_{Σ} и суммарной индуктивностью КЛ 10 кВ от секций ГПП до точки подключения СПФ.

В абсолютном выражении диапазон значений K_U без использования СПФ составляет: при отдельной работе секций $K_U = 10,26$ %; при совместной работе

$K_U = 7,64$ %, что является неприемлемым. После установки СПФ при отдельной работе секций $K_U = 2,14$ % (для СПФ 2x750 кВАр) и $K_U = 2,68$ % (для СПФ 750 кВАр); СПФ при совместной работе секций $K_U = 2,05$ % (для СПФ 2x750 кВАр) и $K_U = 2,11$ % (для СПФ 750 кВАр), что является существенным техническим эффектом по улучшению качества напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП, являющихся точками общего присоединения электроприемников предприятия.

Дополнительно на математической модели сети 10 кВ района ГПП была проведена оценка гармонического состава токов СПФ различной мощности. Данный параметр важен для стабильной работы конденсаторных батарей. Результаты исследования, представленные на рисунке 7, показали, что для обеспечения нормального функционирования СПФ в сети 10 кВ района ГПП, коэффициент гармонического искажения тока K_I должен быть ≤ 45 %. Превышение данного параметра повысит температуру конденсаторных батарей в составе СПФ и может привести к выходу из строя данного фильтра.

Необходимо отметить, что был проанализирован диапазон мощностей СПФ от 500 кВАр до 1500 кВАр с индуктивностью реактора фильтра $L_p = 100$ мкГн, 200 мкГн, 300 мкГн с различными точками подключения (РП-4, РП-5). Суммарные коэффициенты искажения тока K_I , не превышающие 45 %, были выявлены для СПФ мощностью 2x750 кВАр и $L_p = 100$ мкГн как при отдельной работе секций ГПП, так и при совместной. В данной конфигурации СПФ $K_I = 41,06$ % и 37,36 % соответственно, для всех остальных случаев, $K_I > 45$ %, что является неприемлемым.

При исследовании режимов работы СПФ отдельное внимание было уделено переходным процессам при включении компенсатора. Вследствие использова-

ния воздушных реакторов с малой индуктивностью $L_p = 100, 200$ или 300 мкГн, а также высокой эквивалентной емкости батарей конденсаторов при включении СПФ могут возникать броски емкостного тока большой амплитуды, вызывающие кратковременные перенапряжения в сети 10 кВ. При использовании СПФ различных мощностей, подключаемых к секциям РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка», и различных режимов электроснабжения с параллельной работой секций ЗРУ-10 кВ ГПП и раздельным с питанием от одного из сетевых трансформаторов 220/10 кВ 2Т (1Т) были исследованы амплитуды бросков тока СПФ и уровни перенапряжений на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП. Результаты исследований приведены на рисунке 8. Как видно из рисунка 8, в зависимости от начальной фазы питающего напряжения при включении СПФ 2×750 кВАр возникают кратковременные

броски емкостного тока величиной до 3,9 номинальных амплитуд, вызывающие кратковременное повышение напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до $1,12U_{\text{н.ном.}}$. Время затухания броска тока при текущей эквивалентной нагрузке электроприемников, подключенных к двум секциям ЗРУ-10 кВ ГПП, составляет $t_{\text{затух.}} = 0,01$ с. Данные значения являются приемлемыми и не оказывают негативного воздействия на режимы работы других электроприемников.

Экспериментальные исследования эффективности применения СПФ в СЭС металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково»

На рисунке 9 приведены осциллограммы мгновенных значений напряжения на секции ЗРУ-10 кВ, полученные в

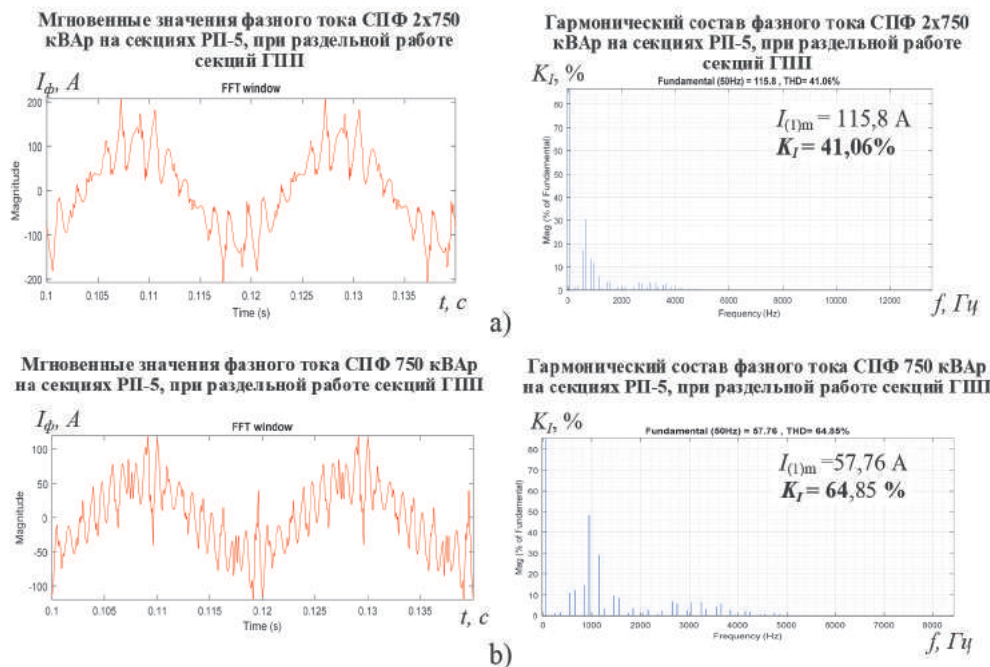


Рисунок 7. Анализ мгновенных значений фазного тока и гармонический состав при работе СПФ 2×750 кВАр $L_p = 100$ мкГн на секции 2 ГПП при раздельной работе секций ГПП (а); при раздельной работе секций ГПП и подключении СПФ 750 кВАр $L_p = 100$ мкГн (б)

Figure 7. Analysis of the instantaneous values of the phase current and the harmonic composition during the operation of the SPF 2×750 kVAr $L_p = 100$ μ H on section 2 of the GPP with separate operation of the sections of the GPP (a); with separate operation of sections of the GPP and connection of the SPF 750 kVAr $L_p = 100$ μ H (b)

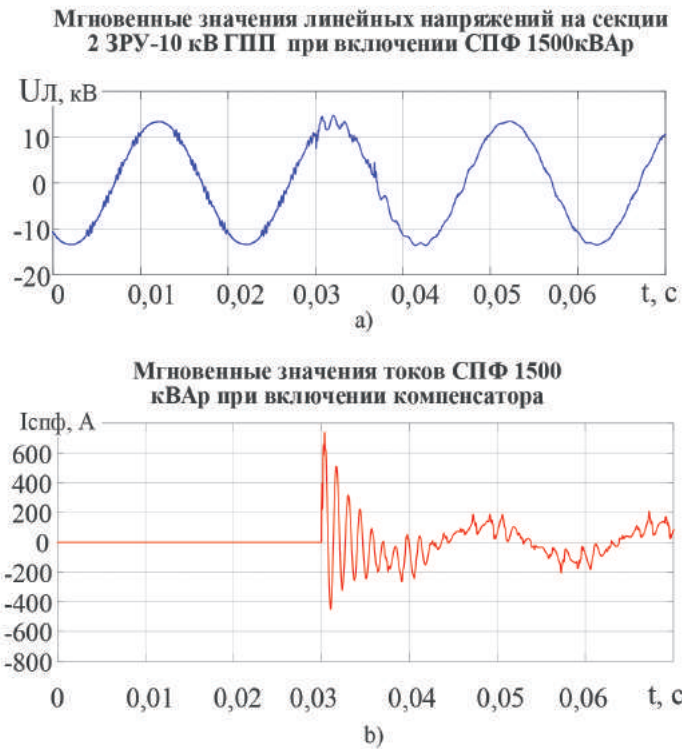


Рисунок 8. Переходные процессы при включении двух СПФ 2х750 кВАр с $L_p = 100$ мкГн, установленных в РУ-10 кВ РП-5, при отдельной работе секций ЗРУ-10 кВ ГПП, и момент включения соответствует максимуму одного из $U_{л}$

Figure 8. Transient processes when turning on two SPF 2x750 kVA_r with $L_p = 100$ μ H, installed in switchgear-10 kV RP-5, with separate operation of sections ZRU-10 kV GPP, and the moment of switching on corresponds to the maximum of one of $U_{л}$

ходе проведения эксперимента по оценке эффективности коррекции частотной характеристики с помощью СПФ. В первом случае при отсутствии СПФ в сети 10 кВ возникает резонанс токов на частотах, соответствующих области генерирования высших гармоник ПЧ с АВ, что приводит к сильному искажению формы напряжения. В данном случае на рисунке 9, *a* и *b* показаны кривая напряжения и ее гармонический состав при работе ПЧ с АВ. После включения СПФ резонанс токов смещается в область низкочастотных гармоник, что приводит к значительному улучшению гармонического состава напряжения (рисунок 9, *c*, *d*). За счет значительной емкости конденсаторов в составе указанных компенсирующих установок происходит коррекция частотной характеристики сети. В резуль-

тате изменения этой характеристики работа преобразователей с АВ уже не оказывает большого негативного влияния на кривую напряжения на шинах 10 кВ, качество формы которого можно охарактеризовать как удовлетворительное.

Технические данные СПФ, рекомендованных к подключению к секциям ЗРУ-10 кВ РП-5, приведены в таблице 1. Стоит отметить, что для обеспечения надежной работы СПФ в условиях высокого значения K_1 (вплоть до 45 %) необходимо применять конденсаторы с пленочным полипропиленовым диэлектриком. На объекте АО «Металлургический завод Балаково» рекомендованы к установке батареи конденсаторов фирмы ENERLUX s.r.l. Силовая схема и фотография внедренного в реальное производство СПФ представлена на рисунке 10.

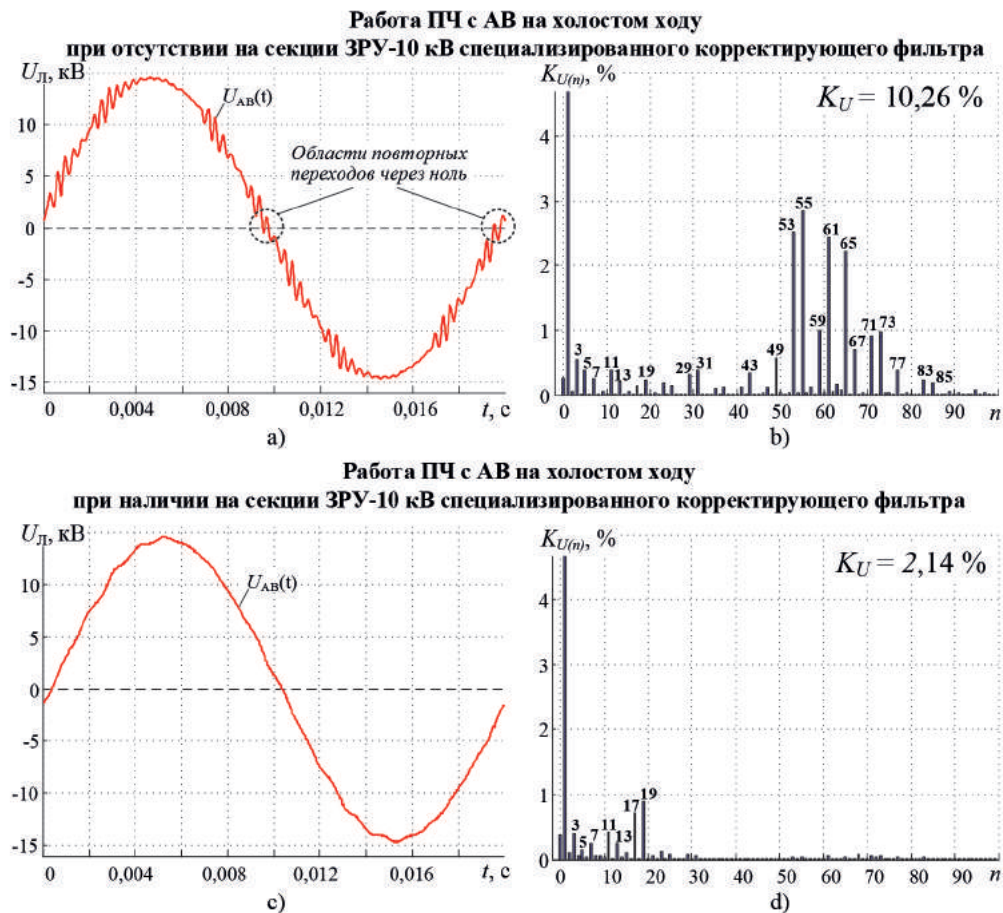


Рисунок 9. Результаты экспериментальных исследований эффективности коррекции частотной характеристики сети 10 кВ за счет использования СПФ

Figure 9. Results of experimental studies of the effectiveness of correction of the frequency response of a 10 kV network through the use of SPF

Таблица 1. Технические данные дополнительных СПФ, рекомендованных к установке в РП-5 для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ

Table 1. Technical data of additional SPF recommended for installation in RP-5 to correct the frequency response of a 10 kV network

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное напряжение, кВ	10,0
2. Номинальная мощность СПФ, кВАр	2x750
3. Емкость батарей конденсаторов на фазу, мкФ	3 × 23,9
3. Индуктивность реактора для ограничения броска тока при включении СПФ, мкГн	100
4. Номинальный ток, А	43,3
5. Номинальная частота, Гц	50,0
6. Способ включения батарей конденсаторов	Две конденсаторные группы, соединенные в звезду с нейтральным проводом.
7. Степень защиты электрооборудования СПФ	IP00
8. Уровень изоляции электрооборудования, кВ	38/95 кВ
9. Тип используемых конденсаторов	Диэлектрик: All polypropylene film, тип изоляторов: фарфор; тип изоляционной жидкости: biod. oil

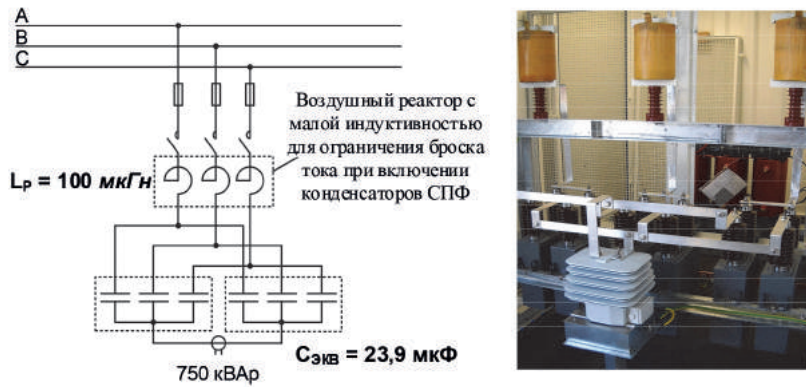


Рисунок 10. Силовая схема (а) и фотография (б) СПФ, рекомендованного к установке в РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка» для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ

Figure 10. Power circuit (a) and photo (b) of the SPF, recommended for installation in switchgear-10 kV RP-5 «Gas cleaning» to correct the frequency response of the 10 kV network

Выводы

1. На современных компактных металлургических предприятиях, где функционируют мощные электроприводы прокатных станов, выполненные на базе ПЧ с АВ, могут наблюдаться серьезные проблемы ЭМС силовых преобразователей с питающей сетью. Основной причиной ухудшения качества электроэнергии является генерирование высокочастотных гармоник активными выпрямителями из-за использования алгоритмов ШИМ. В случае наложения частот гармоник с областью резонанса частотной характеристики питающей сети могут возникать сильные искажения напряжения, ухудшающие режимы работы чувствительных электроприемников, получающих питание от общих секций 6–35 кВ ГПП предприятия.

2. Одним из способов обеспечения ЭМС мощных ПЧ с АВ с питающей сетью 6–35 кВ является применение СПФ, осуществляющих коррекцию частотной характеристики сети за счет перемещения резонанса тока в безопасную область, где отсутствуют значимые гармоники, генерируемые АВ.

3. Разработана методика расчета параметров СПФ, включающая в себя: 1) составление математической модели системы внутризаводского электроснабжения и модели ПЧ-АВ; 2) определение

оптимальной мощности корректирующего фильтра с использованием оптимального критерия — минимальное значение суммарного коэффициента гармонического составляющего напряжения K_U , рассчитанного до 150 гармоники на общих секциях ГПП; 3) при выбранной мощности СПФ должна обеспечиваться минимальная величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I , не превышающая 45 % для возможности эксплуатации конденсаторов с пленочным полипропиленовым диэлектриком; 4) проводится дополнительная проверка на возникновение недопустимых уровней бросков тока и напряжений при подачи напряжения на СПФ.

4. Внедрение СПФ на АО «Металлургический завод Балаково» показало эффективность предложенной методики. В случае действующего производства уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжений K_U составило в абсолютном отношении $\delta K_U = -72 \%$. Применение СПФ позволило обеспечить нормальную работу других чувствительных электроприемников получающих питание от общей секции ГПП 10 кВ.

5. Результаты исследования могут быть использованы на аналогичных компактных металлургических заводах с мощными ПЧ на базе АВ.

Список источников

1. Николаев А.А., Буланов М.В., Афанасьев М.Ю., Денисевич А.С. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутривзаводской сети // Вестник ИГЭУ. 2018. Вып. 6. С. 47–56. doi: 10.17588/2072-2672.2018.6.047-056. EDN: YRWJVZ.
2. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active Rectifier for Medium Voltage Drive Systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2001. P. 557–562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701.
3. Blooming T.M., Carnovale D.J. Application of IEEE STD 5191992 Harmonic Limits // Conf. Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conf. 2006. P. 1–9. doi:10.1109/PAPCON.2006.1673767.
4. Pontt J., Rodriguez J., Martin S., Aguilera R. Resonance Mitigation and Dynamical Behavior of Systems with Harmonic Filters for Improving Reliability in Mining Plants // Conf. Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conf. Forty-First IAS Annual Meeting. 2006. P. 1298–1302. doi: 10.1109/IAS.2006.256698.
5. Jing T., Maklakov A., Radionov A. e.a. Research on Hybrid SHEPWM Based on Different Switching Patterns // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 1875–1884. doi:10.11591/ijpeds.v10.i4.
6. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Maklakova E.A. Reactive Power Compensation in Industrial Grid via High-Power Adjustable Speed Drives with Medium Voltage 3L-NPC VTB Converters // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2017. Vol. 8, No. 4. P. 1455–1466. doi:10.11591/ijpeds.v8.i4.
7. Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник ИГЭУ. 2017. Вып. 3. С. 59–69. doi: 10.17588/2072-2672.2017.3.059-069. EDN: YUDIVN.
8. Afanasev M.Y., Denisevich A.C., Bulanov M.V., Tulupov P.G. The Experience of Using Specialized Correction Filters to Improve Power Quality in Electrical Networks with Active Rectifiers // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2022. P. 386–391. doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906675.
9. Nikolaev A.A., Afanasev M.Yu., Bulanov M.V. Application of a Specialized Passive Filter to Correct the Frequency Response of the Supply Network in order to Eliminate the Negative Impact of Resonance Phenomena // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). 2020. P. 32–37. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234378.
10. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Gilemov I.G., Linkov S.A. Development of a Comprehensive Simulation Model of the Power Supply and Drive System Based on AFE-FC for Power Quality Research // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 896–901. doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896303.
11. Николаев А.А., Буланов М.В., Гилемов И.Г. и др. Разработка научно обоснованных технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости мощных промышленных электроприводов с питающей сетью. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического ун-та им. Г.И. Носова, 2021. 331 с. ISBN: 978-5-9967-2181-8. EDN: IRFIMK.
12. Maklakov A.S., Demov M.A., Maklakova E.A. e.a. EMC Research of 18-Pulse Circuit Consisting of 3L-NPC Converters with SHE // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911503.
13. Николаев А.А., Афанасьев М.Ю., Гилемов И.Г., Буланов М.В. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станов с использованием преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров // Вестник ИГЭУ. 2023. Вып. 1. С. 41–52. doi: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052.
14. Nikolaev A., Maklakov A., Bulanov M., Gilemov I., Denisevich A., Afanasev M. Current Electromagnetic Compatibility Problems of High-Power Industrial Electric Drives with Active Front-End Rectifiers Connected to a 6–35 kV Power Grid: A Comprehensive Overview // Energies. 2023. No. 16. P. 293. <https://doi.org/10.3390/en16010293>. doi: 10.3390/en16010293. EDN: DECNGB.

References

1. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Afanasev M.Yu., Denisevich A.S. Razrabotka usovershenstvovannogo algoritma ShIM aktivnogo vypryamatelya s adaptatsiei k rezonansnym yavleniyam vo vnutrizavodskoi seti [Development of an Advanced PWM Algorithm for Active Rectifier with Adaptation to Current Resonances in Internal Power Supply System]. *Vestnik IGEU — Vestnik of ISPEU*, 2018, Issue 6, pp. 47–56. doi: 10.17588/2072-2672.2018.6.047-056. EDN: YRWJVZ. [in Russian].

2. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active Rectifier for Medium Voltage Drive Systems. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2001, pp. 557–562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701.
3. Blooming T.M., Carnovale D.J. Application of IEEE STD 5191992 Harmonic Limits. *Conf. Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conf.*, 2006, pp. 1–9. doi:10.1109/PAPCON.2006.1673767.
4. Pontt J., Rodriguez J., Martin S., Aguilera R. Resonance Mitigation and Dynamical Behavior of Systems with Harmonic Filters for Improving Reliability in Mining Plants. *Conf. Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conf. Forty-First IAS Annual Meeting*, 2006, pp. 1298–1302. doi: 10.1109/IAS.2006.256698.
5. Jing T., Maklakov A., Radionov A. e.a. Research on Hybrid SHEPWM Based on Different Switching Patterns. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2019, Vol. 10, No. 4, pp. 1875–1884. doi:10.11591/ijpeds.v10.i4.
6. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Maklakova E.A. Reactive Power Compensation in Industrial Grid via High-Power Adjustable Speed Drives with Medium Voltage 3L-NPC BTB Converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2017, Vol. 8, No. 4, pp. 1455–1466. doi:10.11591/ijpeds.v8.i4.
7. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Bulanov M.V. Issledovanie parallel'noi raboty avtomatizirovannykh elektroprivodov prokatnogo stana i dugovoi staleplavil'noi pechi [Investigation of Parallel Work of Rolling Mill's Automated Electric Drives and an Electric Arc Furnace]. *Vestnik IGEU — Vestnik of ISPEU*, 2017, Issue 3, pp. 59–69. doi: 10.17588/2072-2672.2017.3.059-069. EDN: YUDIVN.
8. Afanasev M.Y., Denisevich A.C., Bulanov M.V., Tulupov P.G. The Experience of Using Specialized Correction Filters to Improve Power Quality in Electrical Networks with Active Rectifiers. *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2022, pp. 386–391. doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906675.
9. Nikolaev A.A., Afanasev M.Yu., Bulanov M.V. Application of a Specialized Passive Filter to Correct the Frequency Response of the Supply Network in order to Eliminate the Negative Impact of Resonance Phenomena. *2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, 2020, pp. 32–37. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234378.
10. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Gilemov I.G., Linkov S.A. Development of a Comprehensive Simulation Model of the Power Supply and Drive System Based on AFE-FC for Power Quality Research. *2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2022, pp. 896–901. doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896303.
11. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Gilemov I.G. e.a. *Razrabotka nauchno obosnovannykh tekhnicheskikh reshenii po obespecheniyu elektromagnitnoi sovmestimosti moshchnykh promyshlennykh elektroprivodov s pitayushchei set'yu* [Development of Scientifically Grounded Technical Solutions to Ensure Electromagnetic Compatibility of Powerful Industrial Electric Drives with a Mains Supply]. Magnitogorsk, Izd-vo Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo un-ta im. G.I. Nosova, 2021. 331 p. ISBN: 978-5-9967-2181-8. EDN: IRFIMK. [in Russian].
12. Maklakov A.S., Demov M.A., Maklakova E.A. e.a. EMC Research of 18-Pulse Circuit Consisting of 3L-NPC Converters with SHE. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Chelyabinsk, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911503.
13. Nikolaev A.A., Afanas'ev M.Yu., Gilemov I.G., Bulanov M.V. Povyshenie kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya prokatnykh stanov s ispol'zovaniem preobrazovatelei chastoty s aktivnymi vypryamitelyami za schet primeneniya spetsializirovannykh passivnykh fil'trov [Improvement of Power Quality in Power Supply Systems of Rolling Mills Using Frequency Converters with Active Rectifiers Due to Use of Specialized Passive Filters]. *Vestnik IGEU — Vestnik of ISPEU*, 2023, Issue 1, pp. 41–52. doi: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052. [in Russian].
14. Nikolaev A., Maklakov A., Bulanov M., Gilemov I., Denisevich A., Afanasev M. Current Electromagnetic Compatibility Problems of High-Power Industrial Electric Drives with Active Front-End Rectifiers Connected to a 6–35 kV Power Grid: A Comprehensive Overview. *Energies*, 2023, No. 16, pp. 293. <https://doi.org/10.3390/en16010293>. doi: 10.3390/en16010293. EDN: DECNGB.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 11.09.2023; принята к публикации 15.09.2023.

The article was submitted 08.06.2023; approved after reviewing 11.09.2023; accepted for publication 15.09.2023.

Научная статья

УДК 621.313.13

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-26-38

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Флюр Рашитович Исмагилов****Flur R. Ismagilov**

доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по науке ПИИШ «Моторы Будущего»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

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

доктор технических наук, доцент,
директор ПИИШ «Моторы Будущего»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Руслан Рустемович Уразбахтин****Ruslan R. Urazbakhtin**

начальник отдела исследований БЛА ПИИШ «Моторы Будущего»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Арсен Владимирович Месропян****Arsen V. Mesropyan**

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой механики и цифрового проектирования,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

Актуальность

Сегодня растет спрос на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения различного рода задач. При этом зачастую они проектируются и изготавливаются на основании покупных импортных комплектующих. Перспективным является создание электрических беспилотных летательных аппаратов, что обусловлено их экологичностью и надежностью. В основе таких летательных аппаратов лежат электрические силовые установки — электротехнические комплексы и системы, состоящие из электродвигателя, инверторного электронного блока и воздушного винта. Широкое распространение имеют электрические беспилотные летательные аппараты самолетного типа, что обусловлено их высокими дальностью и временем полета.

Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат, силовая установка, электродвигатель, регулятор оборотов, воздушный винт, компьютерное моделирование, междисциплинарный подход к проектированию

К электродвигателям беспилотных летательных аппаратов предъявляются повышенные требования к уровню шумов и вибраций, так как корпус беспилотных летательных аппаратов самолетного типа может играть роль резонатора. В рамках программ по обеспечению импорто-независимости Российской Федерации актуальны разработка и исследования электродвигателей для силовых установок электрических беспилотных летательных аппаратов, в том числе самолетного типа.

Цели исследования

Определить современный технический и научный уровень разработок в сфере электродвигателей беспилотных летательных аппаратов. Выявить особенности и тенденции исследований и разработок в области электродвигателей беспилотных летательных аппаратов. Спроектировать, изготовить экспериментальные образцы и исследовать бесконтактный электродвигатель с постоянными магнитами для беспилотных летательных аппаратов. Определить ряд работ, направленных на формирование методологии проектирования и исследования электродвигателей для силовых установок беспилотных летательных аппаратов.

Методы исследования

При проектировании использовались методики аналитического расчета и компьютерного конечно-элементного моделирования. Для валидации компьютерных моделей и определения соответствия созданного электродвигателя требуемым параметрам использовались методы экспериментального исследования. Для проведения экспериментальных исследований использовался специальный стенд с возможностью измерения тяги силовой установки. В перспективе для сопряженных моделей планируется применение методов 3D сканирования и восстановления геометрии воздушных винтов.

Результаты

В рамках проведенных работ был разработан и исследован электродвигатель для беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Были выявлены особенности, которые необходимо учитывать при проектировании. Был определен ряд работ, которые будут выполняться в рамках проектирования и исследования электродвигателей для беспилотных летательных аппаратов, направленные на создание новой высокоточной междисциплинарной методологии проектирования. Проведенные работы являются основой для освоения новых и научных подходов к созданию электрических силовых установок беспилотных летательных аппаратов.

Для цитирования: Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Уразбахтин Р. Р., Месропян А. В. Разработка и исследования бесконтактного электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 26-38. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-26-38>.

Original article

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Relevance

Today, there is a growing demand for the unmanned aerial vehicles usage to solve various types of problems. Moreover, unmanned aerial vehicles often designed and manufactured using standard imported components. The creation of electric unmanned aerial vehicles is promising, due to their environmental friendliness and reliability. Such aircraft are based on electric propulsion systems — electrotechnical complexes and

Keywords

unmanned aerial vehicle, propulsion system, electric motor, speed controller, propeller, computer modeling, interdisciplinary approach to design

systems consisting of an electric motor, an inverter electronic unit and a propeller. Aircraft type electric unmanned aerial vehicles are widespread due to their high range and flight time. Electric motors of aircraft type unmanned aerial vehicles are subject to increased requirements for noise and vibration levels, since the body of aircraft-type unmanned aerial vehicles can act as a resonator. As part of programs to ensure import independence of the Russian Federation, the development and research of electric motors for propulsion systems of electric unmanned aerial vehicles, including aircraft types, are relevant.

Aims of research

The main aim of the research is to determine the current technical and scientific level of developments in the field of electric motors for unmanned aerial vehicles. Identification of features and trends in research and development in the field of electric motors for unmanned aerial vehicles. Design, manufacture of experimental samples and research a brushless permanent magnet electric motor for unmanned aerial vehicles. Identifying a series of works aimed at developing a methodology for the design and research of electric motors for propulsion systems of unmanned aerial vehicles.

Research methods

During the design, methods of analytical calculation and computer finite element modeling were used. Experimental research methods were used to validate computer models and determine whether the created electric motor met the required parameters. To conduct experimental studies, a special stand was used with the ability to measure the thrust of the propulsion system. In the future, it is planned to use 3D scanning methods and restore the geometry of propellers for coupled models.

Results

As a result of the work carried out, an electric motor for aircraft-type unmanned aerial vehicles was developed and researched. Features that must be considered during design were identified. Several works have been identified that will be carried out as part of the design and research of electric motors for unmanned aerial vehicles, aimed at creating a new high-precision interdisciplinary design methodology. The work carried out is the basis for the development of new and scientific approaches to the creation of electric propulsion systems for unmanned aerial vehicles.

For citation: Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Urazbakhtin R.R., Mesropyan A.V. Razrabotka i issledovaniya beskontaktnogo elektrod-vigatelya dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Development and Research of Brushless Electric Motor for Unmanned Aerial Vehicles]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 26-38. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-26-38>.

Введение

Сегодня растет спрос на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения различного рода задач [1, 2]. Во-первых, БПЛА используются при проведении различного рода мониторинга, в частности мониторинга государственной границы, мониторинга стихийны бедствий (пожаров, наводнений, землетрясений), мониторинга биоре-

сурсов, мониторинга предприятий, мониторинга транспортных магистралей и т.д. Во-вторых, БПЛА применяются при доставке не крупногабаритных грузов в труднодоступные или изолированные места. В-третьих, БПЛА задействованы на службе МЧС, в частности, поиск пропавших людей и объектов, доставка специальных средств на места чрезвычайных происшествий, оперативная доставка

пакетов первой помощи. В-четвертых, БПЛА участвуют в обеспечении ретрансляции различных видов сигналов.

В связи с рядом преимуществ особенно актуальными становятся разработка и эксплуатация электрических БПЛА. Это обусловлено их экологичностью, малой шумностью, высокой надежностью и удобством в эксплуатации. В основе электрических БПЛА лежат электрические силовые установки, обобщенная структура которых представлена на рисунке 1.

Электрическая силовая установка БПЛА состоит из регулятора оборотов, электродвигателя и воздушного винта. Тяга образуется за счет вращения электродвигателем воздушного винта, который выступает в роли нагрузки. На электродвигатель поступает трехфазное напряжение. В большинстве случаев реализуется бездатчиковый алгоритм управления. Регулятор оборотов фактически является инвертором, который преобразует постоянное напряжение от аккумулятора в трехфазное переменное напряжение для электродвигателя. На регулятор оборотов поступает постоянное напряжение, которое определяется величиной $k \cdot S$, где k — целое число, больше нуля, S — напряжение одной литий полимерной аккумуляторной ячейки. В полностью заряженном состоянии $S = 4,2 В$, в номинальном режиме

$S = 3,7 В$, в разряженном состоянии $S = 2,5 В$. Обычно в БПЛА не используются аккумуляторы с числом ячеек более 14. На регулятор оборотов также поступает управляющий сигнал, который отвечает за уровень мощности, подаваемой от аккумулятора на электродвигатель. Управляющий сигнал может представлять собой ШИМ сигнал, ШИМ сигнал повышенной частоты или цифровой протокол. Некоторые регуляторы оборотов снабжаются встроенными понижающими преобразователями напряжения и могут питать, например, датчики тока или другое бортовое оборудование с малым потреблением мощности.

Стабильная работа силовой установки влияет на стабильность полета БПЛА. Поэтому для силовой установки важны плавное регулирование скорости вращения электродвигателя и минимальное количество шумов и вибраций, возникающих при ее работе. В особенности это актуально для БПЛА самолетного типа, полый корпус которых выполняет роль резонатора.

В связи с современной геополитической обстановкой и необходимостью обеспечения импортонезависимости Российской Федерации актуальны разработка и исследования отечественных силовых установок для БПЛА, которые на первом этапе позволят заместить применяющиеся зарубежные силовые уста-

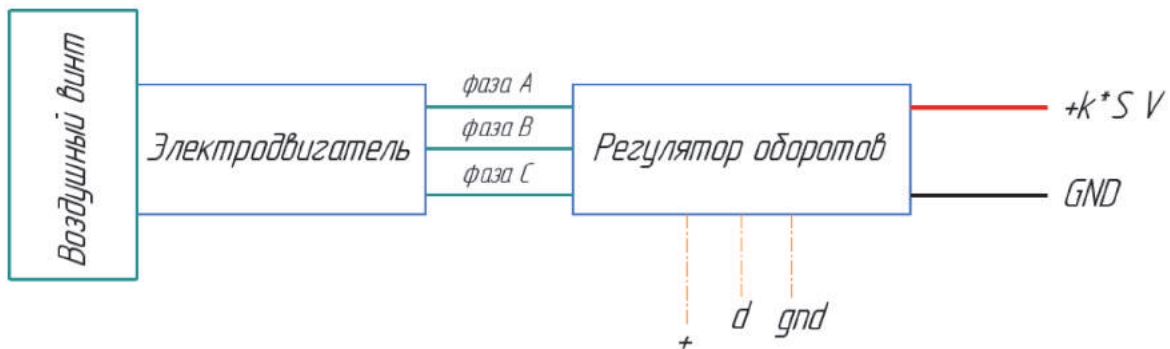


Рисунок 1. Обобщенная структура электрической силовой установки БПЛА

Figure 1. Generalized structure of the UAV electric propulsion system

новки, а в будущем будут модернизированы и позволят расширить функциональные возможности БПЛА, повысить их эффективность.

Сегодня электродвигатели для электрических силовых установок БПЛА производятся рядом крупных производителей, например, DJI [3], T-Motor [4], SunnySky [5], iFlight [6] и другими. Среди отечественных производителей производство электродвигателей БПЛА анонсировала компания «Андроидная техника» [7], однако большинство типоразмеров электродвигателей БПЛА у них в настоящее время находятся на уровне проведения расчетов и моделирования. При этом часть электродвигателей обладает датчиковым управлением и жидкостным охлаждением, что накладывает ограничения на их применения на существующих БПЛА. В целом, анализ серийно производящихся электродвигателей для БПЛА показал, что они рассчитаны на бездатчиковые алгоритмы управления, а их охлаждение происходит за счет потока воздуха от воздушного винта и от набегающего потока воздуха.

Серийно производящиеся электродвигатели для БПЛА представлены широким рядом типоразмеров. Типоразмер обычно обозначается числом. Например, типоразмер электродвигателя для БПЛА 4035 означает, что диаметр магнитопровода статора электродвигателя равен 40 мм, активная длина по магнитопроводу статора равна 35 мм. Также в одном типоразмере электродвигатели для БПЛА могут выполняться на разные частоты вращения. Например, обозначение 250 kv соответствует тому, что на 1 В питающего напряжения приходится 250 об/мин. Наименование электродвигателей для БПЛА обычно состоит из указания типоразмера и частоты вращения, например, 4035 250 kv.

Научные исследования в области электродвигателей для БПЛА также ведутся некоторыми научно-исследовательскими коллективами.

Работа [8] посвящена исследованиям электродвигателя для БПЛА мощностью 120 Вт с соотношением пазов и полюсов 24/10 и постоянными магнитами марки NdFe35. Авторами преимущественно исследовались распределение магнитного потока в электродвигателе, переходные процессы и пульсации крутящего момента.

В работе [9] исследуется микроэлектродвигатель для беспилотного летательного аппарата, выбирается соотношение числа пазов и полюсов исходя из критериев эффективности и удельной мощности, рассматривается применение различных электротехнических сталей для магнитопровода статора и проводится валидация компьютерной модели.

В работе [10] исследуется максимизация удельной мощности электродвигателя для БПЛА мощностью 20 кВт и частотой вращения 3000 об/мин. Авторами достигнута удельная мощность 2,25 кВт/кг в номинальном режиме и коэффициент полезного действия (КПД) 95,52 %.

Анализ современных научно-исследовательских работ показывает, что большое внимание при проектировании электродвигателей БПЛА уделяется выбору соотношения числа пазов и полюсов, уменьшению пульсаций крутящего момента, исследованию распределения магнитного потока в электродвигателе и повышению удельной мощности с учетом ограничения в виде охлаждения воздушным потоком.

Настоящая статья посвящена разработке и исследованиям электродвигателя для БПЛА самолетного типа, входящего в состав силовой установки БПЛА самолетного типа. Во введении приводится обобщенная схема электрической сило-

вой установки БПЛА и обзор электродвигателей для БПЛА. Во втором разделе проводится постановка задачи по разработке и исследованиям электродвигателя БПЛА самолетного типа. В третьей разделе описываются методы решения задач, приводятся результаты расчета и моделирования электродвигателя для БПЛА самолетного типа. Далее приводятся результаты стендовых испытаний электродвигателя для БПЛА самолетного типа. В заключении анонсируются будущие работы в направлении электрических силовых установок для беспилотных летательных аппаратов.

Постановка задачи

В рамках настоящей работы задачей является разработка и исследования электродвигателя для БПЛА самолетного типа на основании отечественных материалов и обладающего пониженным уровнем шумов и вибраций. В качестве БПЛА, для которого проектируется электродвигатель, был выбран БПЛА самолетного типа, который применяется для задач мониторинга. Скорость полета такого типа БПЛА обычно составляет 70–100 км/ч. При этом достигается время полета до 4,5–5,0 ч. Размах крыльев составляет порядка 3,5 м. В ряде случаев такие БПЛА выполняются в виде полого

монокрыла, что позволяет снизить их массу. В этом случае минимизация вибраций от силовой установки играет особенно важную роль.

Особенность электродвигателей силовых установок БПЛА самолетного типа заключается в том, что они работают в широком диапазоне мощностей. На взлете силовая установка БПЛА должна обеспечить максимум тяги, а в крейсерском режиме, когда самолет опирается на крылья, выдает 15–25 % от максимальной мощности.

В таблице 1 представлены исходные данные, согласно которым велось проектирование электродвигателя для БПЛА самолетного типа.

Исходя из условий необходимости обеспечения возможности применения разрабатываемого электродвигателя на существующие БПЛА самолетного типа и на основании анализа серийно производящихся электродвигателей БПЛА было принято решение проектировать бесконтактный электродвигатель на постоянных магнитах, предназначенный для работы от бездатчиковой системы управления.

Методы решения

Для решения поставленной задачи, в первую очередь, был проведен аналити-

Таблица 1. Параметры электродвигателя БПЛА самолетного типа

Table 1. Parameters of the electric motor of an aircraft-type UAV

Параметр	Значение
Масса, кг, не более	0,55
Частота вращения, об/мин	0–8500
Выходная мощность при частоте вращения 8200 об/мин и напряжении питания 42 В, не менее	2,5
Крутящий момент на валу при 8200 об/мин и напряжении питания 42 В, Нм, не менее	2,5
Габаритная длина, мм, не более	125
Габаритный диаметр, мм, не более	50
Охлаждение	Воздушное принудительное

ческий расчет электродвигателя, в том числе с использованием программного обеспечения Ansys Maxwell Rmxprt. При проектировании также учитывалось, что конечная цена электродвигателя должна быть конкурентноспособной по отношению импортного аналога. Исходя из этого не рассматривались топологии электродвигателей со скосом постоянных магнитов и со скосом пазов магнитопровода статора. В таблице 2 представлены результаты расчета электродвигателя для БПЛА.

На основании проведенных расчетов было проведено конечно-элементное моделирование электродвигателя для БПЛА с использованием программного обеспечения Ansys Maxwell 2D. Конечно-элементное моделирование проводилось для двух режимов работы — для крейсерского полета и для взлетного режима.

В крейсерском режиме частота вращения электродвигателя составляет 4920 об/мин, на взлетном режиме — 8200 об/мин.

На рисунке 2 представлено распределение магнитной индукции в электродвигателе.

На рисунке 3 представлен крутящий момент электродвигателя.

На рисунке 4 представлены фазные токи электродвигателя.

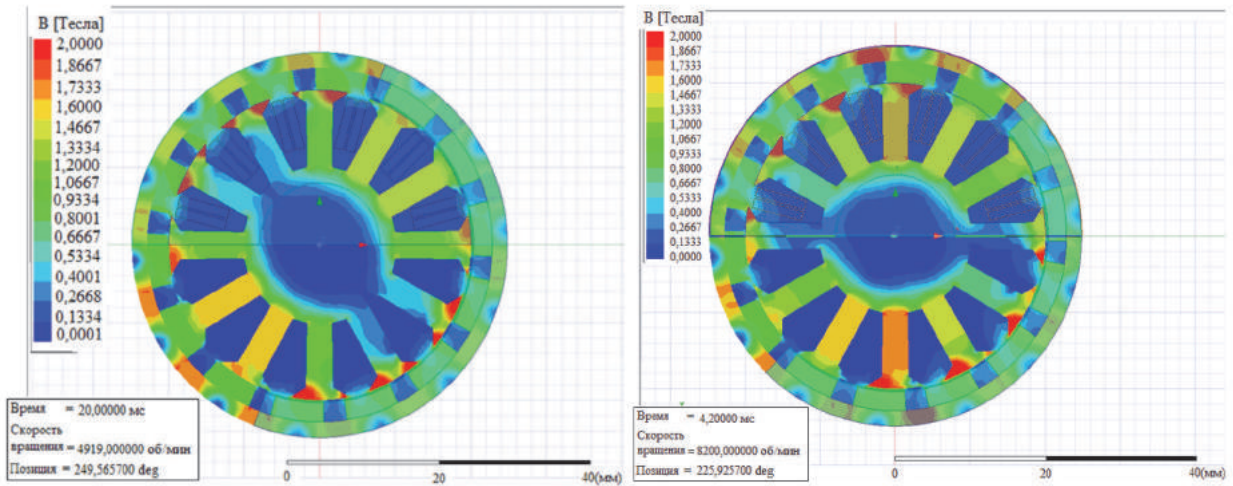
На рисунке 5 представлены электрическая и механическая мощности электродвигателя.

Результаты компьютерного моделирования показали, что спроектированный электродвигатель отличается достаточно высокой индукцией в магнитопроводе. Также результаты моделирования показали, что электродвигатель соответствует требуемым параметрам.

Таблица 2. Результаты расчета электродвигателя для БПЛА

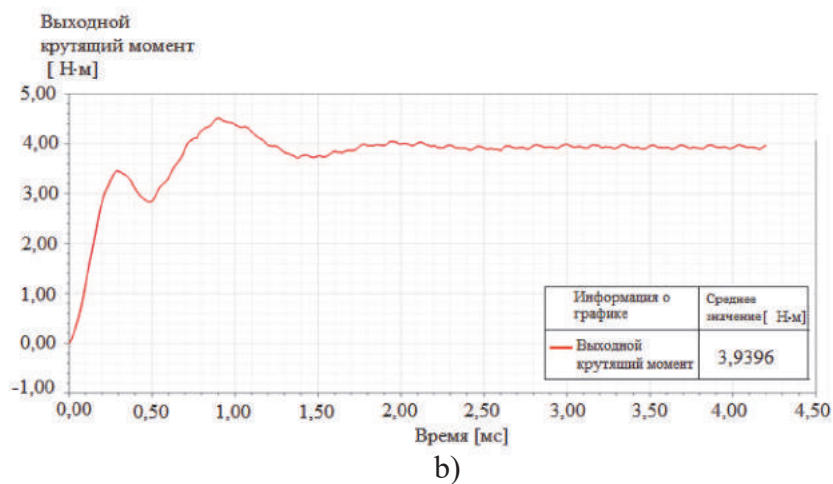
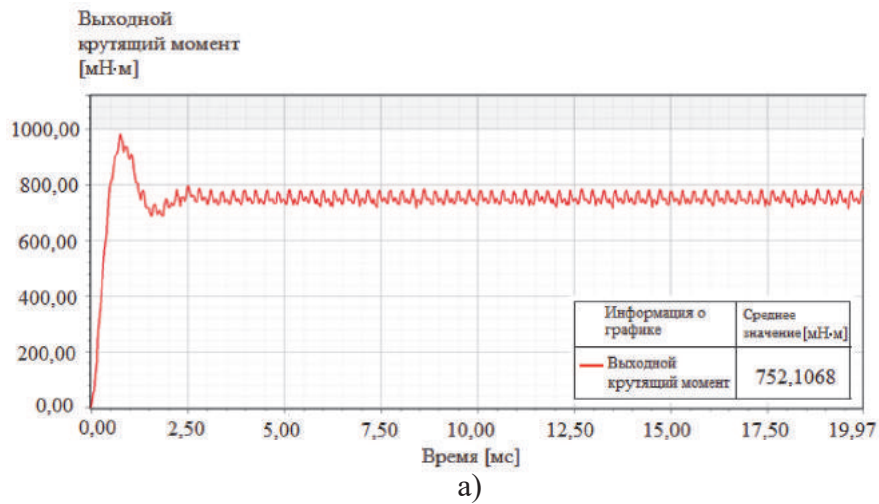
Table 2. Results of calculation of the electric motor for the UAV

Параметр	Значение
Число фаз	3
Число полюсов	14
Число пазов статора	12
Внешний диаметр статора, мм	40
Внешний диаметр ротора, мм	49,7
Внутренний диаметр ротора, мм	40,7
Активная длина, мм	36
Марка стали магнитопровода статора	2421
Толщина листов стали статора, мм	0,18
Число слоев обмотки	2
Количество витков в катушке	8
Количество жил в проводнике	4
Диаметр неизолированной жилы, мм	0,5
Коэффициент заполнения паза	0,52
Тип обмотки статора	Трехфазная зубцовая
Количество параллельных ветвей	1
Марка магнитов	NdFeB, N45UH, Br=1,345 Тл, Hc=909 кА/м
Толщина магнитов, мм	2,5
Момент инерции ротора, кг/ м ²	5,51*10 ⁻⁵



а) б)
Рисунок 2. Распределение магнитной индукции в электродвигателе:
 в крейсерском режиме (а), во взлетном режиме (б)

Figure 2. Distribution of magnetic induction in the electric motor:
 in cruising mode (a), in take-off mode (b)



а) б)
Рисунок 3. Крутящий момент электродвигателя: в крейсерском режиме (а), во взлетном режиме (б)

Figure 3. Electric motor torque: in cruising mode (a), in take-off mode (b)

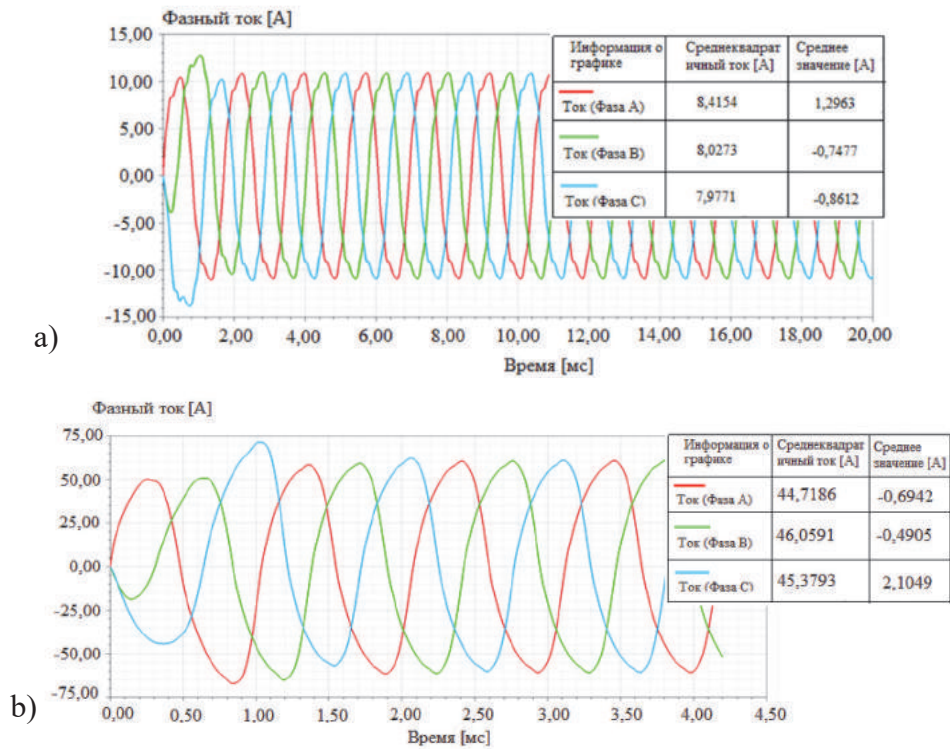


Рисунок 4. Фазные токи электродвигателя: в крейсерском режиме (а), во взлетном режиме (б)

Figure 4. Phase currents of the electric motor: in cruising mode (a), in take-off mode (b)

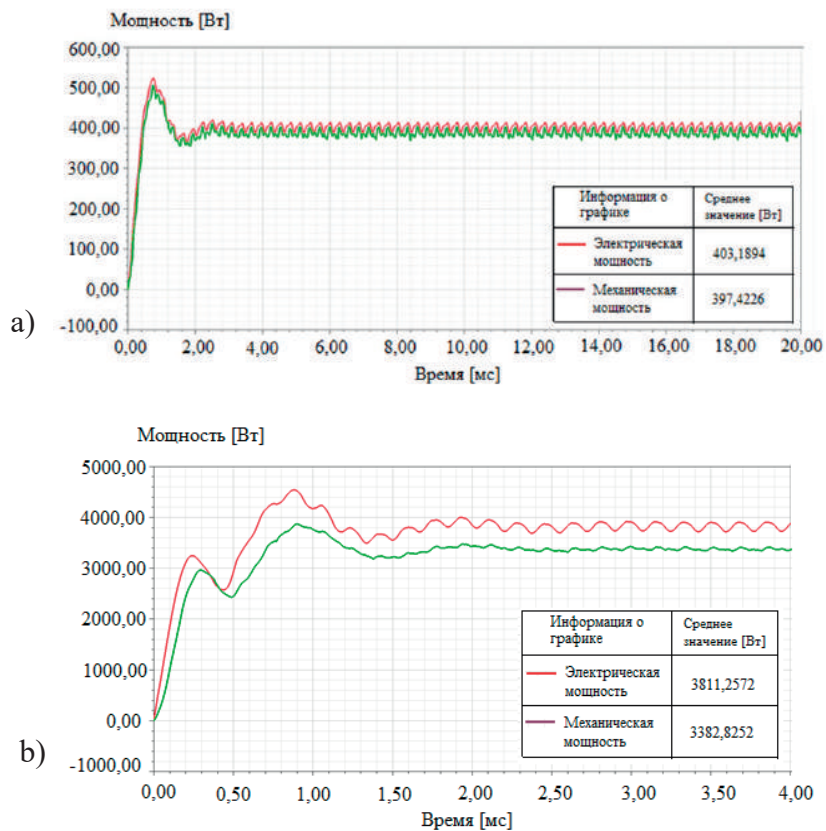


Рисунок 5. Электрическая и механическая мощность электродвигателя: в крейсерском режиме (а), во взлетном режиме (б)

Figure 5. Electrical and mechanical power of the electric motor: in cruising mode (a), in take-off mode (b)

Результаты

Для валидации расчетов и компьютерной модели электродвигателя были изготовлены три экспериментальных образца электродвигателя и проведены его экспериментальные исследования. На рисунке 6 представлен экспериментальный образец электродвигателя.

Сначала были проведены измерения противо-ЭДС между выводами электродвигателя. Результаты измерения показаны на рисунке 7. Измерения противо-ЭДС всех экспериментальных образцов показали, что между выводами противо-ЭДС от образца к образцу отличается не более, чем на 3 %, что свидетельствует о повторяемости между произведенными экспериментальными образцами и отсутствии ошибок при изготовлении.

Далее проводились испытания электродвигателя с воздушным винтом, то есть в составе электрической силовой установки. Основным параметр при таких испытаниях — тяга. Спроектированный электродвигатель рассчитан на эксплуатацию с воздушным винтом диаметром 14 дюймов и шагом 10. Во взлетном режиме силовая установка с таким воздушным винтом должна разви-

вать не менее 4,7 кг. В противном случае существует риск сваливания БПЛА самолетного типа при старте, на котором планируются дальнейшие летные испытания электродвигателя. Электродвигатель с воздушным винтом на стенде представлен на рисунке 8.

В таблице 3 представлены параметры электродвигателя с воздушным винтом во взлетном режиме (осредненные по трем экспериментальным образцам). В таблице 4 — параметры электродвигателя с воздушным винтом в крейсерском режиме (осредненные по трем экспериментальным образцам). При экспериментальных исследованиях также имитировалось состояние аккумуляторов при запуске от источника питания. Запуск во взлетном режиме соответствует полностью заряженным аккумуляторам, то есть напряжению 42 В. Работа в крейсерском режиме соответствует номинальному напряжению аккумуляторов 37 В.

Результаты экспериментальных исследований показали, что электродвигатель в составе силовой установки позволяет обеспечить необходимую во взлетном режиме тягу.



Рисунок 6. Экспериментальный образец электродвигателя для БПЛА самолетного типа

Figure 6. Experimental sample of an electric motor for an aircraft-type UAV

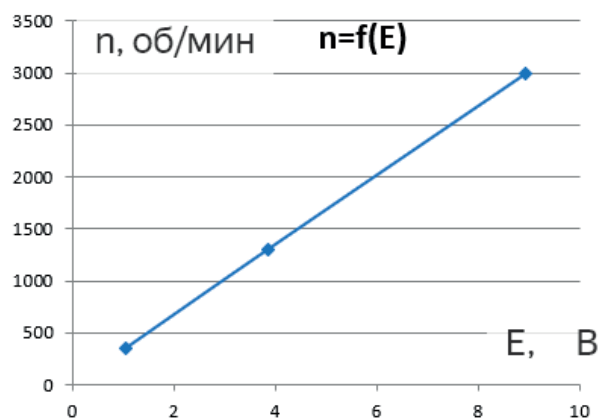


Рисунок 7. Противо-ЭДС электродвигателя

Figure 7. Back EMF of an electric motor

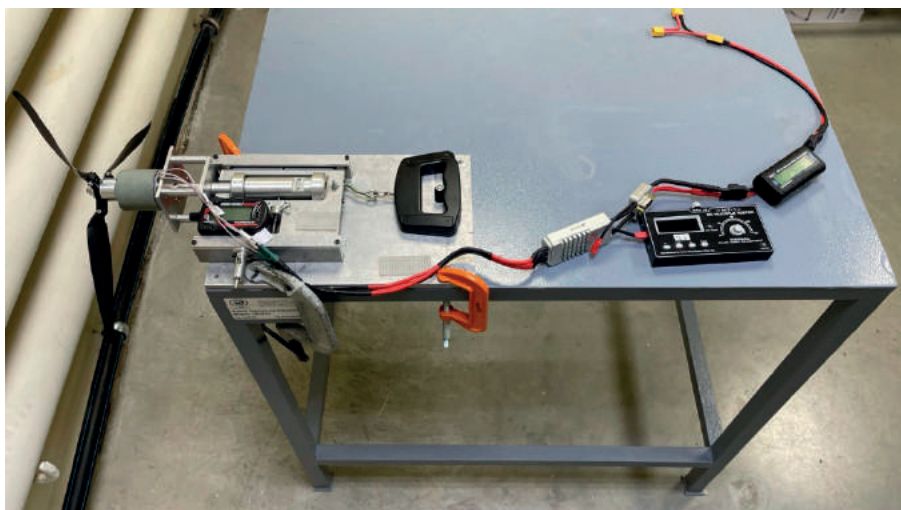


Рисунок 8. Электродвигатель с воздушным винтом на стенде

Figure 8. Electric motor with a propeller on a stand

Таблица 3. Параметры электродвигателя с воздушным винтом во взлетном режиме

Table 3. Parameters of an electric motor with a propeller in takeoff mode

№ п/п	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Тяга, кг
1	42	—	—	—
2	42	0,85	1892	—
3	42	2,35	2900	0,49
4	42	5,2	3885	1,06
5	42	9,8	4836	1,81
6	42	16,35	5747	2,72
7	42	25,5	6623	3,71
8	42	38,1	7440	4,81
9	42	54	8155	5,88
10	42	59	8280	6,15

Таблица 4. Параметры электродвигателя с воздушным винтом в крейсерском режиме

Table 4. Parameters of an electric motor with a propeller in cruising mode

№ п/п	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Тяга, кг
1	37	0,21	505,4	—
2	37	0,76	1690	—
3	37	2,05	2580	—
4	37	4,35	3460	0,83
5	37	7,9	4310	1,40
6	37	13,3	5132	2,11
7	37	20,9	5930	2,91
8	37	30,9	6700	3,82
9	37	42,5	7310	4,65
10	37	45,8	8720	4,92

Результаты экспериментальных исследований подтверждают правильность расчетов и компьютерных моделей.

При экспериментальных исследованиях электродвигателя проявилось резкое повышение шумов и вибраций на частотах вращения 1700...2000 об/мин. Это обусловлено совпадением критической частоты ротора электродвигателя и частоты действия электромагнитных сил взаимодействия статора и ротора. Для электродвигателя с внешним ротором и выбранным числом пазов и полюсов резонанс в рабочем диапазоне частот вращения является неизбежным явлением, в связи с этим при проектировании необходимо принимать ряд мер по его демпфированию.

Выводы

В настоящей работе приведена обобщенная структура электрической силовой установки БПЛА, проведен обзор электродвигателей для БПЛА и современных научных исследований в области БПЛА. На основании проведенного обзора был выбран тип электродвигателя для БПЛА и проведено проектирование электродвигателя для БПЛА самолетного типа с необходимыми параметрами. Приведены результаты расчетов электродвигателя и результаты компьютерного моделирования. Также проведены экспериментальные исследования электродвигателя на противо-ЭДС и в составе силовой установки, подтверждающие его соответствие необходимым параметрам.

Список источников

1. Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). С. 26–29.
2. Жарникова А.А., Пшидаток С.К. Эффективность использования и область применения беспилотных летательных аппаратов // Научное

Будущие работы в области электродвигателей для БПЛА будут направлены на формирование требований к электродвигателям БПЛА и определение тенденций их развития на основе анализа современной научной литературы. Также будут рассмотрены вопросы прочностного и модального расчетов для определения амплитуды резонанса, предложены методы по его демпфированию. Будут рассмотрены вопросы снижения пульсаций крутящего момента, снижения величины зубцового момента. Будет рассмотрен вопрос выбора соотношения числа пар пазов и полюсов исходя из требований к электродвигателям БПЛА. Будут проводиться сопряженный тепловой и аэродинамический расчеты, причем будет рассматриваться вопрос восстановления геометрии воздушного винта методом 3D сканирования в связи с отсутствием трехмерных моделей в открытом доступе. Будет исследоваться влияние формы переменного трехфазного напряжения, формируемого на основании широтно-импульсной модуляции, на параметры электродвигателя для БПЛА. Будет рассматриваться вопрос снижения шумов и вибраций электродвигателя БПЛА. По результатам работ будет предложена мультидисциплинарная методология проектирования электродвигателей для электрических силовых установок БПЛА.

Настоящая статья открывает цикл работ, посвященных проектированию и исследованиям электродвигателей для БПЛА.

обеспечение агропромышленного комплекса. 2020. С. 407–410.

3. DJI: официальный сайт компании. URL: <https://www.dji.com/ru/products/components?site=brandsite&from=footer#propulsion-system> (дата обращения: 29.09.2023).

4. T-Motor: официальный сайт компании. URL: <https://store.tmotor.com/> (дата обращения: 29.09.2023).

5. Sunnysky: официальный сайт компании. URL: <http://en.rcsunnysky.com/> (дата обращения: 29.09.2023).

6. iFlight: официальный сайт компании. URL: <https://shop.iflight.com/> (дата обращения: 29.09.2023).

7. Научно-производственное объединение «Андроидная техника»: официальный сайт компании. AT DRIVE. URL: <https://npo-at.com/production/> (дата обращения: 29.09.2023).

8. Zhu C., Mei C., Zhang G., Peng T., Yao W., Han A. Design and Simulation of Permanent Magnet Brushless DC Motor for Small-Sized Load UAV // 2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), IEEE, 2022. P. 52–56. doi: 10.1109/AEEES54426.2022.9759818.

9. Li G., Dou Y., Zhao J., You W. Performance Improvement of a Micro Permanent Magnet Motor // 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, 2022. P. 1–6. doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983272.

10. Xu J. e.a. Multi-Objective Optimization Method to Maximize Power Density and Efficiency of an Electric Propulsion Motor in UAV Applications // IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023.

References

1. Fedoseeva N.A., Zagvozdkin M.V. Perspektivnye oblasti primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Promising Areas of Application of Unmanned Aerial Vehicles]. *Nauchnyi zhurnal — Scientific Journal*, 2017, No. 9 (22), pp. 26-29. [in Russian].

2. Zharnikova A.A., Pshidatok S.K. Effektivnost' ispol'zovaniya i oblast' primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Efficiency of Use and Scope of Unmanned Aerial Vehicles]. *Nauchnoe*

obespechenie agropromyshlennogo kompleksa — Scientific Support of the Agro-Industrial Complex, 2020, pp. 407-410. [in Russian].

3. DJI: ofitsial'nyi sait kompanii [DJI: Official Website of the Company]. URL: <https://www.dji.com/ru/products/components?site=brandsite&from=footer#propulsion-system> (accessed 29.09.2023).

4. T-Motor: ofitsial'nyi sait kompanii [T-Motor: Official Website of the Company]. URL: <https://store.tmotor.com/> (accessed 29.09.2023).

5. Sunnysky: ofitsial'nyi sait kompanii [Sunnysky: Official Website of the Company]. URL: <http://en.rcsunnysky.com/> (accessed 29.09.2023).

6. iFlight: ofitsial'nyi sait kompanii [iFlight: Official Website of the Company]. URL: <https://shop.iflight.com/> (accessed 29.09.2023).

7. Nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie «Androidnaya tekhnika»: ofitsial'nyi sait kompanii. AT DRIVE [Android Technology: Official Website of the Company]. AT DRIVE. URL: <https://npo-at.com/production/> (accessed 29.09.2023).

8. Zhu C., Mei C., Zhang G., Peng T., Yao W., Han A. Design and Simulation of Permanent Magnet Brushless DC Motor for Small-Sized Load UAV. 2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), IEEE, 2022, pp. 52–56. doi: 10.1109/AEEES54426.2022.9759818.

9. Li G., Dou Y., Zhao J., You W. Performance Improvement of a Micro Permanent Magnet Motor. 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983272.

10. Xu J. e.a. Multi-Objective Optimization Method to Maximize Power Density and Efficiency of an Electric Propulsion Motor in UAV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023.

Статья поступила в редакцию 03.10.2023; одобрена после рецензирования 10.10.2023; принята к публикации 12.10.2023.

The article was submitted 03.10.2023; approved after reviewing 10.10.2023; accepted for publication 12.10.2023.

Научная статья

УДК 621.3.089

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-39-48

АДАПТАЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ПО МЕТОДУ И. НАКАТАНИ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЗАДАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ



Алексей Юрьевич Демин

Aleksei Yu. Demin

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



Диана Юрьевна Пашали

Diana Yu. Pashali

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



Гузель Ихсановна Заманова

Guzel I. Zamanova

*кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры общей физики,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия*



Розалия Марселевна Нафикова

Rosalia M. Nafikova

*аспирант кафедры электронной инженерии,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия*

Актуальность

Широко используемая методика диагностики организма человека по И. Накатани опирается на положения традиционной китайской медицины. К ее достоинствам относятся неинвазивность, простота аппаратной реализации, возможность быстрой машинной обработки результатов измерений, пригодность для проведения экспресс-диагностики, а также широкое распространение за рубежом и в России. Недостатком методики И. Накатани является использование устаревших аппаратных решений с невысокой точностью результатов измерений и зачастую невозможность сравнения результатов, полученных с помощью различных аппаратных решений.

Ключевые слова

измерительный генератор,
заданная электрическая
мощность, диагностика,
электрическое
сопротивление,
точки акупунктуры

Цель исследования

Адаптация методики диагностики по И. Накатани к использованию современной, более метрологически надежной аппаратной базы и упрощение цифровой обработки данных.

Методы исследования

В данной работе предпринята попытка объединить преимущества метода диагностики И. Накатани и современных аппаратных решений на основе измерительных генераторов заданной электрической мощности. Рассмотрена возможность приведения к общему виду результатов измерений, полученных с помощью различных приборов. Представлены формулы пересчета из результатов измерений электрического сопротивления в точках акупунктуры в единицы нелинейной эмпирической шкалы, используемой в методе И. Накатани.

Результаты

Использование методики И. Накатани с новыми аппаратными решениями на основе измерительных генераторов заданной электрической мощности повысит достоверность получаемых результатов измерения и диагностики в целом. Применение формул пересчета результатов, получаемых с помощью измерительных генераторов заданной электрической мощности, позволит проводить сравнение с данными, полученными с помощью классического метода И. Накатани, и полностью использовать наработанный в данном методе практический опыт и статистические данные, в том числе полученные зарубежными исследователями традиционной китайской медицины.

Для цитирования: Демин А. Ю., Пашали Д. Ю., Заманова Г. И., Нафикова Р. М. Адаптация диагностики по методу И. Накатани к использованию измерительных генераторов заданной электрической мощности и цифровой обработке данных // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 39-48. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-39-48>.

Original article

ADAPTATION OF DIAGNOSTICS BY I. NAKATANI'S METHOD TO THE USE OF MEASURING GENERATORS WITH PRESCRIBED ELECTRICAL POWER AND DIGITAL DATA PROCESSING

Relevance

The widely used method for diagnosing the human body according to I. Nakatani is based on the principles of traditional Chinese medicine. Its advantages include non-invasiveness, simplicity of hardware implementation, the possibility of rapid machine processing of measurement results, suitability for express diagnostics, and wide distribution abroad and in Russia. The disadvantage of I. Nakatani's technique is the use of outdated hardware solutions with low accuracy of measurement results and often the impossibility of comparing results obtained using different hardware solutions.

Aim of research

Adaptation of diagnostic methods according to I. Nakatani to the use of modern, more metrologically reliable hardware and simplification of digital data processing.

Research methods

In this work, an attempt is made to combine the advantages of I. Nakatani's diagnostic method and modern hardware solutions based on measuring generators with prescribed electrical power. The possibility of

Keywords

measuring generator, prescribed electrical power, diagnostics, electrical resistance, acupuncture points

bringing measurement results obtained using various instruments to a general form is considered. Formulas are presented for converting from the results of measurements of electrical resistance at acupuncture points into units of the nonlinear empirical scale used in I. Nakatani's method.

Results

Applying of I. Nakatani's methodology with new hardware solutions based on measuring generators with prescribed electrical power will increase the reliability of the obtained measurement results and diagnostics in general. The use of formulas for recalculating the results obtained using measuring generators of a given electrical power will make it possible to compare with data obtained using the classical method of I. Nakatani and fully use the practical experience and statistical data gained in this method, including those obtained by foreign researchers of traditional Chinese medicine.

For citation: Demin A. Yu., Pashali D. Yu., Zamanova G. I., Nafikova R. M. Adaptatsiya diagnostiki po metodu I. Nakatani k ispol'zovaniyu izmeritel'nykh generatorov zadannoy elektricheskoy moshchnosti i tsifrovoy obrabotke dannykh [Adaptation of Diagnostics by I. Nakatani's Method to the Use of Measuring Generators with Prescribed Electrical Power and Digital Data Processing]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 39-48. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-39-48>.

Введение

Методика диагностики по И. Накатани относится к одному из широко используемых методов, основанных на положениях традиционной китайской медицины [1]. К преимуществам метода следует отнести неинвазивность, простоту аппаратной реализации, возможность быстрой цифровой обработки результатов измерений, методика одобрена Минздравом РФ [2] и широко применяется как в России, так и за рубежом. Несмотря на очевидные достоинства методика имеет ряд недостатков, такие как применение устаревших аппаратных решений, изначально предполагающих невысокую точность получаемых результатов измерений в случае биологических объектов. В данной работе предпринята

попытка объединить преимущества метода диагностики И. Накатани и современных аппаратных решений на основе измерительных генераторов заданной электрической мощности. Рассматриваются вопросы приведения к общему виду результатов измерения, полученных с помощью различных приборов.

Для получения значений электрического сопротивления в точках акупунктуры (ТА) используется измерительная система (ИС) под управлением микроконтроллера (МК) с измерительным генератором заданной электрической мощности (ИГЗМ) и двухэлектродная схема отведения. Технические характеристики системы приведены в таблице 1, структура — на рисунке 1.

Таблица 1. Характеристики измерительной системы

Table 1. Characteristics of the measuring system

№	Название (интерфейс с ПК)	Режимы	Диапазоны измерений	Тип индикации	АЦП	Погрешность, %
1	ИПЛЗКП-05д (RS232/USB)	ИГЗМ 40мкВт	10кОм- 350кОм	аналоговая, цифровая (ПК)	10 бит	5
		ПТН	0-50мкА	аналоговая, цифровая (ПК)	10 бит	10

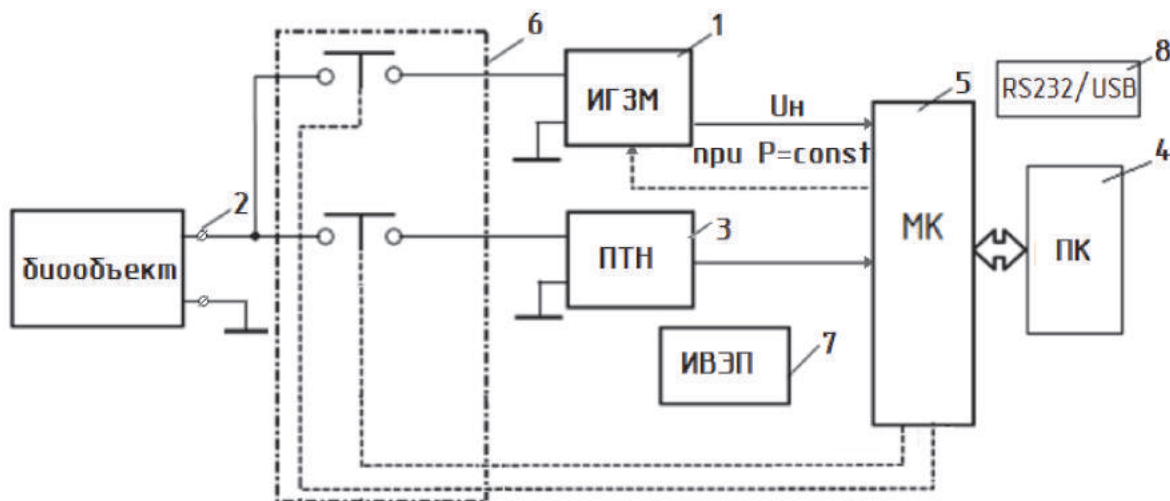


Рисунок 1. Двухканальная ИС с передачей данных об электрических параметрах ТА в ПК по последовательному интерфейсу

Figure 1. Two-channel measuring system with data transfer on the electrical parameters of acupuncture points to a PC via a serial interface

ИС предназначена для оценки состояния биообъекта при взаимодействии с источником заданной электрической мощности с положительной полярностью напряжения (1) и тока замыкания измерительных электродов (2) на измерительный преобразователь с малым входным сопротивлением (3) после воздействия импульсом с заданной электрической мощностью [3]. Результаты измерений вводятся в ПК (4) через последовательный порт МК (5). Измерительные блоки (1, 3), подключаются к электродам через блок коммутации (6) на основе микросхем низкоомных аналоговых ключей, которыми управляет МК (5). Блок ИГЗМ обеспечивает воздействие заданной электрической мощностью на биоткань, а блок преобразователя ток–напряжение (ПТН) обеспечивает получение режима короткого замыкания электродов. Источник вторичного электрического питания (ИВЭП) (7) обеспечивает электронные узлы системы электрической энергией и выполнен в соответствии с требованиями электробезопасности для медицинской аппаратуры.

В основе ИС использован аналоговый ИГЗМ, однако управление работой осуществляется с помощью МК, что позволяет значительно повысить мобильность системы за счет использования подключения к ПК при помощи широко распространенных последовательных интерфейсов передачи данных (RS232 или USB — через преобразователь интерфейсов (8)).

Программное обеспечение ИПЛЗКП-05д позволяет передавать на компьютер через последовательный порт и регистрировать результат измерения электрического сопротивления и тока в виде количества отсчетов АЦП МК, которое затем поступает на ПК, выводится на экран и автоматически заносится в пакет электронных таблиц MS Excel, где и производится в дальнейшем расчет электрического сопротивления ТА. Получаемые с прибора данные представлены в виде числа отсчетов АЦП N , которые пересчитываются в электрическое сопротивление $R_{ТА}$ (кОм) по формуле:

$$R_{ТА} = 0,0008 \cdot N^2 - 0,1036 \cdot N + 11,425. \quad (1)$$

Измерительные электроды имеют цилиндрическую форму, материал — полированная латунь. Активный элект-

трод исполнен в виде щупа с полостью для увлажняющего геля или тампона с физраствором (площадь контакта 27 мм²), пассивный электрод выполнен в виде цилиндра (площадь контакта более 40 см²). При измерении к исследуемой ТА прикладывается активный электрод, через который происходит воздействие заданным значением электрической мощности (40 мкВт), пассивный электрод находится в ладони руки с противоположной стороны тела обследуемого.

При съеме данных в каждой ТА регистрируется четыре значения через 0,5–1,0 с (значения, отличающиеся от среднего для серии на 10 % и более, отбрасываются как промахи), затем находится среднее значение. В случае сильного разброса значений (в основном вызываемого изменением положения активного электрода) измерение производится повторно.

Максимальное значение тока, воздействующего на биообъект для нашего ИГЗМ, не превышает 43 мкА (в методе Накатани в несколько раз больше), что позволяет вносить в каждую ТА одинаковое значение энергии и положительно сказывается на воспроизводимости получаемых данных.

Показания, полученные с помощью известных приборов [4–13], зависят от напряжения, приложенного к ТА; значения электрического тока, протекающего через нее; времени, в течение которого в организме рассеивается электрическая энергия. Причем электрическая мощность, которая рассеивается в тканях и влияет на значение электрического сопротивления биоткани, зависит от типа использованной измерительной цепи. Энергия рассеивается в форме теплоты или изменения термодинамического состояния клеток организма. Из-за невозможности разделить все процессы, присутствующие при оценке состояния ТА, предложено использовать измери-

тельные цепи, обеспечивающие неизменное значение мощности, которая рассеивается в объекте, подключенном к нему. Применение таких цепей позволяет повысить достоверность результатов при оценке состояния нелинейных тепловых объектов. Все параметры определяются в режиме, который воспроизводим и может быть метрологически аттестован.

При оценке состояния объекта в нем рассеивается неизменное значение электрической мощности P :

$$P = u \cdot i = const, \quad (2)$$

где u — падение напряжения на биологическом объекте;

i — электрический ток, протекающий через него.

О состоянии объекта можно судить или по падению на нем электрического напряжения u или по значению электрического тока i , протекающего через него. Теория и вопросы практического применения ИГЗМ рассмотрены более подробно в [3, 4, 14].

Результаты исследований

Электропунктурная диагностика по И. Накатани относится к методам функциональных исследований. Состояние органов и систем организма оценивается по результатам измерений протекающего в ТА тока.

Для диагностики исследуют репрезентативные ТА соответствующих меридианов (в классическом варианте режим измерений — постоянный ток 200 мкА в режиме короткого замыкания, напряжение 12 В, возможны различные вариации аппаратных решений, часть вариантов требуют сложного пересчета из-за несоответствия шкал). Измеренные значения тока в репрезентативной ТА (мкА) заносятся в специальную R-карту (рисунок 2). Для определения состояния меридианов используется расположение резуль-

татов измерения токов в ТА относительно коридора нормы R-карты.

Значения откладываются на соответствующей шкале. Затем находится среднеарифметическое значение всех 24 показателей, которое откладывается на двух крайних шкалах R-карты, соответствующих среднему значению (уровню) электропроводности. Значения на крайних шкалах соединяются горизонтальной линией, параллельно которой сверху и снизу на расстоянии 7 мм проводятся еще 2 горизонтальные линии. Таким образом, определяется так называемый коридор нормы, а горизонтальные линии являются соответственно верхней и нижней границами этого коридора. Необходимо подчеркнуть, что указанные значения коридора нормы (14 мм) действительны при масштабе, когда высота шкалы R-карты равна 105 мм.

Р-карта И. Накатани значительно облегчает ручную обработку получаемых данных. При использовании МК и цифровой обработке данных необходима возможность сравнения результатов с помощью разных программно-аппаратных комплексов. Поэтому очень важно перевести результаты измерения напряжения при воздействии значением заданной электрической мощности в формате числа отсчетов АЦП N в токи шкалы Накатани и их положение на R-карте в миллиметрах. Это позволит оценить попадание результата в коридор нормы или тип патологии. Для цифровизации R-карты используются формулы (3), (4) (Ким, 1998). Аппроксимирующая фор-

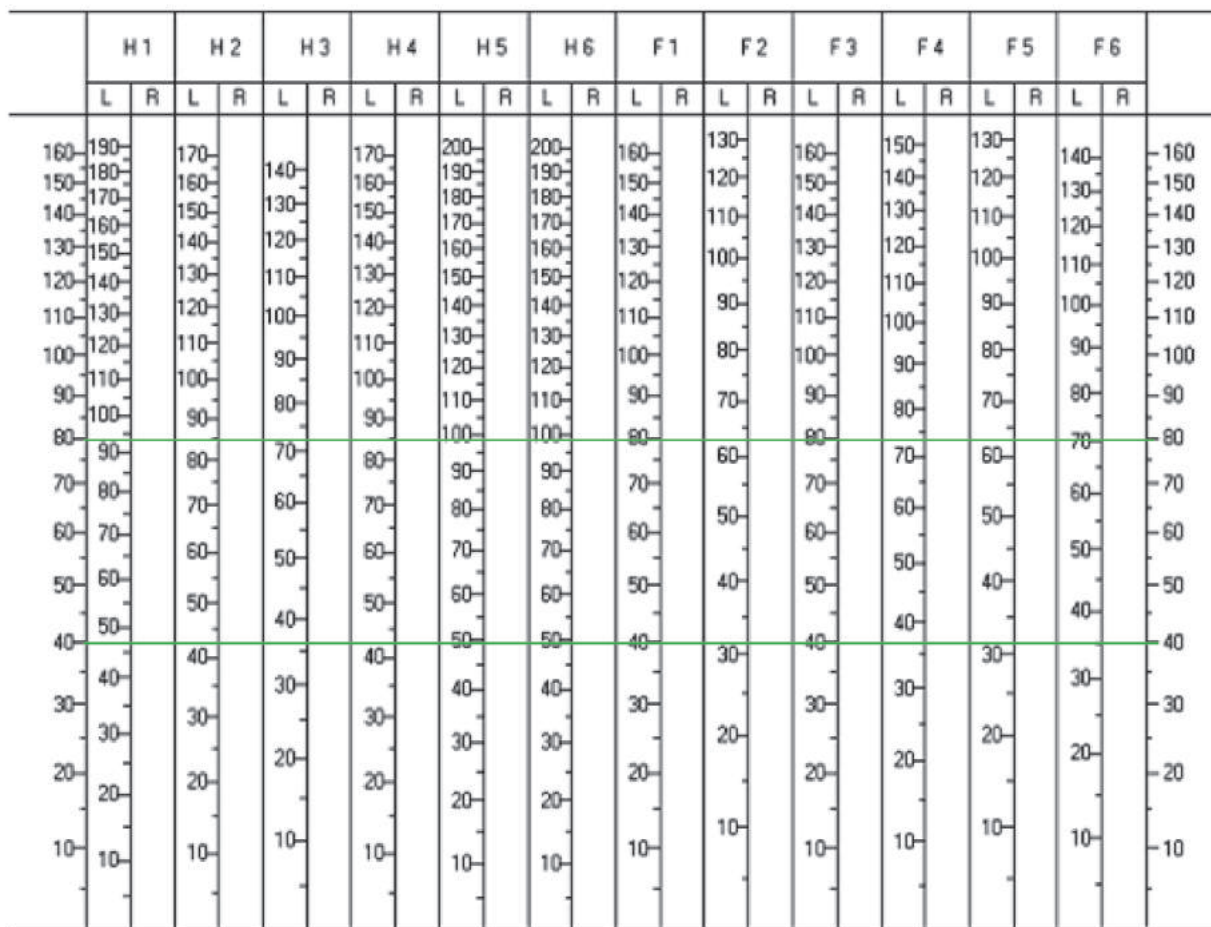


Рисунок 2. Вид R-карты по И. Накатани (горизонтальными линиями показан коридор нормальных значений 40–80 мкА)

Figure 2. R-maps according to I. Nakatani (horizontal lines show the corridor of normal values 40–80 μA)

мула для расчета положения точки результата измерения тока для всех меридианов имеет общий вид:

$$R_j = 0,866 \cdot H_{\max} \cdot \ln(1 + I_j / b_j), \quad (3)$$

где H_{\max} — значение общей высоты шкалы в мм;

I_j — измеренное значение тока для j меридиана (мкА);

b_j — коэффициент для j меридиана (таблица 2);

j изменяется от 1 до 12.

Для расчета ширины коридора нормы используется формула (в оригинальной версии R-карты И. Накатани $DR = 14$ мм для $H_{\max} = 105$ мм):

$$DR = 0,133 \cdot H_{\max}. \quad (4)$$

Пересчет значения сопротивления ТА R_{TA} (кОм) в ток, используемый в методике Накатани I_{TA} (мкА), можно осуществить по формуле [10]:

$$I_{TA} = 12600 / (R_{TA} + 63). \quad (5)$$

Вопросы конвертации получаемых результатов измерения электрического сопротивления с помощью ИГЗМ в нелинейные единицы эмпирической шкалы Накатани решаются с помощью компьютерной обработки данных, используя расчетные формулы (1) и приведенные в источниках [2, 15].

Так, формула для пересчета значения, измеренного по методу Накатани тока I_{TA} в абсолютные значения сопротивления R точки акупунктуры [15]:

$$R = \frac{12600}{I_{TA}} - 63 (\text{кОм}). \quad (6)$$

Согласно [2] нормальные значения для измеренного тока 40–80 мкА, исполь-

зуя формулу (1), получаем диапазон значений, не относящихся к патологии для измеренного сопротивления точки акупунктуры от 94,5 до 252 кОм.

Необходимо учесть, что шкала Накатани является эмпирической и нелинейной. Ширина коридора индивидуальной нормы обследуемого, которая рассчитывается как 13,3 % от высоты шкалы, которая обычно равна $H_{\max} = 105$ мм при пересчете в единицы сопротивления будет изменяться. Аппроксимирующая формула для расчета высоты средней точки R_s по шкале (мм) (Ким, 1998) имеет вид [15]:

$$R_s = 0,866 \cdot H_{\max} \cdot \ln(1 + I_{T_{\text{ср}}} / 76), \quad (7)$$

где H_{\max} — значение общей высоты шкалы, мм;

$I_{T_{\text{ср}}}$ — среднее арифметическое значение токов для 24 точек, мкА.

Воспользовавшись формулой (6) для граничных значений коридора сопротивлений ТА, не относящихся к патологии получим следующее.

Для среднего значения сопротивления 94,5 кОм коридор индивидуальной нормы обследуемого D от +28 % до -22 %.

Для среднего значения сопротивления 252 кОм коридор индивидуальной нормы обследуемого D от +34 % до -23 % (рисунок 3).

Как видно из результатов проведенных расчетов, коридор индивидуальной нормы имеет несимметричную форму относительно среднего значения сопротивления, которое рассчитывается по результатам измерений в 24 ТА. Ширина

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации меридианов для R-карты [12].

Table 2. Meridian approximation coefficients for the R-map [12].

Меридиан	H1 LU	H2 PC	H3 HT	H4 SI	H5 TE	H6 LI	F1 SP	F2 LR	F3 KI	F4 BL	F5 GB	F6 ST
b_j	81	69	81	94	94	76	60	76	70	60	67	89

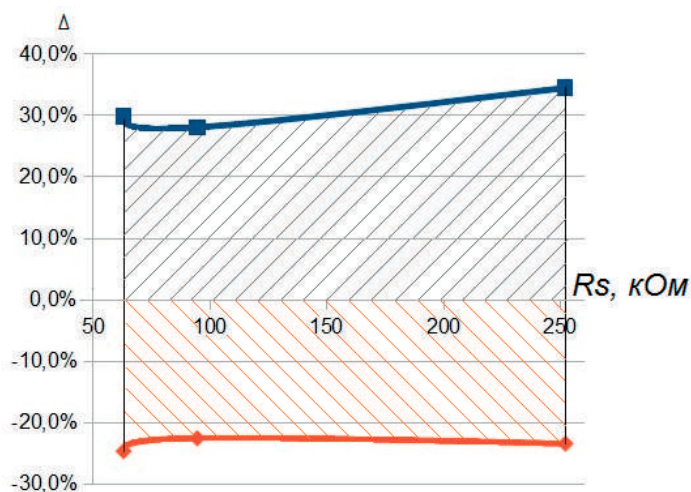


Рисунок 3. Ширина коридора индивидуальной нормы обследуемого D , в методе Накатани (в процентах от среднего значения по 24 ТА)

Figure 3. Width of the corridor of the individual norm of the subject D , in the Nakatani method (as a percentage of the average value for 24 acupuncture points)

коридора увеличивается с ростом сопротивления, впрочем, на практике регистрируемые значения электрического сопротивления ТА на постоянном токе с учетом увлажнения изотоническим раствором хлорида натрия, как правило, не превышают 250 кОм. Переход от R-карты Накатани к шкале со значениями электрического сопротивления $R_{ТА}$ нецелесообразен, т.к. при этом не увеличивается объем получаемой диагностической информации.

Список источников

1. Matos L.C., Machado J.P., Monteiro F.J., Greten H.J. Understanding Traditional Chinese Medicine Therapeutics: An Overview of the Basics and Clinical Applications // Healthcare (Basel). 2021. Mar 1. No. 9 (3). P. 257. doi: 10.3390/healthcare9030257.

2. Гаврилова Н.А., Коновалов С.В., Резаев К.А., Гаврилов А.П., Фадеев А.А., Дубова М.Н., Мейзеров Е.Е. Электропунктурная диагностика по методу И. Накатани: методические рекомендации № 2002/34. М., 2002.

3. Демин А.Ю., Тырнова Т.П., Гизатуллин Ф.А., Миловзоров Г.В., Пашали Д.Ю. Пилотное исследование динамики изменения электрического сопротивления точек акупунктуры с помощью измерительных генераторов заданной электрической мощности // Интеллектуальные

Выводы

Использование методики Накатани с новыми аппаратными решениями на основе ИГЗМ позволит повысить достоверность получаемых результатов измерения и диагностики в целом. Применение формул пересчета результатов, получаемых с помощью ИГЗМ, позволяет проводить сравнение с данными, полученными с помощью классического метода Накатани, и полностью использовать наработанный в данном методе практический опыт и статистические данные.

системы в производстве. 2021. Т. 19, № 4. С. 18–25. doi: 10.22213/2410-9304-2021-4-18-25.

4. Gusev V.G., Mirina T.V., Tyrnova T.P. e.a. Electrical Properties of Human Skin: New Data // Biophysics. 2014. No. 59. P. 153–156. doi: 10.1134/S0006350914010023

5. Bae J.-H., Ku B., Bae S.-E., Kim J. Circadian Variations in Electric Current Responses at Ryodoraku Points across the Waking Stage: A Prospective Observational Study // Medicine. March, 2019. No.98:e14688. doi: 10.1097/MD.00000000000014688.

6. Lee Y.C., Ng H.P., Chang Y.H., Ho W.C. The Development and Application Evaluation of Meridian Energy Detection System in Traditional Oriental Medicine: a Preliminary Study // Evid Based Complement Alternat Med. 2018, No. 9469703. doi: 10.1155/2018/9469703.

7. Kovich F. The Impedance Profile of Acupuncture Points // *Journal of Acupuncture Research*. 2018. No. 35 (3). P. 104–107. doi: 10.13045/jar.2018.00080.
8. Colbert A.P., Spaulding K., Larsen A., Ahn A.C., Cutro J.A. Electrodermal Activity at Acupoints: Literature Review and Recommendations for Reporting Clinical Trials // *J. Acupunct. Meridian Stud.* Mar 2011. No. 4 (1). P. 5–13. doi: 10.1016/S2005-2901(11)60002-2.
9. Korenevskiy N., Mukhataev Y., Startcev A., Lazurina L. A Multichannel Analyzer of Meridian Structures of the Human Body Based on AFE Interfaces // *Biomedical Engineering*. 2017. 50. doi: 10.1007/s10527-017-9664-0.
10. Ahn A.C., Colbert A.P., Anderson B.J., Martinsen Ø.G., Hammerschlag R., Cina S., Wayne P.M., Langevin H.M. Electrical Properties of Acupuncture Points and Meridians: A Systematic Review // *Bioelectromagnetics*. 2008. No. 29. P. 245–256. doi: 10.1002/bem.20403.
11. Корневский Н.А., Филист С.А., Шаталова О.В., Кассим К.Д.А., Руденко В.В. Диагностические системы на основе анализа вольтамперных характеристик биоактивных точек // *Биотехносфера*. 2013. № 5 (29). С. 33–38.
12. Суржикова С.Е., Мухатаев Ю.Б., Плещанос Л.В., Шаталова О.В. Исследование проводимости биоматериалов в биоактивных точках при циклических воздействиях токами различной полярности // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2016. № 9. С. 32–37.
13. Shatalova O., Filist S., Korenevskiy N., Al-Kasasbeh R.T., Shaqadan A., Protasova Z., Plyash M., Rybochkin A. Application of Fuzzy Neural Network Model and Current-Voltage Analysis of Biologically Active Points for Prediction Post-Surgery Risks // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. Oct. 2021. No. 24 (13). P. 1504-1516. doi: 10.1080/10255842.2021.1895128.
14. Гусев В.Г., Демин А.Ю. Оценка состояния нелинейных тепловых объектов (на примере биообъектов) // *Датчики и системы*. 2014. № 2. С. 8–12.
15. Жуков В.В., Курик М.В. Прикладная метрология в электропунктурных измерениях // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2004. № 8–9. С. 53–60.
- 2021, Mar 1, No. 9 (3), pp. 257. doi: 10.3390/healthcare9030257.
2. Gavrilova N.A., Konovalov S.V., Rezaev K.A., Gavrilov A.P., Fadeev A.A., Dubova M.N., Meizerov E.E. *Elektropunktornaya diagnostika po metodu I. Nakatani: metodicheskie rekomendatsii № 2002/34* [Electropuncture Diagnostics Using the Method of I. Nakatani: Methodological Recommendations No. 2002/34]. Moscow, 2002. [in Russian].
3. Demin A.Yu., Tyrnova T.P., Gizatullin F.A., Milovzorov G.V., Pashali D.Yu. Pilotnoe issledovanie dinamiki izmeneniya elektricheskogo soprotivleniya toчек akupunktury s pomoshch'yu izmeritel'nykh generatorov zadannoi elektricheskoi moshchnosti [Pilot Study of the Dynamics of Changes in the Electrical Resistance of Acupuncture Points Using Measuring Generators of a Given Electrical Power]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve — Intelligent Systems in Production*, 2021, Vol. 19, No. 4, pp. 18-25. doi: 10.22213/2410-9304-2021-4-18-25. [in Russian].
4. Gusev V.G., Mirina T.V., Tyrnova T.P. e.a. Electrical Properties of Human Skin: New Data. *Biophysics*, 2014, No. 59, pp. 153–156. doi: 10.1134/S0006350914010023.
5. Bae J.-H., Ku B., Bae S.-E., Kim J. Circadian Variations in Electric Current Responses at Ryodoraku Points across the Waking Stage: A Prospective Observational Study. *Medicine*, March, 2019, No. 98:e14688. doi: 10.1097/MD.00000000000014688.
6. Lee Y.C., Ng H.P., Chang Y.H., Ho W.C. The Development and Application Evaluation of Meridian Energy Detection System in Traditional Oriental Medicine: a Preliminary Study. *Evid Based Complement Alternat Med.*, 2018, No. 9469703. doi: 10.1155/2018/9469703.
7. Kovich F. The Impedance Profile of Acupuncture Points. *Journal of Acupuncture Research*, 2018, No. 35 (3), pp. 104–107. doi: 10.13045/jar.2018.00080.
8. Colbert A.P., Spaulding K., Larsen A., Ahn A.C., Cutro J.A. Electrodermal Activity at Acupoints: Literature Review and Recommendations for Reporting Clinical Trials. *J. Acupunct. Meridian Stud.*, Mar 2011, No. 4 (1), pp. 5–13. doi: 10.1016/S2005-2901(11)60002-2.
9. Korenevskiy N., Mukhataev Y., Startcev A., Lazurina L. A Multichannel Analyzer of Meridian Structures of the Human Body Based on AFE Interfaces. *Biomedical Engineering*, 2017, 50. doi: 10.1007/s10527-017-9664-0.
10. Ahn A.C., Colbert A.P., Anderson B.J., Martinsen Ø.G., Hammerschlag R., Cina S., Wayne P.M., Langevin H.M. Electrical Properties of Acupuncture Points and Meridians: A Systematic Review.

References

1. Matos L.C., Machado J.P., Monteiro F.J., Greten H.J. Understanding Traditional Chinese Medicine Therapeutics: An Overview of the Basics and Clinical Applications. *Healthcare (Basel)*,

Bioelectromagnetics, 2008, No. 29, pp. 245–256. doi: 10.1002/bem.20403.

11. Korenevskii N.A., Filist S.A., Shatalova O.V., Kassim K.D.A., Rudenko V.V. Diagnosticheskie sistemy na osnove analiza vol'tampnykh kharakteristik bioaktivnykh toчек [Diagnostic Systems Based on Analysis of Current-Voltage Characteristics of Bioactive Points]. *Biotekhnosfera — Biotechnosphere*, 2013, No. 5 (29), pp. 33–38. [in Russian].

12. Surzhikova S.E., Mukhataev Yu.B., Pleskanos L.V., Shatalova O.V. Issledovanie provodimosti biomaterialov v bioaktivnykh tochkakh pri tsiklicheskih vozdeistviyakh tokami razlichnoi polyarnosti [Study of the Conductivity of Biomaterials at Bioactive Points under Cyclic Exposure to Currents of Different Polarities]. *Biomeditsinskaya radioelektronika — Biomedical Radioelectronics*, 2016, No. 9, pp. 32–37. [in Russian].

13. Shatalova O., Filist S., Korenevskiy N., Al-Kasasbeh R.T., Shaqadan A., Protasova Z.,

Ilyash M., Rybochkin A. Application of Fuzzy Neural Network Model and Current-Voltage Analysis of Biologically Active Points for Prediction Post-Surgery Risks. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Oct. 2021, No. 24 (13), pp. 1504-1516. doi: 10.1080/10255842.2021.1895128.

14. Gusev V.G., Demin A.Yu. Otsenka sostoyaniya nelineinykh teplozavisimyykh ob'ektov (na primere bioob'ektov) [Assessment of the State of Nonlinear Heat-Dependent Objects (Using the Example of Biological Objects)]. *Datchiki i sistemy — Sensors and Systems*, 2014, No. 2, pp. 8–12. [in Russian].

15. Zhukov V.V., Kurik M.V. Prikladnaya metrologiya v elektropunkturykh izmereniyakh [Applied Metrology in Electropuncture Measurements]. *Biomeditsinskiye tekhnologii i radioelektronika — Biomedical Technologies and Radioelectronics*, 2004, No. 8–9, pp. 53–60. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 26.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023; принята к публикации 09.10.2023.

The article was submitted 26.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023; accepted for publication 09.10.2023.

Научная статья

УДК 621.313

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-49-63

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ МАЛОМОЩНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НЕФТЕПРОВОДАХ В УДАЛЕННЫХ РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА



Александр Витальевич Барвинов

Alexander V. Barvinov

аспирант кафедры электроэнергетики,
Омский государственный технический университет,
Омск, Россия



Рустам Нуриманович Хамитов

Rustam N. Khamitov

доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия;
профессор кафедры электрической техники,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия



Лидия Сергеевна Ганичева

Lidia S. Ganicheva

студент 4-го курса, ПИ-191,
Омский государственный технический университет,
Омск, Россия



Сергей Николаевич Жеребцов

Sergey N. Zherebtsov

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

Актуальность

Отключение электроснабжения в отдаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера может иметь серьезные последствия, включая техногенные катастрофы, экологические катастрофы, пожары, взрывы, загрязнение водных ресурсов, воздействие на здоровье людей и экономические потери. Для обеспечения электроснабжения в районах с суровым климатом рассматриваются различные автономные источники питания, включая гидрокинетическую турбину, установленную внутри трубопровода, которая преобразует кинетическую энергию потока в электроэнергию с помощью электрогенератора.

Ключевые слова

нефтепровод,
гидрокинетическая
турбина,
турбогенераторная
электростанция,
электроприемник,
автономное
энергоснабжение

Объект исследования

Объектом исследования является эффективное электроснабжение потребителей нефтегазопроводов в удаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера, гидравлическая электростанция малой мощности, установленная на обводной технологической линии нефтепровода.

Цель исследования

Целью исследования является оценка возможности применения гидрокинетической турбины внутри трубопровода для эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов в удаленных районах.

Методы исследования

В процессе исследования проводился анализ существующих электростанций малой мощности с точки зрения определения наиболее перспективных и эффективных подходов к выработке электроэнергии, а также было предложено теоретическое решение в форме гидрокинетической турбины для генерации электроэнергии.

Результаты и значимость исследования

Гидрокинетическая турбина, установленная внутри трубопровода, предлагается в качестве автономного источника питания для эффективного электроснабжения потребителей. Предлагается модель гибридной электростанции, объединяющей гидрокинетическую турбину с другими источниками энергии для обеспечения непрерывного электропитания в удаленных районах.

Полученные результаты имеют практическую значимость для энергетической обеспеченности нефтегазопроводов в удаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера. Предложен новый подход к электроснабжению, что в результате внедрения разработанного оборудования может обеспечить бесперебойную работу энергетического модуля технологического оборудования, установленного на нефтепроводах, и помочь в предотвращении техногенных катастроф и экономических потерь.

Для цитирования: Барвинов А. В., Хамитов Р. Н., Ганичева Л. С., Жеребцов С. Н. Электроснабжение маломощных потребителей, установленных на нефтепроводах в удаленных районах Крайнего Севера // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 49-63. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-49-63>.

Original article

POWER SUPPLY FOR LOW-POWER CONSUMERS INSTALLED ON OIL PIPELINES IN REMOTE AREAS OF THE FAR NORTH

Relevance

The power outage in remote and inaccessible areas of the Far North can have serious consequences, including technological and ecological disasters, fires, explosions, water pollution, impact on human health, and economic losses. To ensure power supply in harsh climate areas, various autonomous power sources are being considered, including a hydrokinetic turbine installed inside the pipeline, which converts the kinetic energy of the flow into electricity using an electromechanical generator.

Object of study

The research focuses on the efficient power supply of oil and gas pipeline consumers in remote and inaccessible areas of the Far North. A small-scale hydraulic power station is installed on the bypass line of the oil pipeline.

Keywords

oil pipeline, hydrokinetic turbine, turbo-generator power station, power receiver, autonomous power supply

Aim of research

The main aim of the study is to assess the feasibility of using a hydrokinetic turbine inside the pipeline for efficient power supply to linear consumers of oil and gas pipelines in remote areas.

Research methods

During the research, an analysis of the field of existing small-scale power plants was carried out to determine the most promising and efficient approaches to electricity generation. Additionally, a theoretical solution in the form of a hydrokinetic turbine for electricity generation was proposed.

Results

The results and significance of the research propose the hydrokinetic turbine installed inside the pipeline as an autonomous power source for efficient power supply to consumers. A hybrid power station model is suggested, combining the hydrokinetic turbine with other energy sources to ensure uninterrupted power supply in remote areas.

The obtained results have practical significance for the energy provision of oil and gas pipelines in remote and inaccessible areas of the Far North. A new approach to power supply is proposed, which, upon implementation of the developed equipment, can ensure uninterrupted operation of the energy module of the technological equipment installed on the pipelines and help prevent technological disasters and economic losses.

For citation: Barvinov A. V., Khamitov R. N., Ganicheva L. S., Zherebtsov S. N. *Elektrosnabzheniye malomoshchnykh potrebiteley, ustanovlennykh na nefteprovodakh v udalennykh rayonakh Kraynego Severa* [Power Supply for Low-Power Consumers Installed on Oil Pipelines in Remote Areas of the Far North]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 32, Vol. 19, pp. 49-63 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-49-63>.

Введение

Отключение электроснабжения потребителей трубопроводов в отдаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера и Сибири может иметь серьезные последствия, вплоть до возникновения техногенных катастроф, которые включают экологические катастрофы, пожары и взрывы, загрязнение водных ресурсов, воздействие на человеческое здоровье и экономические потери и т.д. Основываясь на сведениях о состоянии аварийности на нефтепроводах за 12 месяцев (по данным Природнадзора Югры с 01.01.2020 по 31.12.2020), подтверждается возможность возникновения серьезных техногенных проблем в результате аварийных ситуаций на нефтепроводах. Сведения в таблице 1 отражают релевантные данные, свидетельствующие о масштабах и характере данных проблем [1].

Узлы запорной арматуры, разработанные для осуществления контроля и управления над потоками транспортируемых продуктов, обслуживания, ремонта и минимизации негативного воздействия на окружающую среду, включают:

1. задвижки: позволяют открыть и закрыть поток жидкости в трубопроводах для контроля и управления;
2. вентили: используются для регулирования и контроля потока жидкости, включая регулирование скорости и направления потока;
3. клапаны: предотвращают обратный поток жидкости и защищают систему от нежелательного протекания;
4. затворы: применяются для полного перекрытия потока жидкости, особенно в случаях аварий или планового обслуживания;

5. шаровые краны: обеспечивают перекрытие потока за счет запирающего элемента в форме шара, но не предназначены для регулирования потока.

Электроприводная запорная арматура с дистанционным управлением работает на напряжении 220, 380 В.

Самая распространенная причина разливов нефтепродуктов — внутренняя коррозия трубопровода (например, за 2020 год из 888 аварий более 500 произошли именно по этой причине). Также среди причин аварий, это — внешняя коррозия металла, вызванная погодными условиями региона и строительным браком.

Автономные источники питания для обеспечения надежности электроснабжения в линейных нефтепроводах: анализ и сравнительная оценка

Электропотребители нефтегазопроводов относятся к третьей категории надежности электроснабжения в соответствии с техническим регламентом Газпрома 2-6.2-1028-2015 «Категорий-

ность электроприемников промышленных объектов ПАО «Газпром»» [2]. Питание электроприемников нефтепровода осуществляется на напряжении 0,4 кВ, распределение электроэнергии выполняется от трансформаторных подстанций, которые подключаются к линиям электропередачи на напряжение 6(10), 35кВ. Расположение трансформаторных подстанций вдоль нефтегазопроводов обусловлено необходимостью обеспечения электроэнергией разнообразных систем и устройств, функционирующих на трубопроводах.

Электропотребитель нефтепровода представляет собой техническое оборудование [2], установленное вдоль магистральных трубопроводов, которое обеспечивает контроль, мониторинг и управление потоками жидкости в процессе перекачки нефтепродуктов по трубопроводу [3]. Электрические подстанции обеспечивают электропитанием насосные станции, компрессорные установки, клапаны, измерительные и регулирующие механизмы, системы контроля и управления, а также осветитель-

Таблица 1. Сведения о состоянии аварийности на нефтепроводах за 12 месяцев 2020 г. (по данным Природнадзора Югры с 01.01.2020 по 31.12.2020)

Table 1. Information about the accident rate on oil pipelines for the 12 months of 2020 (according to the data from the Department of Environmental Supervision of Yugra from January 1, 2020 to December 31, 2020)

Районы, в которых произошли аварии (ХМАО)	Количество аварий	Масса загрязняющих веществ (нефть), т		Площадь загрязнения, га
		В момент аварии	После ликвидации аварии	
Ханты-Мансийский район	40	14,3840	0,0000	6,4420
Нижневартовский район	503	116,6010	8,2530	36,2360
Сургутский район	34	5,0410	0,0000	2,3010
Советский район	4	0,1000	0,0000	0,0820
Октябрьский район	40	5,2180	0,0000	3,5570
Березовский район	0	0,0000	0,0000	0,0000
Нефтеюганский район	267	163,8680	0,0000	30,5200
ВСЕГО	888	305,2120	8,2530	79,1380

ные средства и иные электропотребители, размещенные вдоль линии трубопроводов [4, 5]. В удаленных и труднодоступных районах, где отсутствуют сетевые, стационарные источники электропитания, при соответствующем технико-экономическом обосновании

применяются различные автономные источники питания (таблица 2) вместо передачи электроэнергии от сетевой инфраструктуры электроснабжения. Эти потребители включают насосные и компрессорные станции, мониторинговые системы, клапаны и регуля-

Таблица 2. Сводная таблица, содержащая преимущества и недостатки автономных источников питания

Table 2. A summary table containing the advantages and disadvantages of autonomous power sources

Автономный источник питания	Преимущества	Недостатки
Дизель-генераторные установки (ДГУ)	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая надежность и стабильность питания • Гибкость в управлении мощностью (ток, напряжение) • Широкое распространение и доступность 	<ul style="list-style-type: none"> • Выбросы вредных веществ и шумовые эмиссии • Зависимость от поставок и хранения дизельного топлива
Ветро-солнечные электростанции	<ul style="list-style-type: none"> • Экологически чистый источник энергии • Возобновляемые ресурсы • Независимость от внешних поставок энергии 	<ul style="list-style-type: none"> • Зависимость от погодных условий и сезонности • Непостоянность генерации энергии
Малые газовые электростанции	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая энергетическая эффективность • Независимость от поставок дизельного топлива и электрической сети 	<ul style="list-style-type: none"> • Выбросы углекислого газа при сжигании газа • Требование постоянного источника газа
Автономные источники питания на базе двигателя Стирлинга	<ul style="list-style-type: none"> • Экологически чистый источник энергии • Работа на различных источниках тепла 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая энергетическая эффективность • Ограниченная доступность топлива
Термоэлектрические генераторы (ТЭГ)	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая надежность и долгий срок службы • Не требуют движущих частей и механического обслуживания 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая энергетическая эффективность • Ограниченная мощность
Турбодетандерные генерирующие агрегаты	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая энергетическая эффективность • Компактность 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокие инвестиционные затраты • Требуется специализированное обслуживание и эксплуатация
Каталитические термоэлектрические энергоустановки, топливные элементы	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая энергетическая эффективность • Не требуют движущих частей и механического обслуживания 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая стоимость топливных элементов и их ограниченный срок службы • Зависимость от наличия каталитического материала и требование высокой чистоты топлива

торы, а также системы безопасности и контроля пожара [5].

В выборе автономного источника питания [2] учитываются уникальные требования каждого конкретного случая, расположение и климатические условия региона. Решение опирается на анализ погодных данных региона, доступности ресурсов, стоимости, экологических факторов и других соответствующих параметров, связанных с конкретным применением. Окончательное решение принимается на основе анализа всех факторов и выбора оптимального источника питания, обеспечивающего энергетическую независимость и эффективность работы системы управления трубопроводов.

Применение гидрокинетической турбины для эффективного электроснабжения потребителей нефтепроводов в удаленных районах

На основе предоставленной и рассмотренной информации установлено, что проблемой является обеспечение эффективного электроснабжения потребителей нефтепроводов в удаленных и труднодоступных районах, где отсутствуют сетевые источники электропитания [6].

Для решения этой проблемы предлагается рассмотреть использование гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода. Однако важно отметить, что при использовании турбины, установленной внутри трубопровода, могут возникать дополнительные потери скорости и давления в самом трубопроводе. Тем не менее преимущества такого подхода заключаются в экономии ресурсов по сравнению с передачей электроэнергии по линиям электропередачи (ВЛ) на начальном этапе эксплуатации месторождения.

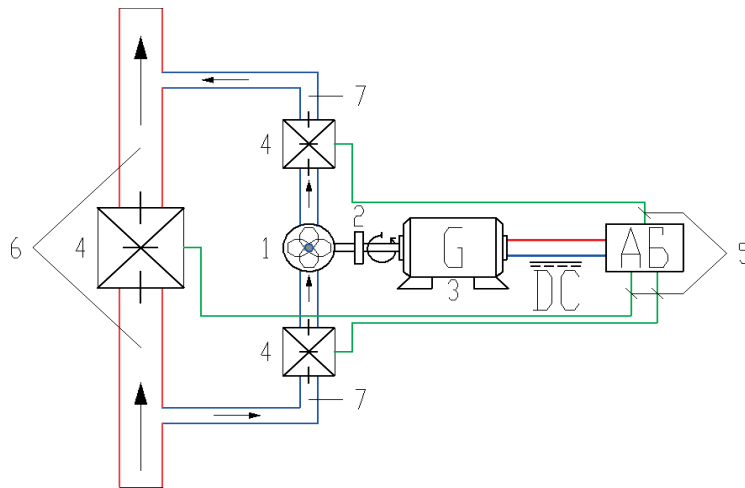
Для оценки эффективности и надежности гидрокинетической турбины,

установленной внутри трубопровода, в контексте обеспечения эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов требуется провести анализ технических характеристик данной турбины, оптимизировать ее конструкцию и процесс преобразования энергии, разработать систему управления и контроля, а также оценить экономическую эффективность данного решения. Такое исследование позволит получить более глубокое понимание возможностей эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов с использованием гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода. Это имеет важное практическое значение для энергетической обеспеченности технологического оборудования в районах Крайнего Севера и Сибири.

Проведено исследование возможности применения гидрокинетической турбины в качестве автономного источника питания (АИП) для обеспечения энергетических потребностей технологического оборудования в удаленных и труднодоступных районах. Гидрокинетическая турбина является устройством, использующим принцип гидрокинетического преобразования энергии [3], при котором кинетическая энергия потока жидкости преобразуется в механическую энергию вращающегося ротора. Впоследствии с использованием установленного генератора на валу гидротурбины осуществляется преобразование механической энергии в электрическую энергию (рисунок 1).

На рисунке 1 изображена структурная схема гидрокинетической электростанции, размещенной на нефтепроводе, состоящей из следующих компонентов.

1. Турбина является устройством, осуществляющим преобразование кинетической энергии потока нефти в механическую энергию вращения. Она состоит из ротора с лопастями, которые



1 — турбина; 2 — редуктор; 3 — генератор; 4 — узловая запорная арматура;
5 — кабельная линия; 6 — магистральный трубопровод; 7 — байпас

1 — turbine; 2 — gearbox; 3 — generator; 4 — main shut-off valves; 5 — cable line;
6 — ain pipeline; 7 — bypass

Рисунок 1. Структурная схема гидрокинетической электростанции, размещённой на нефтепроводе

Figure 1. The structural diagram of a hydrokinetic power station located on an oil pipeline

подвергаются действию потока нефти, передавая механическую энергию валу генератора.

2. Редуктор выполняет функцию механической трансформации энергии, получаемой от вращения турбины, на другой уровень вращения. Он способен изменять скорость вращения и преобразовывать момент силы.

3. Генератор преобразует механическую энергию, полученную от гидрокинетической турбины, в электрическую энергию. Он состоит из статора (неподвижная часть) и ротора (вращающаяся часть), где вращение ротора индуцирует электрический ток в обмотках статора.

4. Узловая запорная арматура представляет собой систему клапанов и задвижек, обеспечивающих регулирование потока нефти в гидрокинетической электростанции. Она используется для контроля объема и скорости потока, а также для отключения или переключения между различными частями системы.

5. Кабельная линия представляет собой проводную сеть, предназначен-

ную для передачи сгенерированной электрической энергии от генератора к другим устройствам или электросетям. Она состоит из проводов, изолирующих материалов и защитных оболочек.

6. Магистральный трубопровод представляет собой длинную систему труб, предназначенную для транспортировки нефти на большие расстояния. В данном контексте магистральный трубопровод служит источником потока нефти для гидрокинетической электростанции.

7. Байпас является дополнительным путем или каналом, который позволяет обойти или обходить основную систему. В данном случае байпас может использоваться для перенаправления потока нефти, если требуется обслуживание или отключение гидрокинетической электростанции, позволяя нефти свободно протекать по магистральному трубопроводу без препятствий.

В результате проведенных исследований была разработана модель гибридной электростанции, объединяющей гидрокинетическую турбину с другими источ-

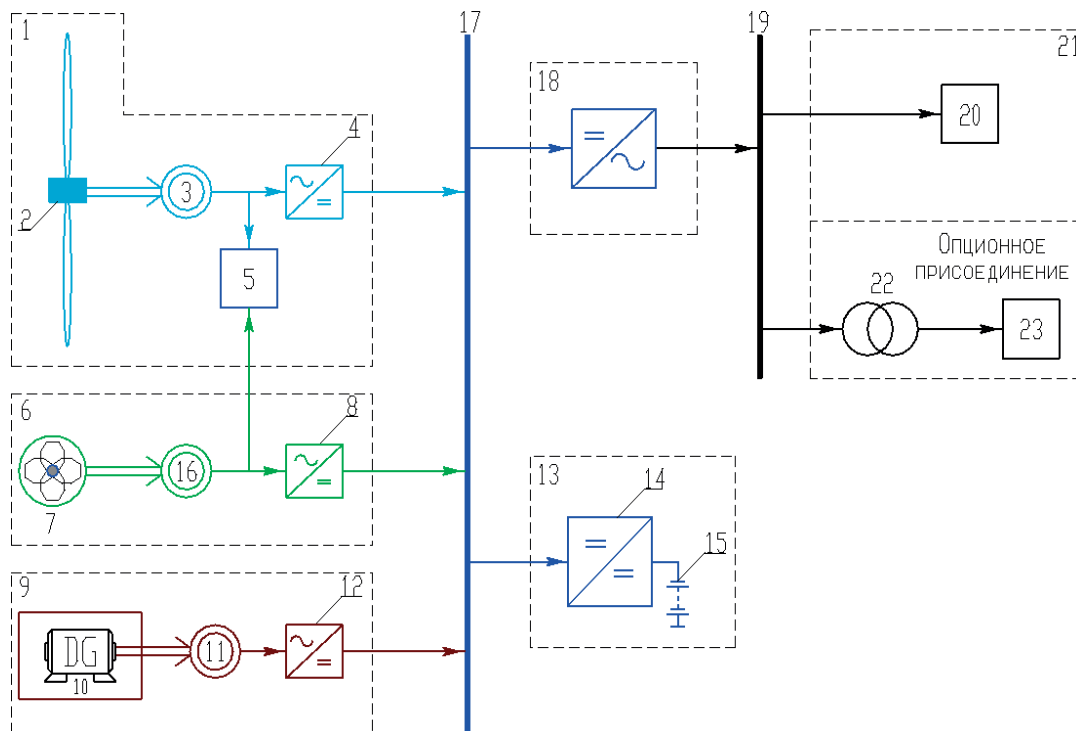
никами энергии, ветроэнергетической установкой и дизельным двигателем. Такое сочетание различных источников энергии обеспечивает повышенную надежность и непрерывность электропитания в удаленных районах, где отсутствуют сетевые источники питания (рисунок 2).

На рисунке 2 изображена структурная схема гибридной электростанции, состоящей из следующих компонентов.

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ): представляет собой систему с ветротурбиной (2), которая преобразует кинетическую энергию ветра в механическую энергию вращения.

Синхронные электромашиные генераторы (3, 11, 16) преобразуют механическую энергию, полученную от турбин, в электрическую энергию.

Выпрямители (4, 8, 12) осуществляют преобразование переменного тока, полу-



- 1 — ветроэнергетическая установка; 2 — ветротурбина; 3, 11, 16 — асинхронный электромашиный генератор; 4, 8, 12 — управляемый выпрямитель; 5 — блок балластных нагрузок; 6 — гидрокинетическая энергоустановка; 7 — турбина; 9 — блок ДЭС; 10 — дизельный двигатель; 13 — буферный накопитель энергии; 14 — двунаправленный импульсный преобразователь; 15 — блок аккумуляторных батарей; 17 — шина постоянного тока; 18 — инвертор напряжения; 19 — шина переменного тока 220/380В, 50 Гц; 20 — потребители электроэнергии; 21 — объект децентрализованного потребителя; 22 — силовой повышающий трансформатор; 23 — потребители электроэнергии высокого напряжения

- 1 — wind energy installation; 2 — wind turbine; 3, 11, 16 — asynchronous electric machine generator; 4, 8, 12 — controlled rectifier; 5 — ballast load block; 6 — hydrokinetic energy installation; 7 — turbine; 9 — power plant block; 10 — diesel engine; 13 — energy buffer storage; 14 — bidirectional pulse converter; 15 — battery block; 17 — direct current bus; 18 — voltage inverter; 19 — 220/380V, 50Hz alternating current bus; 20 — electrical energy consumers; 21 — decentralized consumer object; 22 — power boosting transformer; 23 — high voltage electrical energy consumers

Рисунок 2. Структурная схема гибридной электростанции, размещённой на нефтепроводе

Figure 2. Structural diagram of a hybrid power station located on an oil pipeline

ченного от генераторов, в постоянный ток. Вставка из шины постоянного освобождает генерирующие устройства от влияния друг на друга, тем самым исключив возникновение возмущений в работе.

Блок балластных нагрузок представляет собой устройство, используемое для стабилизации работы системы и поддержания равновесия мощности.

Гидрокинетическая энергоустановка состоит из турбины (7), которая использует поток жидкости в нефтепроводе для преобразования кинетической энергии в электрическую энергию.

Блок дизельной электростанции (ДЭС) включает в себя дизельный двигатель (10), который служит для генерации электрической энергии в случае отсутствия достаточного поступления энергии от других источников.

Буферный накопитель энергии представляет собой устройство, используемое для временного хранения избыточной электрической энергии, полученной от генераторов или других источников, чтобы обеспечить постоянную поставку энергии при изменяющейся потребности.

Двухнаправленный импульсный преобразователь служит для преобразования электрической энергии между постоянным и переменным током.

Блок аккумуляторных батарей представляет собой систему аккумуляторов, используемых для хранения электрической энергии и обеспечения резервного источника питания.

Шина постоянного тока используется для передачи постоянного тока между компонентами системы.

Инвертор напряжения осуществляет преобразование постоянного тока в переменный ток с требуемыми характеристиками напряжения и частоты.

Изолированная шина переменного тока 220 В, 50 Гц представляет собой систему передачи переменного тока низ-

кого напряжения к потребителям электроэнергии.

Потребители электроэнергии являются конечными получателями электрической энергии и используют ее для своих нужд.

Объект децентрализованного потребителя представляет собой отдельный потребитель, который получает электрическую энергию от гибридной электростанции.

Силовой повышающий трансформатор используется для повышения напряжения электроэнергии перед передачей ее к высоковольтным потребителям.

Потребители электроэнергии высокого напряжения представляют собой потребителей, которые требуют электрическую энергию с высоким напряжением для своего функционирования.

В целом, использование гидрокинетической турбины в гибридной электростанции представляет собой перспективное решение для обеспечения энергетических потребностей в удаленных и труднодоступных районах Крайнего Севера и Сибири, где доступ к сетевым источникам электроэнергии ограничен, отсутствует или требует больших капитальных затрат. Дальнейшие исследования и развитие этой технологии могут привести к еще более эффективному использованию малых источников энергии и повышению надёжности потребителей в регионах с ограниченной инфраструктурой.

Применение асинхронного генератора с мультипликатором в системе генерации электроэнергии для потребления в пункте мониторинга и контроля магистрального трубопровода

Для оценки потребления электроэнергии в пункте мониторинга, контроля, безопасности и аварийного управления технологическим оборудованием маги-

стрального трубопровода, который позволяет контролировать основные параметры состояния потребителей, а также формировать и передавать сигналы состояния и телеуправления, представлен на рисунке 3. Предположим следующие средние значения мощности для каждого компонента.

1. Электронный манометр (ДМ5002М), для нефтяной среды, с пределами измерений 16 МПа. Климатическое исполнение У2 (от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$), класс точности — 1, степень защиты IP54. Напряжение питания — 24; 35 В постоянного тока, потребляемая мощность приборов не более 4,2 Вт, согласно технической документации производителя [7].

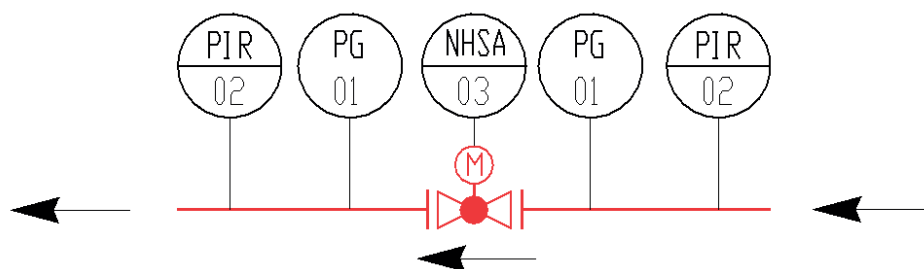
2. Датчик избыточного давления (МЕТРАН-150TG), для нефтяной среды, с выходным сигналом 4-20 мА/HART, вид взрывозащиты — Exd. Климатическое исполнение (от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$), степень защиты IP54. Напряжение питания — 12–42 В постоянного тока, потребляемая мощность приборов не более 0,9 Вт, согласно технической документации производителя [8].

3. Арматурный блок содержит в себе узловую запорную арматуру DN 250 мм,

PN 6,3 МПа, тип привода — электрический с ручным дублером, время закрытия/открытия, от 60 до 100 с, мощность электропривода, не более 3 кВт (во время срабатывания задвижки электроснабжение обеспечивается АКБ) [9], напряжение питания — 220 В переменного тока, управляющий сигнал снабжается от напряжение питания — 24 В постоянного тока. Система связи передачи по ВОЛС. Коммутатор Layer3 с постоянным энергопотреблением 40 Вт.

4. Секция нагревательная взрывозащищенная РИЗУР [10] предназначена для электрообогрева системы связи и технологического оборудования в виде узла запорной арматуры, снабжается от сети переменного напряжения 220 В, с частотой 50 Гц, потребляемая мощность 50 Вт. Сопротивление изоляции, 20 МОм, температура окружающей среды при эксплуатации (от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Применяется для обогрева узла запорной арматуры, совмещенного бокса системы связи и АКБ.

Пункт мониторинга и системы контроля имеет постоянных потребителей в виде датчиков, системы связи и переменного потребителя в виде узла запорной



Направление движения потока жидкости

PIR — датчик избыточного давления; PG — манометр; NHSA — электропривод запорной арматуры

PIR — excess pressure sensor; PG — pressure gauge; NHSA — electric actuator of shut-off valves

Рисунок 3. Схема пункта мониторинга, контроля, безопасности и аварийного управления технологическим оборудованием магистрального трубопровода

Figure 3. Scheme of monitoring, control, safety and emergency management of technological equipment of a main pipeline

арматуры. Приборы (манометры, датчики избыточного давления), устанавливаемые открыто на наружных технологических площадках, приспособлены к эксплуатации в условиях низких температур окружающего воздуха (климатическое исполнение –55 °С до 70 °С) и не требуют дополнительного обогрева.

Определим постоянные нагрузки узла запорной арматуры:

$$P_{уст.д.} = \sum P_i \cdot n_i \text{ [Вт]}, \quad (1)$$

где P_i — мощность датчиков;

n_i — количество датчиков;

$P_{уст.д.}$ — суммарная мощность датчиков.

$$P_{об.} = \sum P_{i.об.} \cdot n_i \text{ [Вт]}, \quad (2)$$

где $P_{i.об.}$ — мощность обогрева компонентов;

n_i — количество термочехлов.

$$P_{уст.} = P_{уст.д.} + P_{об.} + P_{св.} \text{ [Вт]}, \quad (3)$$

где $P_{уст.}$ — мощность постоянных нагрузок;

$P_{св.}$ — мощность устройства связи.

Таким образом, среднее потребление электроэнергии для пункта мониторинга и системы контроля и безопасности магистрального трубопровода в зависимости от потребляемых электрических нагрузок потребителей (таблица 3) составляет 150,2 Вт.

Для гарантированного электропитания оборудования предусматривается

система бесперебойного электропитания в составе источника бесперебойного питания ИБП (с запасом 10 %) Rectifierter 5U 4000 ВА, который обеспечивает электроснабжение по постоянному току напряжением 24 В и по переменному току напряжением 220 В, аккумуляторные батареи емкостью 195 А·ч. Такой резерв обеспечивает непрерывную работу оборудования на период прерывания генерации электроэнергии в течение: 24 ч для датчиков, теплоизоляционной оболочки с греющим элементом (термочехол) и устройств связи; цикла открытия/закрытия запорной арматуры в течение 300 с (с учетом резерва) [4]:

$$P_{АКБ} = P_{зад.} + P_{уст.} = \\ = 3000 + 150,2 = 3150,2 \text{ [Вт]}, \quad (4)$$

где $P_{АКБ}$ — мощность АКБ;

$P_{зад.}$ — мощность электродвигателя задвижки 3000 [Вт].

$$C_{ИБП} = \frac{(P_{уст.} \cdot t_{рас.п.})}{U_{ибп}} + \frac{(P_{зад.} \cdot t_{рас.в.})}{U_{ибп}} = \\ = 150,2 + 12,5 = 162,7 \text{ [В·А]}, \quad (5)$$

где $C_{ИБП}$ — суммарная мощность ИБП;

$t_{рас.п.}$ — расчетное время резерва для постоянной нагрузки [ч];

$t_{рас.в.}$ — расчетное время резерва для временной нагрузки [ч];

$P_{зад.}$ — мощность задвижки узла запорной арматуры [Вт];

$U_{ИБП}$ — напряжение ИБП [В].

Таблица 3. Расчет электрических нагрузок потребителей

Table 3. Calculation of electrical loads of consumers

Наименование ЭП	Количество ЭП	Номинальная (установленная) мощность, Вт	
		одного ЭП	общая
Узел запорной арматуры (постоянный потребитель)			
Электронный манометр	2	4,2	8,4
Датчик избыточного давления	2	0,9	1,8
Секция нагревательная	2	50	100
Система связи	1	40	40
Итого по постоянным потребителям электроэнергии	7	—	150,2

Для определения минимальной мощности турбины ($P_{тур}$), принимаем диапазон КПД (η) турбины 55–65 % [11]:

$$P_{тур} = \frac{P_{уст.}}{\eta} = \frac{150,2}{0,60} = 250,3 \text{ [Вт]}. \quad (6)$$

Таким образом, для того чтобы гидрокинетическая турбина покрывала электрическую нагрузку потребителя мощностью 150,2 Вт, минимальная мощность турбины составляет 250,3 Вт.

Для обеспечения электрической нагрузки потребителя мощностью 3150,2 Вт возникает необходимость разработки эффективной системы, способной генерировать достаточную электрическую мощность [6, 11, 13, 14], применим в данном случае асинхронный генератор, так как он обладает рядом следующих преимуществ.

1. Асинхронные генераторы способны вырабатывать электроэнергию с переменной скоростью вращения. Гидрокинетическая турбина, которая является источником энергии в системе, имеет переменную скорость вращения в зависимости от скорости потока транспортируемой жидкости при постоянном давлении внутри трубопровода [12]. Асинхронный генератор позволяет эффективно преобразовывать кинетическую энергию вращающегося ротора турбины в электрическую энергию несмотря на переменную скорость вращения. Асинхронные генераторы обеспечивают свою способность работать с переменной скоростью вращения за счет особенностей их конструкции и принципа работы [13]. Генераторы данного типа используют асинхронный режим работы, в котором скорость вращения ротора не является жестко связанной с частотой питающей сети. Вместо этого, асинхронный генератор автоматически регулирует свою скорость вращения в зависимости от нагрузки и условий работы, подстраиваясь под переменные

параметры. Это обеспечивает стабильную и непрерывную генерацию электроэнергии даже при изменяющихся условиях работы систем [14].

2. Асинхронные генераторы надежны и просты конструкционно, не имеют коммутаторов или щеток, которые требуют постоянного обслуживания и могут быть источником неисправностей. Это позволяет снизить затраты на обслуживание и повысить надежность работы системы в целом.

3. Таким образом, для данной системы подходит асинхронный генератор со следующими характеристиками: RID RS 4540 PAE номинальная мощность: 3,2 кВт, трехфазный, номинальное напряжение 230/380В, с номинальной частотой 50 Гц, частота вращения двигателя составляет 3000 об/мин, степень защиты IP54, вид исполнения — в контейнере, с воздушной системой охлаждения.

Мультипликатор представляет собой механизм коробки передач, который увеличивает скорость вращения гидрокинетической турбины и передает эту механическую энергию вращения вала турбины на генератор, обеспечивая необходимую скорость вращения для эффективной генерации электроэнергии, процесс преобразования медленного и сравнительно низкого вращения турбины в более быстрое и высокое вращение вала генератора, что обеспечивает оптимальную эффективность и максимальную генерацию электроэнергии.

Муфта пальчиковая или ременная передача, со шкивами, установленная на выходном валу гидротурбины и входном валу мультипликатора, используется для передачи вращательного движения от гидрокинетической турбины к мультипликатору. Ее функционирование основано на использовании ремней, которые соединяют два вращающихся вала и

передают мощность от одного вала к другому.

Целью применения ременной передачи в системе генерации электроэнергии является эффективная передача крутящего момента. Ремень выполняет функцию передачи вращения, крутящего момента от приводного вала турбины к принимающему валу мультипликатора, обеспечивая непрерывную передачу мощности. Однако помимо этой основной функции ремень также выступает в роли демпфера, снижая воздействие перепадов нагрузки на систему. Ременная передача способна поглощать и смягчать неожиданные изменения в процессе работы нагрузки, рывки, но при этом обладая свойствами амортизации, тем самым предотвращая возможные повреждения механической конструкции всего изделия и компонентов системы. Такое поведение ремня позволяет обеспечить более стабильную и надежную работу системы генерации электроэнергии.

Таким образом, применение асинхронного генератора вместе с мультипликатором и ременной передачей обеспечивает эффективную систему генерации электроэнергии. Асинхронный генератор позволяет работать с переменной скоростью вращения, обеспечивая стабильную генерацию энергии, а мультипликатор и ременная передача позволяют достичь необходимой мощности и эффективно передавать вращающий момент от источника энергии к генератору [6, 11, 12].

Выводы

1. Для решения проблемы обеспечения надежного и эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопро-

водов в удаленных и труднодоступных районах, где отсутствуют сетевые источники электропитания, предложено использование гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода. Этот подход позволяет экономить материальные и экономические ресурсы по сравнению с передачей электроэнергии по линиям электропередачи и имеет важное практическое значение для обеспечения энергетической независимости и надежности в удаленных районах Крайнего Севера и Сибири.

2. Выполненные исследования оценки эффективности и надежности гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода, в контексте обеспечения эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов, позволили выполнить анализ определения минимальной мощности гидравлической турбины, рассмотреть принципиальную схему конструкции и процесс преобразования механической энергии потока нефтепровода в электрическую энергию.

3. Проведение исследования позволило получить более глубокое понимание возможностей эффективного электроснабжения потребителей нефтегазопроводов с использованием гидрокинетической турбины, установленной внутри трубопровода.

4. Рассмотрена модель гибридной электростанции, объединяющей гидрокинетическую турбину с другими источниками энергии, такими как ветроэнергетическая установка и двигатель внутреннего сгорания, для обеспечения повышенной надежности и непрерывности электропитания в удаленных районах без сетевых источников питания.

Список источников

1. Сведения о состоянии аварийности на нефтепроводах за 12 месяцев 2020 года // Служба по контролю и надзору в сфере охраны

окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа — Югры: официальный сайт.

URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/> (дата обращения: 18.06.2023).

2. РД 2-6.2-1028-2015 «Категорийность электроприемников промышленных объектов ОАО «Газпром» / утв. Распоряжением ПАО «Газпром» № 366: введ. в действие с 01 февраля 2016 г. М.: ООО «Газпром экспо», 2015. 69 с. URL: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-9.2-003-2009-zashchita-ot-korrozii.-proektirovanie-e.pdf> (дата обращения: 18.06.2023).

3. Барвинов А.В. Автономное энергоснабжение линейной части нефтегазодобывающих предприятий // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: матер. Национальн. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, учёных и специалистов, посвященной 65-летию Тюменского индустриального университета, Тюмень, 27-29 октября 2021 года / Отв. редактор А.Н. Халин. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2021. С. 352–355. EDN: NGWKED.

4. Р 060-2017. Типовые проектные решения по оборудованию ПЦО системой бесперебойного электропитания: методические рекомендации. М.: ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии, 2016. 54 с.

5. Зольников А.Е., Гладков И.Н., Леонов Е.Н. Перспективы развития распределенной генерации в нефтегазовой отрасли // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: сб. матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Альметьевск, 26 ноября 2021 года. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2021. С. 373–376. EDN: RFVDYW.

6. Akhtulov A.L., Ivanova L.A., Leonov E.N. The Technique of Optimal Choice of Energy Sources in the Electrical Systems with Distributed Generation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, April 04-06, 2019. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. P. 62075. doi: 10.1088/1757-899X/537/6/062075.

7. Томский манометровый завод: официальный сайт. URL: <https://www.manotom.com/catalog/elektronnye/manometry-tsifrovye/el/pretsizionnyu-tsifrovoy-manometr-dm5002m/> (дата обращения: 18.06.2023).

8. Метран: официальный сайт. URL: <https://metran.ru/catalog/pressure/metran-150/> (дата обращения: 18.06.2023).

9. Армстрой: официальный сайт. URL: https://armstroy-nn.ru/useful_info/article/truboprovodnaya-armatura-dlya-nefteproduktov-

[osobennosti-trebovaniya/](https://armstroy-nn.ru/useful_info/article/truboprovodnaya-armatura-dlya-nefteproduktov-osobennosti-trebovaniya/) (дата обращения: 18.06.2023).

10. ORLESK.RU: официальный сайт. URL: <https://www.oreks.ru/funkcionalnye-bloki/rizur-mo-termochehol-s-obogrevom-dlya-datchikov-davleniya/> (дата обращения: 18.06.2023).

11. Федянин В.В. Влияние преобразователя частоты на коэффициент полезного действия асинхронного двигателя // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 08 (62). С. 83–87. doi: 10.23670/IRJ.2017.62.089.

12. Нурахмет Е.Е., Гафаров А.А., Бенке М.С., Ковалев Г.А., Макаренко В.А. Выбор электрогенераторов для ветроэнергетических установок // Молодой ученый. 2016. № 28.2 (132.2). С. 68–79. URL: <https://moluch.ru/archive/132/36983/> (дата обращения: 18.06.2023). EDN: XEOOYZ.

13. Gulliver S., Roger E.A. Hydropower Engineering Handbook. USA, McGraw-Hill Inc., 1991. 667 p. URL: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/195476> (дата обращения: 18.06.2023).

14. Leyland B. Small Hydroelectric Engineering Practice. 1st Ed. London: CRC Press, 2014. 254 p. <https://doi.org/10.1201/b16627>.

References

1. Svedeniya o sostoyanii avariinosti na nefteprovodakh za 12 mesyatsev 2020 goda [Information on the Accident Rate of Oil Pipelines for the 12 Months of 2020]. *Sluzhba po kontrolyu i nadzoru v sfere okhrany okruzhayushchei sredy, ob'ektov zhivotnogo mira i lesnykh otnoshenii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga — Yugry: ofitsial'nyi sait* [Service for Control and Supervision in the Field of Environmental Protection, Wildlife and Forestry of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra: Official Website]. URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

2. RD 2-6.2-1028-2015 «Kategoriinost' elektropriemnikov promyshlennykh ob'ektov ОАО «Газпром», utv. Rasporyazheniem PAO «Газпром» № 366: vved. v deistvie s 01 fevralya 2016 g. [RD 2-6.2-1028-2015 «Categorization of Electrical Receivers of Industrial Facilities of Gazprom OJSC, Approved By Order of PJSC Gazprom No. 366: Introduced since February 1, 2016]. Moscow, ООО «Газпром экспо», 2015. 69 p. URL: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/sto-gazprom-9.2-003-2009-zashchita-ot-korrozii.-proektirovanie-e.pdf> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

3. Barvinov A.V. Avtonomnoe energosnabzhenie lineinoi chasti neftegazodobyvayushchikh

predpriyatii [Autonomous Energy Supply of Linear Part of Oil and Gas Production Enterprises]. *Materialy Natsional'noi s mezhduнародnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh i spetsialistov «Energosberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse»*, posvyashchennoi 65-letiyu Tyumenskogo industrial'nogo universiteta, Tyumen', 27-29 oktyabrya 2021 goda. Otv. redaktor A.N. Khalin [Materials of the National Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students, Scientists and Specialists with International Participation «Energy Saving and Innovative Technologies in the Fuel and Energy Complex» Dedicated to the 65th Anniversary of Tyumen Industrial University, October 27-29, 2021, Tyumen / Edited by A.N. Khalin]. Tyumen, Izd-vo Tyumenskogo industrial'nogo universiteta, 2021, pp. 352–355. EDN: NGWKED. [in Russian].

4. R 060-2017. *Tipovye proektnye resheniya po oborudovaniyu PTO sistemoi bespereboinogo elektropitaniya: metodicheskie rekomendatsii* [R 060-2017. Typical Design Solutions for Equipping UPS Systems: Methodological Recommendations]. Moscow, FKU «NITs «Okhrana» Rosgvardii, 2016. 54 p. [in Russian].

5. Zol'nikov A.E., Gladkov I.N., Leonov E.N. Perspektivy razvitiya raspredelennoi generatsii v neftegazovoi otrasli [Prospects for Development of Distributed Generation in the Oil and Gas Industry]. *Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh «Energiya molodezhi dlya neftegazovoi industrii»*, Al'met'evsk, 26 noyabrya 2021 goda [Collection of Materials of the VI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Youth Energy for the Oil and Gas Industry», Al'metyevsk, November 26, 2021.]. Al'met'evsk, Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi institut, 2021, pp. 373–376. EDN: RFVDYW. [in Russian].

6. Akhtulov A.L., Ivanova L.A., Leonov E.N. The Technique of Optimal Choice of Energy Sources in the Electrical Systems with Distributed Generation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk, April

04-06, 2019. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. P. 62075. doi: 10.1088/1757-899X/537/6/062075.

7. *Tomskii manometryvi zavod: ofitsial'nyi sait* [Tomsk Pressure Gauge Plant: Official Website]. URL: <https://www.manotom.com/catalog/elektronnye/manometry-tsfrovye/el/pretsizionnyy-tsifrovoy-manometr-dm5002m/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

8. *Metran: ofitsial'nyi sait* [Metran: Official Website]. URL: <https://metran.ru/catalog/pressure/metran-150/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

9. *Armstroi: ofitsial'nyi sait* [Armstroi: Official Website]. URL: https://armstroy-nn.ru/useful_info/article/truboprovodnaya-armatura-dlya-nefteproduktov-osobennosti-trebovaniya/ (accessed 18.06.2023). [in Russian].

10. *ORLESK.RU: ofitsial'nyi sait* [ORLESK.RU: Official Website]. URL: <https://www.orleks.ru/funkcionalnye-bloki/rizur-m-o-termochehol-s-obogrevom-dlya-datchikov-davleniya/> (accessed 18.06.2023). [in Russian].

11. Fedyanin V.V. Vliyanie preobrazovatelya chastoty na koeffitsient poleznogo deistviya asinkhronnogo dvigatelya [Influence of Frequency Converter on the Efficiency of Asynchronous Motor]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal — International Research Journal*, 2017, No. 08 (62), pp. 83–87. doi: 10.23670/IRJ.2017.62.089. [in Russian].

12. Nurakhmet E.E., Gafarov A.A., Benke M.S., Kovalev G.A., Makarenkova V.A. Vyborelektro-generatorov dlya vetroenergeticheskikh ustanovok [Selection of Generators for Wind Power Plants]. *Molodoi uchenyi — Young Scientist*, 2016, No. 28.2 (132.2), pp. 68–79. URL: <https://moluch.ru/archive/132/36983/> (accessed 18.06.2023). EDN: XEOOYZ. [in Russian].

13. Gulliver S., Roger E.A. *Hydropower Engineering Handbook*. USA, McGraw-Hill Inc., 1991. 667 p. URL: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/195476> (accessed 18.06.2023).

14. *Leyland B. Small Hydroelectric Engineering Practice*. 1st Ed. London: CRC Press, 2014. 254 p. <https://doi.org/10.1201/b16627>.

Статья поступила в редакцию 27.09.2023; одобрена после рецензирования 09.10.2023; принята к публикации 10.10.2023.

The article was submitted 27.09.2023; approved after reviewing 09.10.2023; accepted for publication 10.10.2023.

Научная статья

УДК 621.311

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73

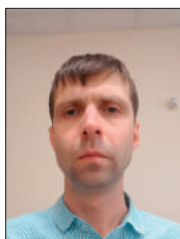
СПОСОБЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ В ДОПУСТИМЫХ ПРЕДЕЛАХ В УСЛОВИЯХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРИ РЕЗКОПЕРЕМЕННОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЯ

**Борис Андреевич Косарев****Boris A. Kosarev**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, научный сотрудник, Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Омск, Россия

**Галина Андреевна Кошук****Galina A. Koshchuk**

старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Дмитрий Викторович Лазарев****Dmitriy V. Lazarev**

аспирант кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Александр Анатольевич Охотников****Aleksandr A. Okhotnikov**

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

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

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Актуальность

Перспективным направлением развития отечественной и зарубежной электроэнергетики является распределенная генерация. Распределенная генерация является принципом развития распределительных сетей и сетей внутреннего электроснабжения предприятий с уровнем напряжения до 110 кВ включительно, при котором электростанции с установленной мощностью не более 25 МВт размещаются в непосредственной близости от узлов электропотребления. К причинам распространения такого принципа развития распределительных сетей следует отнести уменьшение потерь на передачу электроэнергии, возможность изолированного или автономного режимов работы энергорайонов и благодаря разнообразию и высокой эффективности генерирующих установок распределенной генерации — возможность использовать любые доступные энергоресурсы, в том числе возобновляемые источники энергии. В условиях распределенной генерации электроснабжение потребителей с резкопеременным характером нагрузки затруднительно, что связано со значительными отклонениями параметров режима и отключением генерирующих установок противоаварийной автоматикой. Причины такой низкой динамической устойчивости генерирующих установок распределенной генерации различны и определяются их принципом действия, конструкцией и некоторыми другими факторами. К основным причинам относятся некорректно заданные алгоритмы работы и уставки противоаварийной автоматики, перегрев первичного двигателя, низкий момент инерции турбины, стохастический характер выработки энергии. К потребителям с резкопеременным характером нагрузки относятся не только крупные промышленные предприятия, но и предприятия связи, некоторые сельскохозяйственные предприятия, нагрузка жилищно-коммунального сектора. Таким образом, резкопеременная нагрузка присутствует во многих сферах деятельности, и решение вопросов организации ее электроснабжения по принципу распределенной генерации является актуальной проблемой.

Цель исследования

Обзор способов поддержания параметров режима системы электроснабжения с объектами распределенной генерации и потребителями, обладающими резкопеременным характером нагрузки.

Методы исследования

Исследования проведены с использованием теории переходных электромеханических процессов, теории электропередачи, экспериментальных результатов.

Результаты

Выполнен обзор способов поддержания параметров режима системы электроснабжения с распределенными источниками энергии в допустимых пределах при резкопеременном характере нагрузки потребителей.

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

Для цитирования: Косарев Б. А., Кошук Г. А., Лазарев Д. В., Охотников А. А., Хамитов Р. Н. Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах в условиях распределенной генерации при резкопеременном характере нагрузки потребителя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 64-73. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73>.

Ключевые слова

накопитель электрической энергии, резкопеременная нагрузка, сглаживание профиля мощности, толчковая нагрузка, распределенная генерация, генерирующая установка, вторичное регулирование, первичное регулирование, объект распределенной генерации, график нагрузки потребителя

Original article

METHODS FOR MAINTAINING VOLTAGE AND FREQUENCY VALUES WITHIN ACCEPTABLE LIMITS IN CONDITIONS OF DISTRIBUTED GENERATION WITH A SHARPLY VARIABLE NATURE OF THE LOAD OF THE CONSUMER

Relevance

A promising direction for the development of domestic and foreign electric power industry is distributed generation. Distributed generation is a principle for the development of distribution networks and internal power supply networks of enterprises with a voltage level of up to 110 kV inclusive, in which power plants with an installed capacity of not more than 25 MW are located in close proximity to power consumption nodes. The reasons for the spread of this principle of development of distribution networks include the reduction of losses in the transmission of electricity, the possibility of isolated or autonomous modes of operation of energy districts, and due to the variety and high efficiency of distributed generation generating plants, the ability to use any available energy resources, including renewable energy sources. In conditions of distributed generation, power supply to consumers with a sharply variable nature of the load is difficult, which is associated with significant deviations of the mode parameters and shutdown of generating plants by emergency automatics. The reasons for such a low dynamic stability of generating installations of distributed generation are different and are determined by their operating principle, design and some other factors. The main reasons include incorrectly set operation algorithms and settings of emergency automatics, overheating of the primary engine, low moment of inertia of the turbine, and stochastic nature of power generation. Consumers with a sharply variable nature of the load include not only large industrial enterprises, but also communications enterprises, some agricultural enterprises, and the load of the housing and communal sector. Thus, a sharply variable load is present in many areas of activity and solving the issues of organizing its power supply according to the principle of distributed generation is an urgent problem.

Aim of research

Review of ways to maintain the mode parameters of the power supply system with distributed generation facilities and consumers with a sharply variable nature of the load.

Research methods

The studies were carried out using the theory of transient electromechanical processes, the theory of power transmission, and experimental results.

Results

A review is made of ways to maintain the mode parameters of a power supply system with distributed energy sources within acceptable limits with a sharply variable nature of the load of consumers.

Acknowledgments: The work was carried out according to the State Assignment of the Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (State Registration Number of the Project 122011200349-3).

Ключевые слова

electrical energy storage device, sharply variable load, power profile smoothing, shock load, distributed generation, generating plant, secondary regulation, primary regulation, distributed generation object, consumer load schedule

For citation: Kosarev B. A., Koshchuk G. A., Lazarev D. V., Okhotnikov A. A., Khamitov R. N. Sposoby podderzhaniya znacheniy napryazheniya i chastoty v dopustimyykh predelakh v usloviyakh raspredelennoy generatsii pri rezkoperemennom kharaktere nagruzki potrebitelya [Methods for Maintaining Voltage and Frequency Values within Acceptable Limits in Conditions of Distributed Generation with a Shaply Variable Nature of the Load of the Consumer]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 64-73 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73>.

Введение

Электрическая нагрузка потребителя не является величиной постоянной и изменяется во времени из-за непостоянства режима работы электроприемников или их отключения и включения в ходе выполнения технологического цикла, коммутаций в сети и др. На рисунке 1 представлены виды индивидуальных графиков нагрузки потребителей с точки зрения регулярности ($t_{\text{ц}}$ — время технологического цикла; $t_{\text{р}}$ — время работы задействованных в цикле электроприемников; $t_{\text{о}}$ — время отключения).

Показанные на рисунке 1 варианты изменения электропотребления потребителя во времени соответствуют отклонениям и колебаниям напряжения в точке питания от мощной электросистемы. Такие отклонения и колебания напряжения могут быть рассчитаны при помощи следующей формулы:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r_0 + Q \cdot x_0}{U_{\text{ном}}} \cdot L, \quad (1)$$

где ΔU — потери напряжения в линии электропередачи;

P — активная мощность;

Q — реактивная мощность;

r_0 — активное сопротивление;

x_0 — реактивное сопротивление;

L — длина линии;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение.

Из формулы (1) следует, что скачкообразное изменение величины питаемой нагрузки приводит к увеличению или уменьшению потерь напряжения в линии электропередачи.

Исходя из выражения (1) выполним расчет колебаний напряжения в точке питания нагрузки при ее резкпеременном характере. При расчете используем следующие значения параметров электропередачи: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; $L = 1$ км; $r_0 = 1,91$ Ом; $x_0 = 0,299$ Ом; $\cos\varphi = 0,9$. Питание осуществляется по одноцепной воздушной линии электропередачи, в которой допустимая токовая нагрузка

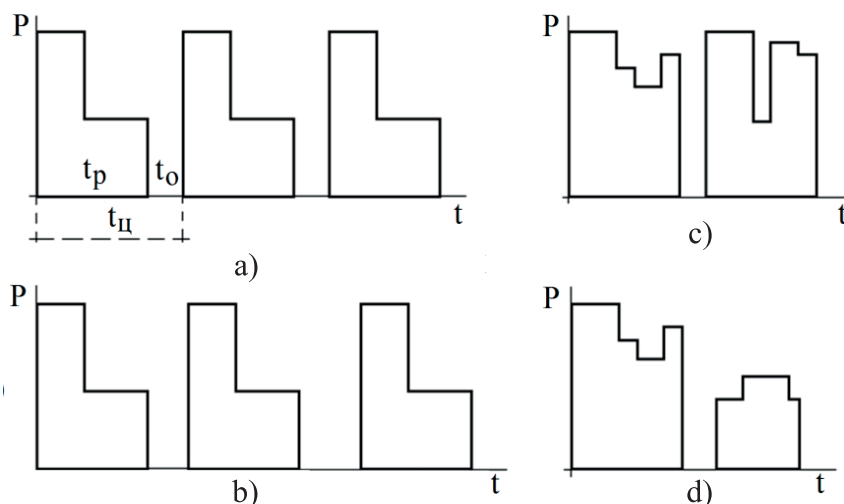


Рисунок 1. Виды индивидуальных графиков нагрузки потребителей [1]: периодический (а), циклический (б), нециклический (с), нерегулярный (д)

Figure 1. Types of individual consumer load schedules [1]: periodic (a), cyclic (b), non-cyclic (c), irregular (d)

фазного провода 100 А. Вторичное регулирование напряжения отсутствует. Результаты расчета представлены в виде таблицы 1.

В таблице 1: P_0 , P_t — значения активной мощности при сбросе и набросе нагрузки; ΔU_0 и ΔU_t — потери напряжения в линии электропередачи при сбросе и набросе нагрузки; δU — размах изменения напряжения.

Из таблицы 1 следует, что с увеличением амплитуды колебаний мощности увеличивается размах изменения напряжения в точке питания потребителя с резкопеременным характером нагрузки.

Если питание нагрузки потребителя осуществляется от автономной (изолированной) системы электроснабжения с распределенными источниками энергии (РИЭ) или находящейся в островном режиме работы системы электроснабжения с РИЭ, тогда существенные изменения электропотребления могут быть причиной не только отклонений и колебаний напряжения, но и частоты.

При синхронной генерации в основе расчета таких колебаний лежит уравнение, описывающее переходные электро-механические процессы:

$$J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} + D \cdot \Delta \omega = P_{\text{мд}} - P_{\text{эм}}, \quad (2)$$

где J — момент инерции ротора;

ω — угловая частота вращения ротора;

D — демпфирующий коэффициент;
 $\Delta \omega$ — отклонение угловой частоты вращения ротора;

$P_{\text{мд}}$ — механическая мощность первичного двигателя;

$P_{\text{эм}}$ — электромагнитная мощность генератора.

Из выражения (2) следует, что реакция генерирующей установки (ГУ) на скачкообразное изменение нагрузки зависит от момента инерции ротора и демпфирующего коэффициента. Демпфирующий коэффициент символизирует в выражении (2) систему автоматического управления (САУ) ГУ.

При электронной генерации (ГУ инверторного включения) реакция ГУ на скачкообразное изменение нагрузки будет зависеть только от САУ ГУ.

Перспективным направлением развития электроэнергетики является распределенная генерация.

Распределенная генерация (РГ) — электрогенерирующая система, состоящая из одного или нескольких объектов распределенной генерации, подключаемых к распределительным сетям или сетям внутреннего электроснабжения потребителей электроэнергии на напряжении до 110 кВ включительно, максимально приближенная к узлам электропотребления [2].

Таблица 1. Размах изменения напряжения

Table 1. Voltage swing

P_0 , кВт	P_t , кВт	ΔU_0 , В	ΔU_t , В	δU , %
5	10	344,22	688,43	3,44
5	15	344,22	1032,65	6,88
5	20	344,22	1376,86	10,33
5	25	344,22	1721,08	13,77
5	30	344,22	2065,30	17,21
5	35	344,22	2409,51	20,65
5	40	344,22	2753,73	24,10
5	45	344,22	3097,94	27,54
5	50	344,22	3442,16	30,98

Объект распределенной генерации — электростанция, состоящая из одной или нескольких генерирующих установок, подключаемая к распределительным сетям или сетям внутреннего электроснабжения потребителей электроэнергии на напряжении до 110 кВ включительно, максимально приближенная к узлам электропотребления, работающая параллельно с электроэнергетической системой или в изолированном (автономном) и островном режимах, имеющая в точке общего присоединения суммарную установленную мощность, не превышающую 25 МВт включительно, использующая для производства всех видов энергии любые первичные источники энергии, включая возобновляемые [2].

В условиях РГ при резкопеременном характере нагрузки потребителя малая протяженность линий электропередачи уменьшает колебания напряжения (выражение (1)), но ограничение по установленной мощности ГУ РГ снижает их динамическую устойчивость (выражение (2)).

Резкопеременная нагрузка присутствует во многих сферах деятельности, и решение вопросов организации ее электроснабжения по принципу РГ является актуальной проблемой.

Целью работы является обзор способов поддержания параметров режима системы электроснабжения с объектами РГ и потребителями, обладающими резкопеременным характером нагрузки.

Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах

Рассмотрим способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах.

Обязательным условием поддержания напряжения и частоты в сети в допустимых пределах является первичное регулирование, т.е. работа устройств автоматического регулирования возбуждения

(АРВ) и автоматического регулирования частоты вращения (АРЧВ) синхронных генераторов электростанций. Для синхронного генератора реакция на резкопеременный характер нагрузки будет определяться наклоном регулировочных характеристик АРВ и АРЧВ, способом питания АРВ и пр.

Учитывая неизменное увеличение числа генерирующих установок инверторного включения, следует отметить в качестве первичного регулирования и алгоритмы управления сетевыми инверторами [3]. В основе управления сетевыми инверторами лежит принцип имитации синхронного генератора (droop method), поэтому реакция на скачкообразное изменение величины питаемой нагрузки будет определяться наклоном регулировочных характеристик по напряжению и частоте.

Рассмотрим способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах при вторичном регулировании.

Для поддержания отклонений и колебаний напряжения в допустимых пределах используются различные аппаратные и оперативные мероприятия.

В точке питания нескольких мощных электроприемников или потребителей существует возможность сглаживания группового графика нагрузки путем разнесения во времени максимумов их энергопотребления, а, значит, и уменьшения отклонений и колебаний напряжения. В точке питания потребителя с резкопеременным характером нагрузки или мощного электроприемника с повторно-кратковременным или кратковременным режимом работы такая возможность отсутствует.

Вопрос маневрирования графиками нагрузки предприятий подробно рассмотрен в работе [4]. Дифференцированный по зонам суток тариф на электроэнергию стимулирует потребителей сглаживать

профиль мощности. В качестве решения проблемы предложено смещать график нагрузки из зоны штрафного электропотребления в зону льготного электропотребления. Показано, что наиболее эффективное сглаживание графика нагрузки энергосистемы происходит при формировании индивидуальных графиков нагрузки потребителей по критерию наименьшей максимальной мощности.

Регулирование напряжения на шинах электростанций и подстанций по определенному закону (встречное регулирование напряжения, 5–8 % от номинального) осуществляют при помощи изменения коэффициента трансформации силовых трансформаторов [5]. Для этого трансформаторы оснащают устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), в том числе устройствами автоматического регулирования (АРН). Дискретность регулирования напряжения устройством РПН составляет 1,25–2,50 %, а диапазон регулирования ± 10 –16 % от номинального напряжения. При автоматическом регулировании напряжения в устройстве предусматривается зона нечувствительности, которая позволяет избегать слишком частых переключений РПН при работе мощных электроприемников. В силовых трансформаторах 6–20/0,4 кВ используется устройство переключения без возбуждения (ПБВ) с диапазоном регулирования напряжения ± 5 % и дискретностью 2,5 %.

Также в регулировании напряжения может участвовать вольтодобавочный трансформатор (ВДТ). Вторичная обмотка ВДТ последовательно подключается к вторичной обмотке силового трансформатора, как правило, автотрансформатора. ВДТ может выполнять функции РПН при его отсутствии на силовом трансформаторе. Линейные регулировочные трансформаторы (ЛРТ) используются при регулировании напряжения на линии электропередачи.

Применение установок продольной компенсации (УПК) позволяет уменьшить при возрастании тока в линии отклонение напряжения за счет компенсации индуктивного сопротивления емкостным. Последовательное включение УПК эффективно при больших значениях коэффициента реактивной мощности.

Вопрос применения УПК для компенсации реактивной мощности исследован в работе [6]. Для автоматического снижения колебаний и отклонений напряжения у электроприемников применяется продольная емкостная компенсация. Показано уменьшение размаха изменения напряжения в точке питания потребителя с резкопеременным характером нагрузки при помощи компенсации реактивной мощности. К недостаткам УПК относятся увеличение токов короткого замыкания из-за компенсации индуктивного сопротивления сети емкостным сопротивлением продольной конденсаторной батареи и необходимость защиты продольной конденсаторной батареи ее шунтированием.

Одним из эффективных способов поддержания параметров режима в допустимых пределах является использование накопителей электрической энергии (НЭЭ). [7–9]. НЭЭ получает энергию от сети при отсутствии резкопеременной нагрузки. При возобновлении питания резкопеременной нагрузки НЭЭ сглаживает профиль мощности. Очевидно, что для непрерывных технологических циклов такой способ является эффективным, если заряд НЭЭ будет осуществляться от автономного источника энергии малой мощности. В этом случае обязательным условием является восстановление уровня заряда НЭЭ за время отключения или сброса питаемой нагрузки.

Следует отметить несколько технических решений, касающихся сглаживания профиля мощности потребителя при

помощи НЭЭ и стабилизации параметров режима.

Практический интерес представляет устройство сглаживания пиков потребления электроэнергии [10]. Устройство работает по принципу разряда накопителя электроэнергии в часы пиковых нагрузок и заряда накопителя при сбросе нагрузки. К недостаткам устройства следует отнести невозможность сглаживания профиля мощности потребителя, если пиковому потреблению предшествовало прерывание внешнего электроснабжения, и уровень заряда накопителя недостаточен для компенсации увеличения электропотребления в течение всего временного интервала наброса нагрузки, а также невозможность уменьшения потребителем суммарной нагрузки на внешнюю систему электроснабжения.

В работе [11] описано применение НЭЭ для регулирования уровня генераторного напряжения. К шине генераторного напряжения (к ней подключены ГУ источников РГ) подключен управляемый накопитель электрической энергии НЭЭ. При достижении напряжением значения, ниже которого ГУ будут отключены релейной защитой (отключен генераторный выключатель), НЭЭ выдает реактивную мощность в сеть. Время выдачи мощности НЭЭ должно быть не меньше окончания самозапусков электродвигателей.

Обеспечение динамической устойчивости ГУ источников РГ при возникновении аварийных возмущений в сети рассмотрено в работе [12] и реализуются регулированием потребляемых и генерируемых активных мощностей. Потребление активной мощности регулируется подключением к шинам напряжения генератора переменного активного сопротивления (способ уменьшить скорость вращения ротора генератора). Генерация активной мощности регулируется подключением к шинам напряже-

ния генератора блока высоковольтных конденсаторов или НЭЭ (способ увеличить скорость вращения ротора генератора).

В работе [13] предложена САУ, регулирующая параметры режима промышленных энергорайонов с источниками РГ.

Задача изобретения — разработка системы автоматического ограничения снижения напряжения (АОСН), учитывающей особенности промышленных энергорайонов с источниками РГ. Система предотвращает снижение напряжения на шинах питающих подстанций до значений, при которых возникает «лавина напряжения» (не допустимых по условиям устойчивости). Система осуществляет для поддержания уровня напряжения следующие управляющие воздействия: автоматическое изменение коэффициентов трансформации силовых трансформаторов, форсировку выдачи реактивной мощности средствами компенсации реактивной мощности (батареи статических конденсаторов и др.), увеличение загрузки ГУ источников РГ по реактивной мощности и (или) активной мощности, отключение и включение нагрузок потребителей (в определенной последовательности и определенного объема). Выбор управляющих воздействий для каждого схемно-режимных условий осуществляется системой АОСН на основании результатов предварительного имитационного моделирования. Время осуществления управляющих воздействий АОСН составляет десятые доли секунды, что соответствует скорости развития «лавина напряжения» в энергорайонах с высокой долей двигательной нагрузки и источниками РГ.

Выводы

По результатам исследований выполнен обзор способов поддержания пара-

метров режима системы электроснабжения с распределенными источниками энергии в допустимых пределах при резкопеременном характере нагрузки потребителей. К таким способам относятся маневрирование графиками нагрузки потребителей, автоматическое регулирование напряжения на шинах электростанций и подстанций, применение уста-

новок продольной компенсации или других устройств компенсации реактивной мощности, накопителей электрической энергии. Применение накопителей является перспективным способом регулирования параметров режима, однако для его распространения должны быть улучшены технико-экономические показатели установок.

Список источников

1. Султанов Г.А., Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Современные технологии проектирования систем электроснабжения // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 52. С. 224-228.

2. Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Краткий словарь современной электроэнергетики. Нижний Новгород: ООО «Научно-издательский центр «21 век», 2021. 414 с. ISBN 978-5-6045837-7-7.

3. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrero J. M. A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 15935-15955. 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142810.

4. Чаус О.В. Исследование регулировочных возможностей промышленных потребителей по снижению максимума электрической нагрузки // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апреля 2008 года. Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2008. С. 172–174.

5. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с.

6. Бакшаева Н.С., Вальц И.А. Анализ колебаний напряжения в системах электроснабжения с потребителями с резкопеременной нагрузкой // Проблемы региональной энергетики. 2019. № 3(44). С. 1–16.

7. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. 2020. № 6 (148). С. 76–87. doi: 10.46920/2409-5516_2020_6148_76. EDN: YBOUHF.

8. Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопи-

телей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 4(37). С. 26–33. EDN: JSSGMJ.

9. Пат. 216305 РФ, МПК F 03 B 13/00, F 03 D 9/11, H 02 S 10/10. Устройство для сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции / С.В. Кривальцевич, Б.А. Косарев. 2022112680, Заявлено 05.05.2022; Опубл. 27.01.2023. Бюл. No 3.

10. Пат. 200180 РФ, МПК H 02 J 3/06. Устройство сглаживания пиков потребления электроэнергии / К.А. Самойлов, А.И. Орлов. 2019143054, Заявлено 18.12.2019; Опубл. 08.10.2020. Бюл. No 28.

11. Пат. 2721477 РФ, МПК H 02 J 3/28. Система управления накопителями электрической энергии для расширения области допустимых режимов генерирующих установок источников распределенной генерации при провалах напряжения / П.В. Илюшин, А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов. 2019139313, Заявлено 03.12.2019; Опубл. 19.05.2020. Бюл. No 14.

12. Пат. 2576652 РФ, МПК H 02 P 9/08. Способ управления переходными электромеханическими процессами в электроэнергетических системах / П.В. Илюшин, В.А. Макеечев, О.А. Суханов. 2014128322/07, Заявлено 11.07.2014; Опубл. 10.03.2016. Бюл. 7.

13. Пат. 2715339 РФ, МПК G 05 F 1/30, H 02 H 3/24. Система автоматического ограничения снижения напряжения в промышленных энергорайонах 6–220 кВ с источниками распределенной генерации / П.В. Илюшин, А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов. 2019138242, Заявлено 27.11.2019; Опубл. 27.02.2020. Бюл. 6.

References

1. Sultanov G.A., Sazykin V.G., Kudryakov A.G. Sovremennye tekhnologii proektirovaniya sistem elektrosnabzheniya [Modern Technologies for Designing Power Supply Systems]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo univer-*

siteta — *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2015, No. 52, pp. 224–228. [in Russian].

2. Papkov B.V., Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Kratkii slovar' sovremennoi elektroenergetiki* [Brief Dictionary of Modern Electric Power Industry]. Nizhnii Novgorod, OOO «Nauchno-izdatel'skii tsentr «21 vek», 2021. 414 p. ISBN 978-5-6045837-7-7. [in Russian].

3. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrero J. M. A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids. *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 15935–15955. 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142810.

4. Chaus O.V. Issledovanie regulirovochnykh vozmozhnostei promyshlennykh potrebitelei po snizheniyu maksimuma elektricheskoi nagruzki [Study of the Regulation Capabilities of Industrial Consumers to Reduce the Maximum Electrical Load]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, magistrantov i molodykh uchenykh «Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, energetiki i upravleniya»*, Gomel, 28–29 aprelya 2008 goda [Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference of Students, Masters and Young Scientists «Research and Development in the Field of Mechanical Engineering, Energy and Management», Gomel, April 28–29, 2008]. Gomel, Gomel'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni P.O. Sukhogo, 2008, pp. 172–174. [in Russian].

5. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. *Osobennosti raschetov rezhimov v energoraionakh s raspredelennoi generatsiei* [Peculiarities of Regime Calculations in Energy Regions with Distributed Generation]. N. Novgorod: NIU RANKhiGS, 2018. 280 p. [in Russian].

6. Bakshaeva N.S., Val'ts I.A. Analiz kolebaniy napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya s potrebitelyami s rezkoperemennoi nagruzkoj [Analysis of Voltage Fluctuations in Power Supply Systems with Consumers with Sharply Variable Load]. *Problemy regional'noi energetiki — Problems of Regional Power Engineering*, 2019, No. 3 (44), pp. 1–16. [in Russian].

7. Zyryanov V.M., Kir'yanova N.G., Korotkov I.Yu., Nesterenko G.B., Prankevich G.A. *Sistemy nakopleniya energii: rossiiskii i zarubezhnyi opyt* [Energy Storage Systems: Russian and International

Experience]. *Energeticheskaya politika — Energy Policy*, 2020, No. 6 (148), pp. 76–87. doi: 10.46920/2409-5516_2020_6148_76. EDN: YBOUHF. [in Russian].

8. Ilyushin P.V., Kulikov A.L., Berezovskii P.K. *Effektivnoe ispol'zovanie nakopitelei elektricheskoi energii dlya predotvrashcheniya otklyuchenii ob'ektov raspredelennoi generatsii pri kratkovremennykh otkloneniyakh chastoty* [Effective Application of Electric Energy Storage for Prevention of Distributed Generation Units Tripping due to Short-Time Frequency Deviations]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya — Relay Protection and Automation*, 2019, No. 4 (37), pp. 26–33. EDN: JSSGMJ. [in Russian].

9. Krivaltsevich S. V., Kosarev B. A. *Ustroystvo dlya sglazhivaniya profilya moshchnosti KV-radiostantsii* [HF Radio Power Profile Smoothing Device]. Patent RF, No. 216305, 2023 [in Russian].

10. Samoylov K.A., Orlov A.I. *Ustroystvo sglazhivaniya pikov potrebleniya elektroenergii* [Device for Smoothing the Peaks of Electricity Consumption]. Patent RF, No. 200180, 2020. [in Russian].

11. Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Loskutov A. A. *Sistema upravleniya nakopitelyami elektricheskoy energii dlya rasshireniya oblasti dopustimykh rezhimov generiruyushchikh ustanovok istochnikov raspredelennoi generatsii pri provalakh napryazheniya* [The Control System for Electric Energy Storage Devices to Expand the Range of Permissible Modes of Generating Installations of Distributed Generation Sources in Case of Voltage Dips]. Patent RF, No. 2721477, 2020. [in Russian].

12. Ilyushin P. V., Makeychev V. A., Sukhanov O. A. *Sposob upravleniya perekhodnymi elektromekhanicheskimi protsessami v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Method for Controlling Transient Electromechanical Processes in Electric Power Systems]. Patent RF, No. 2576652, 2016. [in Russian].

13. Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Loskutov A. A. *Sistema avtomaticheskogo ogranicheniya snizheniya napryazheniya v promyshlennykh energorayonakh 6-220 kV s istochnikami raspredelennoi generatsii* [System for Automatic Limitation of Voltage Reduction in Industrial Energy Districts 6-220 kV with Sources of Distributed Generation] Patent RF, No. 2715339, 2020. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 02.10.2023.

The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 02.10.2023.

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-74-88

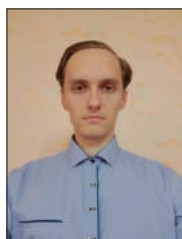
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ НА РЕЗУЛЬТИРУЮЩУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ С УЧЕТОМ РЕКОНСТРУКЦИИ В АВАРИЙНЫХ И ПОСЛЕАВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ УЗЛУ ПРЕДПРИЯТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

**Юлия Николаевна Кондрашова****Yulia N. Kondrashova**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

**Ангелина Максимовна Ефименко****Angelina M. Efimenko**

магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

**Артём Снигур****Artem Snigur**

студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

Актуальность

Для стабильной работы электрооборудования систем электроснабжения промышленных предприятий необходимо оценивать и разрабатывать мероприятия, которые будут решать поставленные задачи комплексно. Таким образом, возникает необходимость оценки результирующей устойчивости при введении новых генерирующих мощностей в аварийных и послеаварийных режимах с учетом небалансов мощностей. Объектом исследования является энергоузел, характеризующийся сложной конфигурацией с классом напряжения от 0,4 до 500 кВ, содержащий собственные источники генерации, основным потребителем которого является крупнейший производитель черной металлургии.

Ключевые слова

переходный процесс, результирующая устойчивость, переток мощности, небаланс мощности, надежность электроснабжения

Цель исследования

Целью работы является определение влияния баланса мощностей на результирующую устойчивость генераторов в аварийных и послеаварийных режимах.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели был разработан алгоритм, положенный в основу программного комплекса КАТРАН.

Результаты

Разработанный алгоритм позволяет исследовать режим ликвидации короткого замыкания с отделением от энергосистемы в результате действия релейной защиты и автоматики с определением доли небаланса мощности. По результатам работы были определены энергорайоны с нарушением результирующей устойчивости синхронных машин и возникшим небалансом мощности, выделившиеся в результате короткого замыкания, что позволило выдать уточненные рекомендации по подключению нагрузок в сети или их отключению в аварийном режиме. Полученные рекомендации позволят повысить надежность электроснабжения предприятия с целью увеличения объема и качества выпускаемой продукции.

Для цитирования: Кондрашова Ю. Н., Ефименко А. М., Снигур А. Оценка влияния баланса мощностей на результирующую устойчивость генераторов с учетом реконструкции в аварийных и послеаварийных режимах применительно к энергетическому узлу предприятия черной металлургии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 74-88. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-74-88>.

Original article

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF THE CAPACITY BALANCE ON THE RESULTING STABILITY OF GENERATORS TAKING INTO ACCOUNT RECONSTRUCTION IN EMERGENCY AND POST-EMERGENCY MODES AS APPLIED TO THE POWER UNIT OF THE FERROUS METALLURGY ENTERPRISE

Relevance

For stable operation of electrical equipment of power supply systems of industrial enterprises, it is necessary to evaluate and present measures that will solve the set tasks in an integrated manner. Thus, there is a need to assess the resulting stability when introducing new generating capacities in emergency and post-emergency modes, taking into account unbalanced capacities. The object of the study is a power hub characterized by a complex configuration with a voltage class from 0.4 to 500 kV and contains its own generation sources. The main consumer of which is the largest producer of ferrous metallurgy.

Aim of research

The aim of the work is to determine the influence of the power balance on the resulting stability of generators in emergency and post-emergency modes.

Research methods

To achieve this goal, an algorithm has been developed, which is the basis of the KATRAN program complex.

Results

This algorithm makes it possible to study the short-circuit elimination mode with separation from the power system as a result of relay protection

Keywords

transient process, resulting stability, power flow, power unbalance, reliability of power supply

and automation action with determination of the power unbalance share. According to the results of the work, power areas with violation of the resulting stability of synchronous machines and the resulting power unbalance, allocated as a result of the short circuit, were identified, which allowed to issue additional recommendations on connecting loads in the network or their disconnection in emergency mode. The obtained recommendations will allow to increase the reliability of power supply of the enterprise in order to increase the volume and quality of manufactured products.

For citation: Kondrashova Yu. N., Efimenko A. M., Snigur A. Otsenka vliyaniya balansa moshchnostey na rezul'tiruyushchuyu ustoychivost' generatorov s uchetom rekonstruktsii v avariynykh i posleavariynykh rezhimakh primenitel'no k energeticheskomu uzlu predpriyatiya chernoy metallurgii [Estimation of the Influence of the Capacity Balance on the Resulting Stability of Generators Taking into Account Reconstruction in Emergency and Post-Emergency Modes as Applied to the Power Unit of the Ferrous Metallurgy Enterprise]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 74-88. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-74-88>.

Введение

В настоящее время за счет роста нагрузки в современных энергосистемах и, как следствие, увеличения потребляемой мощности, одной из основных задач для крупных промышленных предприятий черной и цветной металлургии стало обеспечение непрерывного электроснабжения электроприемников. Перерыв питания кратковременно приводит к нарушению производственного цикла, что вызывает значительный материальный ущерб. Решением данной задачи является реконструкция существующих турбоагрегатов, а также увеличение доли генерируемой мощности. Ввод объектов распределенной генерации позволяет обеспечить энергонезависимость и надежность электроснабжения собственных ответственных электроприемников, а также способствует снижению себестоимости и повышению конкурентоспособности производимой продукции. Важно отметить, что аварийные режимы в распределенных сетях среднего и высокого напряжения имеют свою специфику. Аварии, связанные с нарушением устойчивости в системе электроснабжения промышленных предприятий, содержащих источники собственной генерации, являются наи-

более тяжелыми, влекущими за собой нарушение технологического процесса. Несмотря на то, что внедрение объектов распределенной генерации ведет к повышению надежности систем электроснабжения потребителей и повышению энергоэффективности предприятия, с другой стороны, усложняются возможные нормальные, аварийные, послеаварийные и утяжеленные режимы. Возникает необходимость проведения оценки изменения технических параметров сети в режимах работы энергетической системы и оценки устойчивости синхронных машин в результате увеличения генерируемой мощности. Важно проанализировать переходные процессы в возможных режимах сети при параллельной работе объектов распределенной генерации и мощных электроприемников. Возникновение внезапного короткого замыкания на шинах связи с энергосистемой большой мощности может привести к отделению крупного энергорайона на раздельную работу с энергосистемой в результате срабатывания релейной защиты или противоаварийной автоматики. При возникновении таких режимов одной из основных задач является обеспечение баланса активных и реактивных мощностей в выделившемся

узле, что не всегда возможно по ряду причин, в том числе при возникновении короткого замыкания (КЗ) в произвольной точке и при выведенном в ремонт оборудовании [1, 2]. Дефицит активной и реактивной мощности может привести к нарушению динамической или результирующей устойчивости синхронных генераторов. Существенным отличием системы электроснабжения крупного промышленного предприятия является значительная удельная мощность на единицу площади. Сильное влияние на надежность и качество электроэнергетики оказывают мощные нелинейные нагрузки. Поэтому важно оценить не только устойчивость работы энергосистемы, но и проанализировать вероятность нарушения электроснабжения потребителя и возможные причины. С целью увеличения эффективности управления аварийными режимами был разработан алгоритм, положенный в основу программного комплекса «КАТРАН», в котором используется модифицированный метод последовательного эквивалентирования [3, 4]. Алгоритм позволяет выполнить оценку изменения параметров в режимах работы энергосистемы с учетом подключения новых турбогенераторов, а также проанализировать результирующую устойчивость при выходе электростанции на раздельную работу с энергосистемой за счет прогнозирования режимов и обеспечения баланса мощностей. Результаты исследования позволят дать рекомендации по подключению нагрузок в сети или их отключению в аварийном режиме, что позволит повысить результирующую устойчивость [5], тем самым способствуя повышению надежности и качества электроснабжения и обеспечению нормального функционирования схемы промышленного энергетического узла (ПЭУ).

Материалы и методы

Постановка задачи моделирования режимов систем электроснабжения промышленных предприятий

В связи с зависимостью технологического процесса промышленных предприятий от качества и надежности электроснабжения потребителей появляется необходимость прогнозирования нормальных аварийных режимов на этапе проектирования. Одним из тяжелых аварийных режимов является короткое замыкание, которое может привести к нарушению работы энергосистемы в целом. Наиболее тяжелыми являются трехфазные короткие замыкания, средними — двухфазные короткие замыкания на землю, легкими — двухфазные короткие замыкания без замыкания на землю и самыми распространенными являются однофазные короткие замыкания. Однако статистика аварий, отражающая возникновение короткого замыкания на ЛЭП высокого напряжения, имеет обратный порядок. Большую долю возникновения в электрических системах составляют однофазные короткие замыкания (75–90 %) двухфазные короткие замыкания на землю и двухфазные короткие замыкания без соединения земель составляют 5–15 %, и наиболее редкими являются трехфазные короткие замыкания 5–10 %.

Для анализа эксплуатационных режимов системы электроснабжения проводится расчет установившихся режимов энергосистемы и ее элементов на этапе проектирования или в целях исследования поставленных задач. Для решения задач оптимизации режимов при переходных процессах и определения токов короткого замыкания необходимо задаться исходными параметрами. К таким параметрам относят характеристики вращающихся машин, трансформаторов, линий электропередачи, электроприемников. При моделировании

системы электроснабжения учитывается действие автоматических регуляторов скорости паровых турбин и возбуждения синхронных машин, действие противоаварийной автоматики.

Оценка динамической устойчивости позволяет провести анализ характера процесса и расчет всех или части параметров режима при переходе системы от одного режима к другому. Собственно, расчет динамического перехода от одного начального установившегося режима к другому новому установившемуся режиму, наступающему при случайном отключении части элементов системы, отключении группы генераторов, линии передачи, нагрузки и т. д.) или отключении их после аварии (обычно короткого замыкания в каком-либо из этих элементов), определение изменений тока, частоты и других технических параметров режима сети.

Сложность расчетов режимов системы разветвленной сети состоит в том, что необходимо учесть многоуровневое построение разомкнутых схем, наличие собственных объектов генерации, связь с энергосистемой на всех классах напряжения. При оценке динамической устойчивости необходимо также отнести асинхронные режимы, режимы ресинхронизации и возможности самозапуска одного из крупных двигателя или группы двигателей.

Алгоритм расчета результирующей устойчивости с учетом небаланса мощностей

Нарушение устойчивости и восстановление работы происходят в несколько этапов. На первом этапе в результате внезапного нарушения наблюдается, что ускоряющий момент турбины становится больше тормозного, угол δ растет, и ротор проворачивается относительно вектора $U_{\text{сети}}$.

Если не учитывать другие факторы, то за время каждого последующего проворота ротора будет увеличиваться кинетическая энергия турбоагрегата и его среднее скольжение. В таком режиме генератор вырабатывает двойную электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$ (синхронную и асинхронную). Синхронная мощность имеет переменный характер, и среднее значение которой равно нулю.

Природа асинхронной мощности заключается в том, что ротор имеет демпферные контуры и обмотки, которые эквивалентны короткозамкнутой обмотке асинхронного двигателя. Поэтому при мощности скольжения, не равной нулю, в этих контурах наводится ЭДС, протекают токи и создаются магнитные потоки взаимодействие с полем статора. В результате при скольжении, не равном нулю, вырабатывается асинхронная мощность, которая по мере роста скольжения увеличивается и может достигать максимальной величины $P_{\text{ас}} = 0,7P_{\text{т.ном}}$. Асинхронная мощность, вырабатываемая генератором, создает электромагнитный тормозной момент на валу.

На следующем этапе в момент времени, когда одновременно срабатывают регуляторы скорости, начинает снижаться мощность турбины, и асинхронная мощность равняется мощности турбины ($P_{\text{ас}} = P_{\text{т}}$). При этом начинают снижаться скорость, скольжение и асинхронная мощность.

На последнем этапе происходит восстановление устойчивости синхронной машины в момент времени, когда скольжение становится равно нулю. На данном этапе необходимо оценить величину угла δ . Если угол больше критического, то машина продолжает ускоряться, а если меньше критического, то ресинхронизация будет успешна. При этом регулятор скорости восстановится до $P_{\text{т}}$, до

нормального значения, а угол δ установится на новом значении $\delta_{уст}$ в соответствии с новым режимом.

Таким образом, для успешной ресинхронизации и результативной устойчивости синхронной машины необходимым условием является равенство скольжения нулю.

С целью повышения результирующей устойчивости при выходе электростанции на раздельную работу с энергосистемой был разработан алгоритм (рисунок 1), положенный в основу программного комплекса «КАТРАН» [3]. Данный алгоритм позволяет исследовать режим ликвидации короткого замыкания с отделением от энергосистемы в результате действия релейной защиты и автоматики с определением небаланса мощностей.

Важным параметром, определяющим результирующую устойчивость синхронной машины, является асинхронная мощность. Если во время выхода на раздельную работу синхронные машины втянулись в синхронизм друг относительно друга, то результирующая устойчивость сохраняется. При раздельной работе каждый из генераторов выдает синхронную мощность, соответствующую собственной частоте вращения. Относительно него все остальные генераторы выдают или принимают некоторую асинхронную мощность в зависимости от соотношения скоростей рассматриваемой пары генераторов и их мощностей. На данном этапе выявляется доля каждого генератора в потокораспределении выделившегося узла.

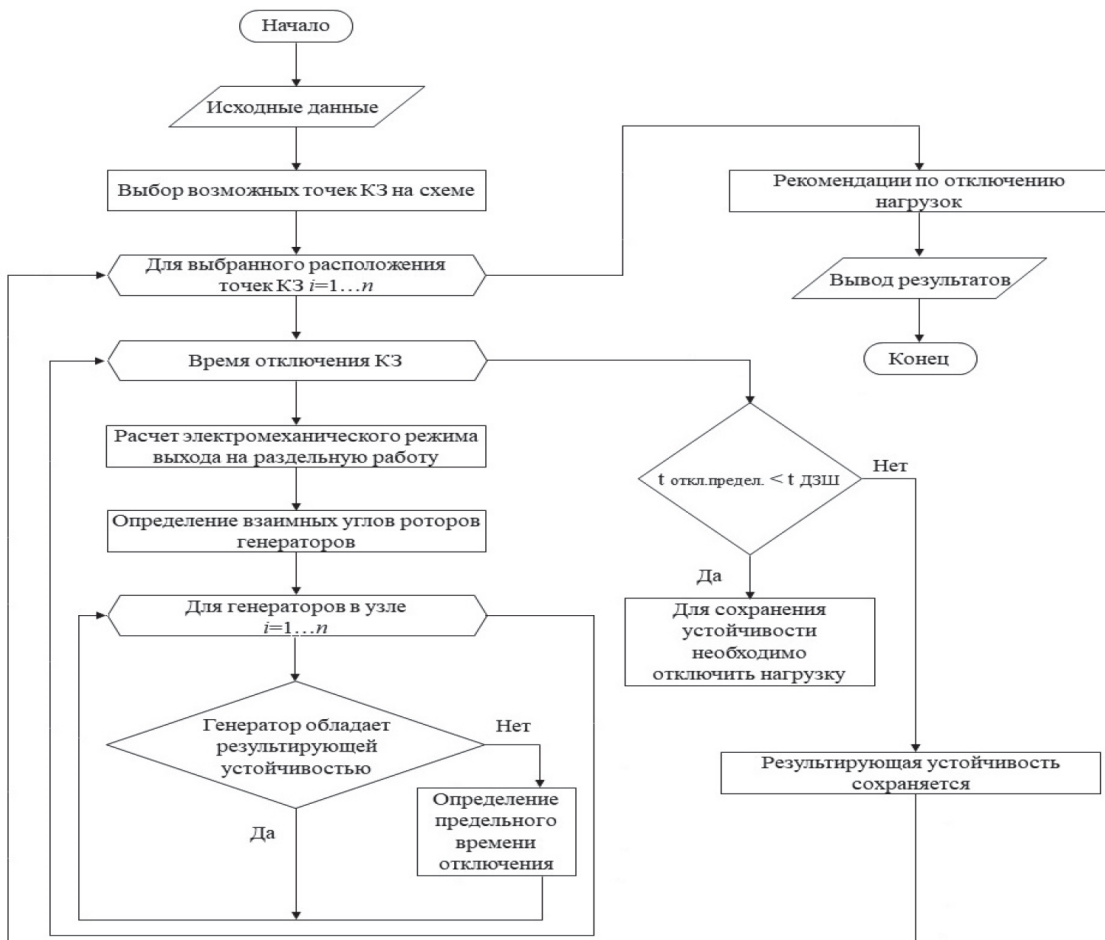


Рисунок. 1. Блок-схема расчета результирующей устойчивости с учетом небаланса мощностей

Figure. 1. Block diagram for calculating the resulting stability taking into account the unbalance of capacities

Результаты
Исследование устойчивости
генераторов в аварийных
и послеаварийных режимах
с учетом баланса мощностей
промышленного энергетического
узла

В настоящее время за счет роста нагрузки в современных энергосистемах и, как следствие, увеличения потребляемой мощности одной из задач крупных промышленных предприятий является обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей. С целью повышения надежности и качества электроснабжения предусматриваются такие мероприятия, как резервирование генерируемой мощности и пропускной способности линий электропередачи, своевременное проведение работ по ремонту, реконструкции и техническому перевооружению действующих энергообъектов.

Производство и поставка в точные сроки высококачественной продукции и максимальное удовлетворение потребностей клиентов является одной из основных задач предприятия черной металлургии.

В рамках программы по повышению надежности вырабатываемой электрической энергии на одной из электростанций промышленного энергетического узла предусмотрена реконструкция турбогенераторов ТГ-6 и ТГ-7 по 25 МВт [6–10], также планируется подключение по блочной схеме двух трансформаторов Т-6* и Т-7* мощностью 80 МВА каждый и двух турбогенераторов ТГ-6* и ТГ-7* по 50 МВт (рисунок 2).

На территории предприятия для разгрузки промышленного энергетического узла предусмотрено строительство новой электростанции (таблица 1) поставляющей электроэнергию, пар

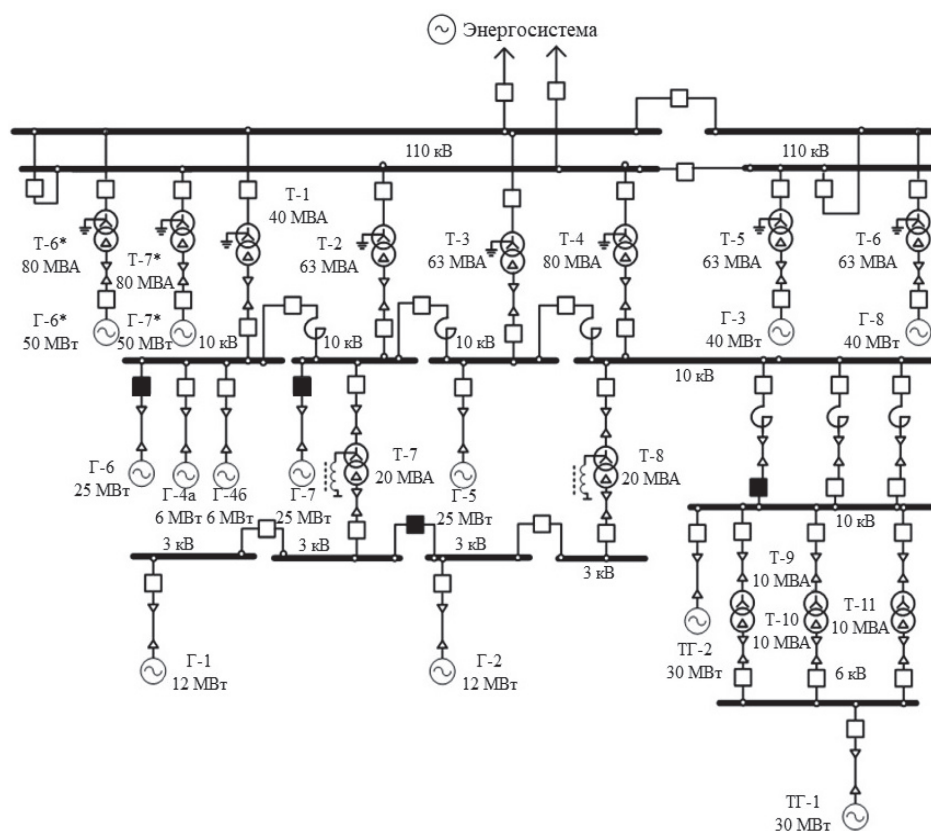


Рисунок 2. Однолинейная схема электрических соединений узла ЦЭС с учетом реконструкции

Figure 2. One-line diagram of the electrical connections of the CES node, taking into account the reconstruction

среднего давления и сжатый воздух с целью обеспечения непрерывной и соответствующей работы металлургического завода. Связь с энергосистемой рассчитывается через ЛЭП 110 кВ. Линия врезается в связь между ЦЭС и ПС 96.

Электростанция основана на 3-х парогенераторах высокого давления, предназначенных для сжигания доменного газа, поддерживаемого и природным газом, на 2-х генераторах паровых турбин каждый мощностью по 50 МВт и 3-х турбокомпрессорах, всех вспомогательных агрегатах и местных работах. Новая электростанция позволит обеспечить производство необходимого пара и сжатого воздуха для доменной печи, подачу электроэнергии и централизованного теплоснабжения.

Исследование влияния изменения генерируемой мощности в нормальном режиме системы электроснабжения

Передача электрической энергии по линиям электропередачи осуществляется электромагнитными волнами со скоростью, близкой к скорости света. Практически мгновенная скорость движения электрической энергии приводит к тому, что производство и потребление происходят одновременно.

В энергетической системе отсутствуют элементы, в которых электро-

энергия накапливается в значительных количествах. Поэтому в каждый момент времени установившегося режима электростанции должны выдавать мощность, равную мощности потребления с учетом потерь в сети. Должен быть баланс потребляемой и выдаваемой мощности.

Величина активной и реактивной мощностей потребляемой нагрузки зависит как от величины напряжения, подведенного к зажимам электроприемников, так и от частоты питающего тока. Таким образом, дефицит или избыток мощности приводит к изменению технических параметров сети.

Существующая схема промышленного энергетического узла представлена в виде кольца, разомкнутого в двух точках. Для оценки изменения технических параметров в полукольцах ПЭУ, проанализируем несколько вариантов схем с учетом ввода новой мощности.

Для всех рассматриваемых вариантов схем (рисунки 3–6) в таблице 2 приведена полная мощность с указанием направления.

По полученным данным (таблица 2) для оценки изменения мощности в результате корректировки конфигурации исходной схемы построен график (рисунок 7), отражающий несколько кривых. Кривые построены по разности значений мощности, полученных в измененной и исходной схемах.

Таблица 1. Технические параметры устанавливаемых объектов

Table 1. Technical parameters of the installed objects

Место присоединения	Объект	$S_{\text{ном}}$, МВА	$P_{\text{ном}}$, МВт	$\cos \varphi$	$U_{\text{ном}}$, кВ ($U_{\text{ВН}}/U_{\text{СН}}/U_{\text{НН}}$)
ЦЭС	Т-6*	80	–	–	115/-/10,5
	Т-7*	80	–	–	115/-/10,5
	Г-6*	62,5	50	0,8	10,5
	Г-7*	62,5	50	0,8	10,5
ПВЭС-2 (перспективная)	Т-1	63	–	–	115/38,5/11
	Т-2	63	–	–	115/38,5/11
	Г-1	62,5	50	0,8	10,5
	Г-2	62,5	50	0,8	10,5

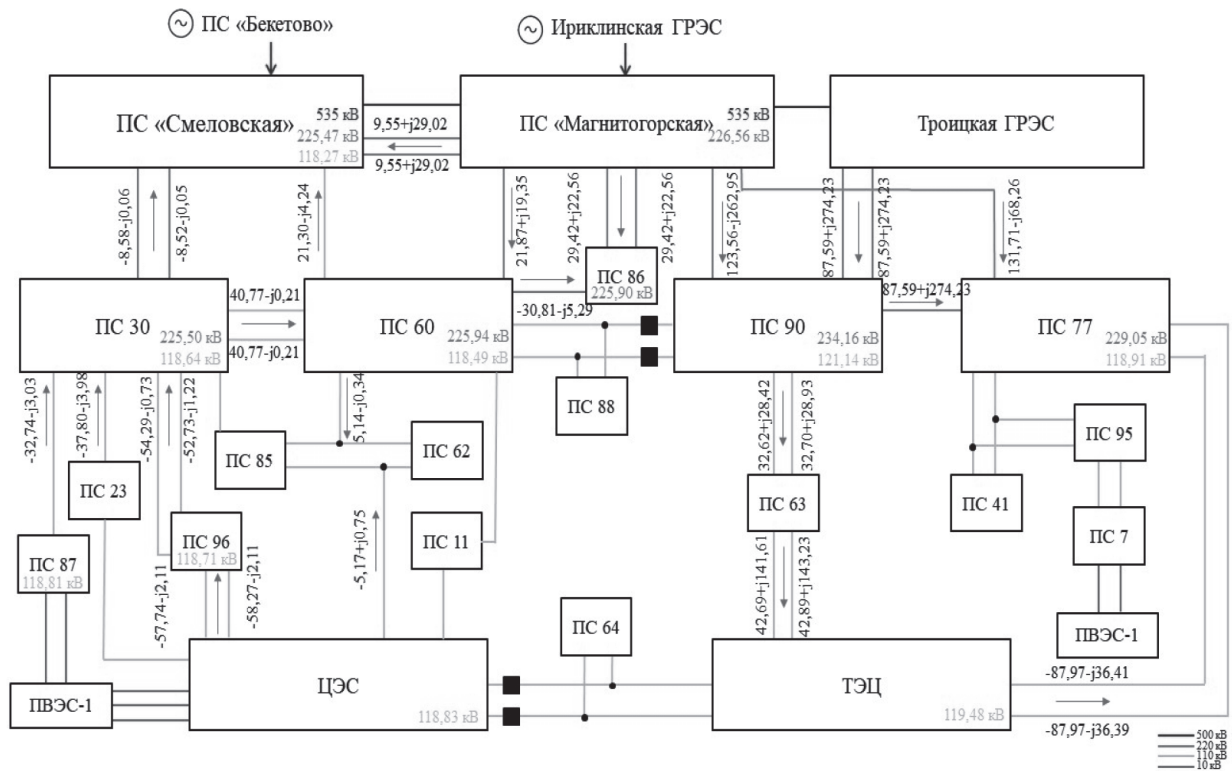


Рисунок 3. Вариант I. Переток мощностей в действующей схеме ПЭУ

Figure 3. Option I. Capacity overflow in the current scheme of industrial power unit

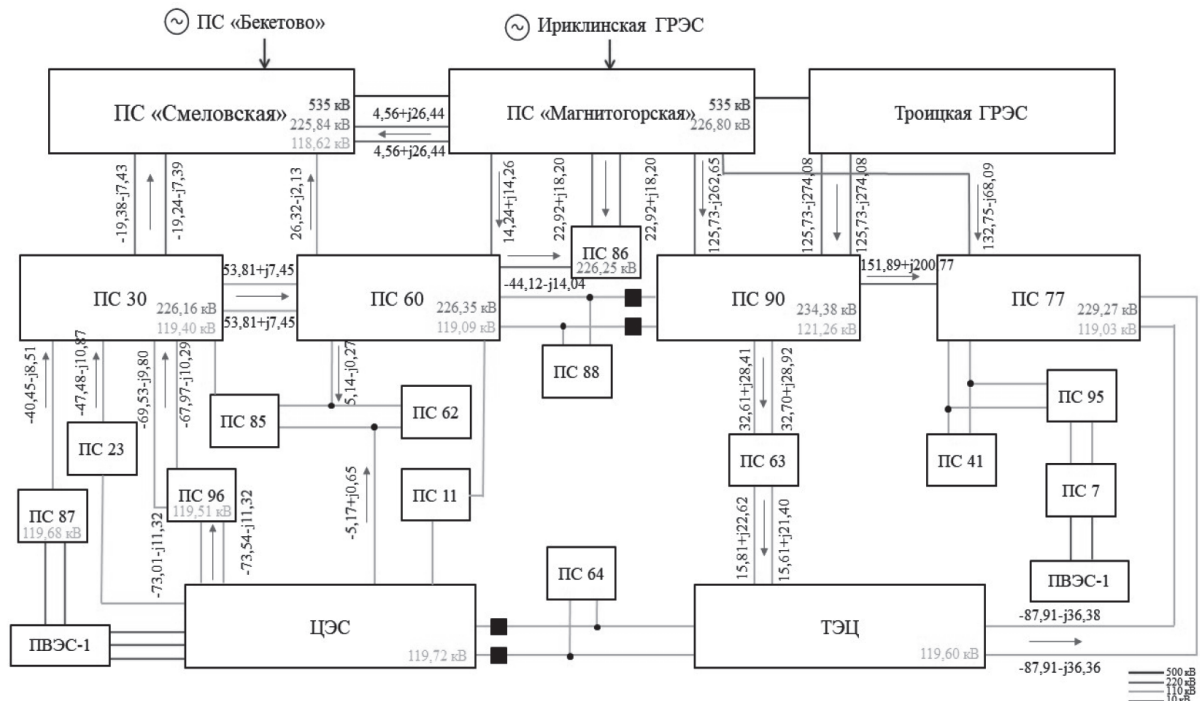


Рисунок 4. Вариант II. Переток мощностей в схеме, предусмотренной реконструкцию турбогенераторов на ЦЭС

Figure 4. Option II. The flow of capacity in the scheme provided for the reconstruction of turbine generators at the CES

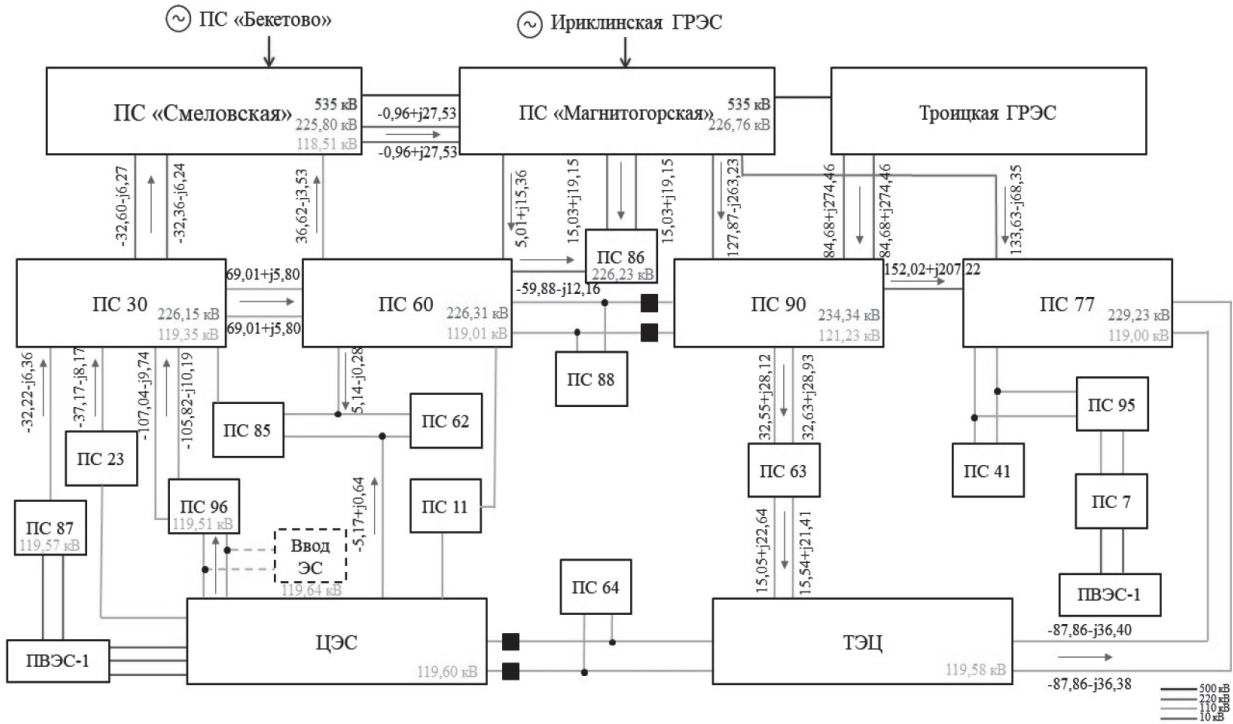


Рисунок 5. Вариант III. Переток мощностей в схеме, предусмотренной вводом новой электростанции

Figure 5. Option III. Capacity overflow in the scheme envisaged for the commissioning of a new power plant

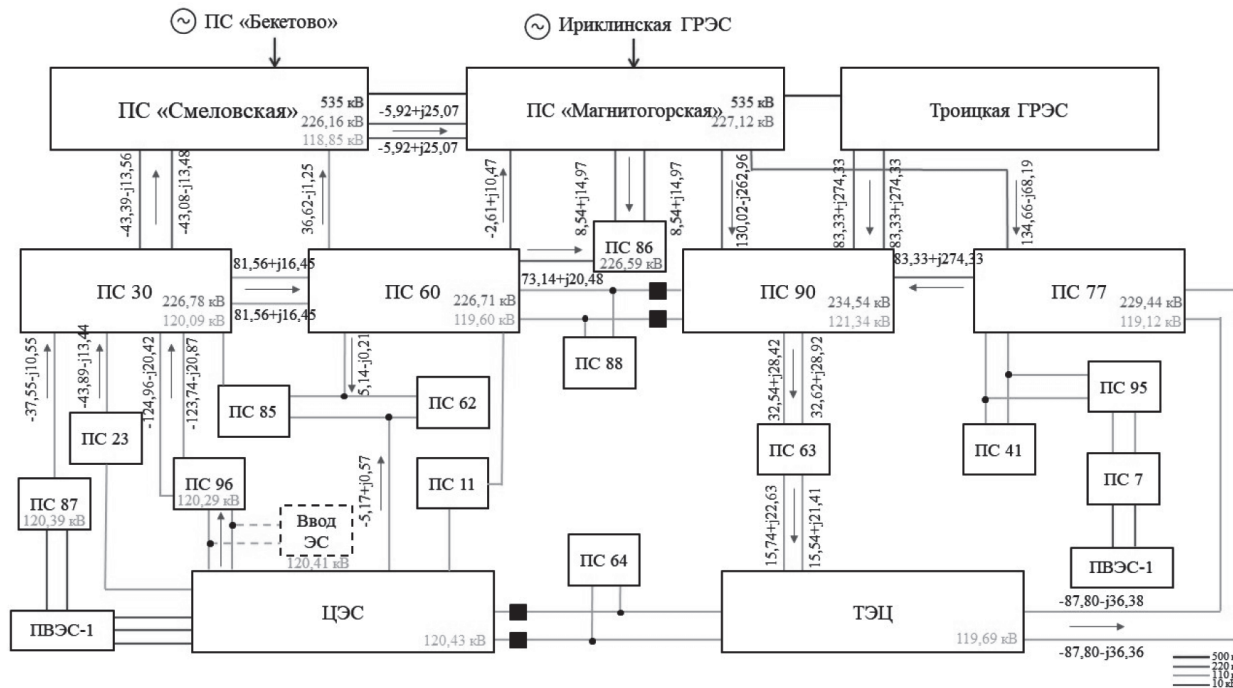


Рисунок 6. Вариант IV. Переток мощностей в схеме, предусмотренной реконструкцию турбогенераторов на ЦЭС и вводом новой электростанции

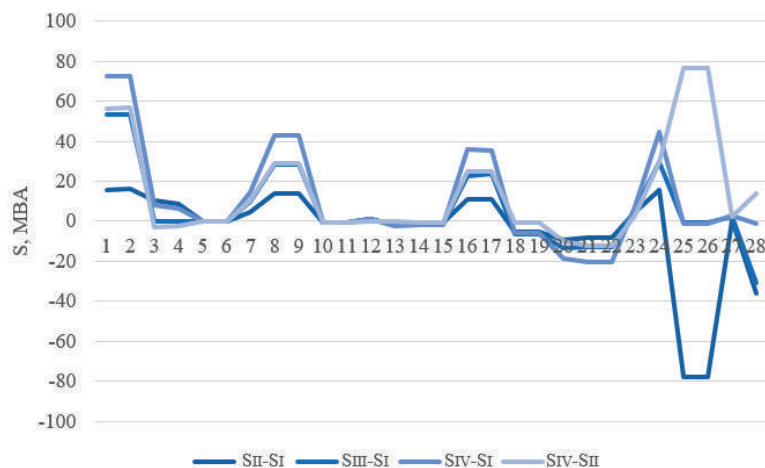
Figure 6. Option IV. The flow of capacity in the scheme provided for the reconstruction of turbine generators at the CES and the commissioning of a new power plant

Таблица 2. Варианты конфигурации схем промышленного энергетического узла**Table 2.** Configuration options for industrial power unit circuits

Вариант I	Вариант II	Вариант III	Вариант IV
Действующая схема ПЭУ	Реконструкция турбогенераторов на ЦЭС. Отключение двух генераторов по 25 МВт, и подключение по блочной схеме по 50 МВт взамен существующих	Перспективное подключение электростанции с ТГ-1 и ТГ-2 по 50 МВт	Подключение турбогенераторов по 50 МВт взамен существующих по 25 МВт на ЦЭС. Также перспективное подключение электростанции
Рисунок 3	Рисунок 4	Рисунок 5	Рисунок 6

Из представленного графика (рисунок 7) видно, что характер изменения кривых для анализируемых случаев подобен относительно друг друга. Максимумом отмечены точки, в которых было зафиксировано наибольшее изменение мощности в результате замены турбоагрегатов на ЦЭС ТГ-6 и ТГ-7 на более мощные или ввод новой дополнительной генерируемой мощности. Эти точки соответствуют связи между ПС 96 и ПС 30, ПС 30 и ПС 60, ПС 30 и ПС Смеловская.

Стоит также отметить минимум в точках, соответствующих связи на напряжении 220 кВ между ПС Магнитогорская и ПС 86. В третьем варианте конфигурации схемы (рисунок 5) наблюдается снижение перетока мощности на 36 % относительно исходной схемы. Выше всех расположена кривая, учитывающая замену турбогенераторов на ЦЭС и ввод новой электростанции, среднее значение изменения перетоков мощностей в энергетическом узле равно 14,50 %. При принятии за исходную схему вариант II



- S_I — полная мощность для конфигурации схемы вариант I (рисунок 3);
 S_{II} — полная мощность для схемы вариант II (рисунок 4);
 S_{III} — полная мощность для схемы вариант III (рисунок 5);
 S_{IV} — полная мощность для схемы вариант IV (рисунок 6)

Рисунок 7. Кривые, характеризующие изменение полной мощности относительно исходной схемы и варианта IV**Figure 7.** Curves characterizing the change in total power relative to the original scheme and option IV

(рисунок 4) в результате были получены кривые SIV-SII и SIII-SI. Это объясняется тем, что суммарная генерируемая мощность для двух случаев равна.

Баланс активной мощности характеризуется соотношением вырабатываемой и потребляемой мощностей в этот же момент времени. Дефицит активной мощности определяется увеличением потребляемой или снижением генерируемой активной мощности, что приводит к снижению частоты. Избыток активной мощности, характеризующийся дополнительным впуском энергоносителя в турбине генераторов, приводит к увели-

чению частоты, что вызовет увеличение потребляемой мощности. В результате изменения частоты в системе электроснабжения устанавливается новый режим с новым значением частоты по сравнению с предыдущим.

Для наглядной оценки изменения напряжения в узлах промышленного энергетического узла в зависимости от конфигурации сети были построены лепестковые диаграммы (рисунок 8) для $U_{ном} = 110$ кВ и $U_{ном} = 220$ кВ.

В результате изменения генерируемой мощности в системе значение уровня напряжения на сборных шинах 110 кВ

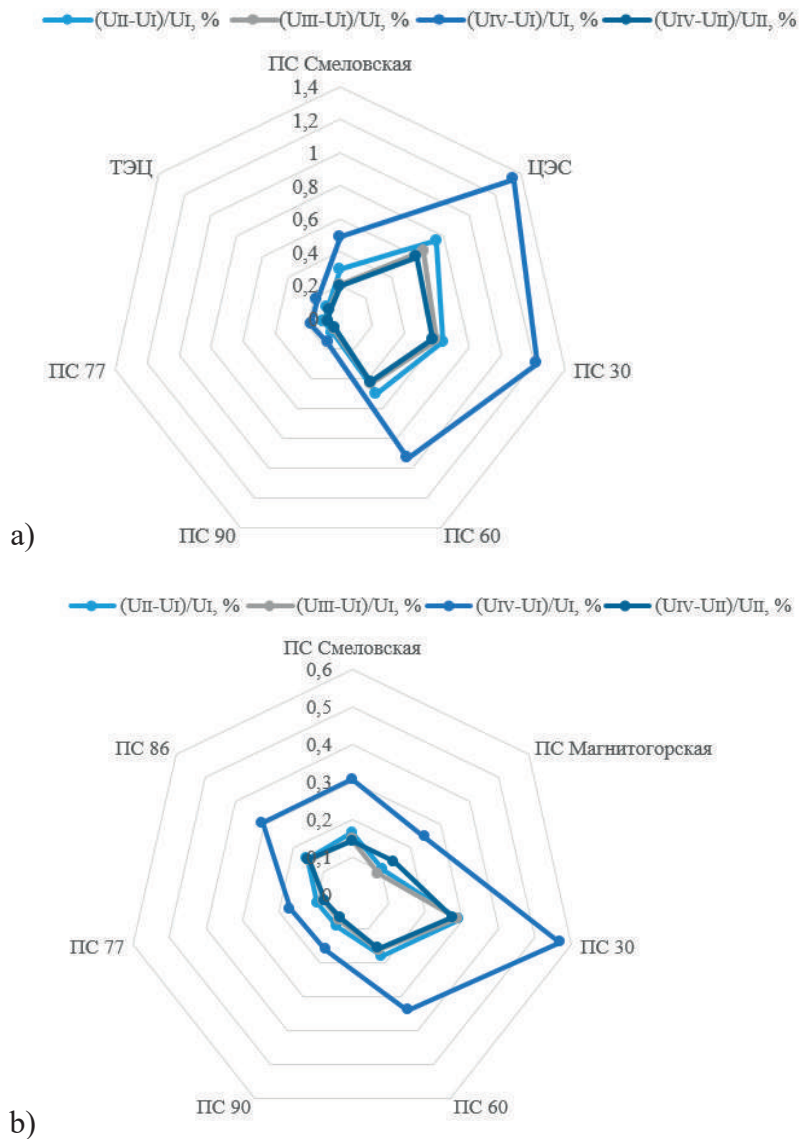


Рисунок 8. Изменение $U_{ном}$ на сборных шинах 110 кВ (а) и 220 кВ (б) в результате преобразования конфигурации сети, %

Figure 8. The change of the $U_{ном}$ on the 110 kV (a) and 220 kV (b) busbars as a result of the conversion of the network configuration, %

больше всего выросли в узлах ЦЭС, ПС 30 и ПС 60 во всех рассматриваемых случаях. Наименьшие изменения зафиксированы в узле ТЭЦ. В результате присоединения новой электростанции и замены турбоагрегатов на ЦЭС кривая выросла в среднем на 0,65 % относительно исходной схемы промышленного энергетического узла. Причем максимум, зафиксированный в узлах ЦЭС и ПС 30, превышает 1 % и равен 1,34 % и 1,22 % соответственно. Также стоит отметить, что оставшиеся кривые рассмотренных случаев близко расположены относительно друг друга, и среднее значение изменений уровня напряжения относительно исходной схемы составляет 0,31 %. Однако выше расположена кривая соответствующая схеме, где предусмотрена реконструкция генераторов на ЦЭС (рисунок 2), а ниже всех — кривая, где за исходный режим принят вариант II, т.е. генерируемая мощность на сборных шинах ЦЭС увеличена на 50 МВт в результате замены двух турбоагрегатов.

В результате изменения генерируемой мощности в системе значение уровня напряжения на сборных шинах 220 кВ больше всего выросло в узлах ПС 30 и ПС 60, меньше — ПС 90, ПС 77. Кривые в зависимости от рассматриваемых случаях расположены аналогично, как и для сборных шин 110 кВ. Наибольшее среднее значение составляет 0,30, наименьшее — 0,14.

Исходя из вышеперечисленного, ввод дополнительной генерируемой мощности на сборных шинах ЦЭС в результате реконструкции, а также строительство новой электростанции, связанной с энергосистемой через ЛЭП 110 кВ между ЦЭС и ПС 96, оказывает влияние на изменение техническим параметров в большей степени на полукольцо ЦЭС — ПС 30 — ПС 60 в нормальном режиме.

Выводы

В результате выполненного исследования роста генерируемой мощности из-за реконструкции существующих турбоагрегатов и их замена на более мощные, а также строительства новой электростанции проведена оценка изменения технических параметров сети с учетом баланса мощностей, проанализированы переходные процессы с учетом коэффициента загрузки. Оценена взаимосвязь надежности объектов энергосистемы и ее устойчивости. Результаты исследования позволили выявить синхронные машины, устойчивость которых в результате исследования снизилась. При исследовании определены участки энергосистемы, где наибольшая вероятность нарушения электроснабжения потребителей. С целью увеличения эффективности управления аварийными режимами был разработан алгоритм, положенный в основу программного комплекса «КАТРАН». Алгоритм позволяет выполнить оценку изменения параметров в режимах работы энергосистемы с учетом подключения новых турбогенераторов, а также определить участки с нарушением результирующей устойчивости синхронных машин и возникшим небалансом мощности, выделившиеся в результате короткого замыкания или иного повреждения. Результаты исследования позволят дать рекомендации по подключению нагрузок в сети или их отключению в аварийном режиме, которые позволят повысить результирующую устойчивость.

Для оценки влияния изменения генерируемой мощности в нормальном режиме СЭС были рассмотрены несколько схем промышленного энергетического узла: модернизация синхронных машин на ЦЭС, строительство новой электростанции, сочетание вышеперечисленных мероприятий. Была проведена оценка перетока мощностей, уро-

вень напряжения в узлах, токовая нагрузка. В результате исследования было выявлено, что при строительстве новой электростанции или ввода генераторов на ЦЭС взамен существующих значительное изменение величины перетока мощностей наблюдается в полукольце ЦЭС — ПС 30 — ПС 60. Наибольший рост значений наблюдается в точках ПС 96 — ПС 30, ПС 30 — ПС 60, ПС 30 — ПС Смеловская.

В результате изменения генерируемой мощности в системе значение уровня напряжения на сборных шинах 110 кВ наблюдается возрастание в узлах ЦЭС,

Список источников

1. Кондрашова Ю.Н., Газизова О.В., Иванов Е.Ф. Повышение устойчивости заводских электростанций при отделении от энергосистемы в результате внезапного короткого замыкания, сопровождающегося небалансом мощностей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65, № 3. С. 97–106. doi: 10.17213/0136-3360-2022-3-97-106. EDN: EYNEBS.
2. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical Simulation of the Operating Emergency Conditions for the Purpose of Energy Efficiency Increase of Thermal Power Plants Management // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, 01–04 December 2015. Tomsk, 2016. Vol. 124. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012056.
3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Комплекс автоматизированного режимного анализа Катран 6.0 / Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А., Хламова А.В., Тарасов В.М., Ягольников Е.Б., Николаев Н.А., Зиновьев В.В. 2012. EDN: VWKKWJ.
4. Заславец Б.И., Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2008. № 11 (111). С. 3–8. EDN: IUJOPX.

ПС 30 и ПС 60 во всех рассматриваемых случаях. Наименьшие изменения зафиксированы в узле ТЭЦ. В результате изменения генерируемой мощности в системе значения уровня напряжения на сборных шинах 220 кВ больше всего выросли в узлах ПС 30 и ПС 60, меньше всего — ПС 90, ПС 77.

Полученные рекомендации позволяют повысить функционирование системы электроснабжения промышленного предприятия с целью повышения объема производства и обеспечат энергоэффективность использования вторичных ресурсов.

5. Md. Mhamud Hussen Sifat, Safwat Mukarama Choudhury, Sajal K. Das. Towards Electric Digital Twin Grid: Technology and Framework Review // Energy and AI. November 2022. Vol. 11 (3). 10.1016/j.egyai.2022.100213.
6. Xinhui Zhong. Construction of Power IoT Platform under Digital Transformation // Energy Reports. August 2022. Vol. 8. P. 718-727.
7. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. URL: www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf. — Загл. с экрана.
8. РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания для расчета токов короткого замыкания и выбора электрооборудования» / Под ред. Б.Н. Неклепаева. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 152 с.
9. Габдушев Д.М., Буслов В.В., Гусев С.В. и др. О целесообразности применения распределенной генерации для решения проблемы недостаточной пропускной способности электрической сети // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: матер. 94-го заседания Междунар. науч. семинара, Алушта, 19–23 сентября 2022 года / Отв. редактор В.А. Стенников. Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелен-тьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. Выпуск 73. С. 183–192. EDN YNQJYC.
10. Годовой отчет ПАО «ММК» за 2019 год [Электронный ресурс]. URL: https://rspp.ru/upload/uf/a87/ммк_ГО_интернет_рус_mini.pdf. — Загл. с экрана.

References

1. Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Ivanov E.F. Povyshenie ustoichivosti zavodskikh elektrostantsii pri otdelenii ot energosistemy v rezul'tate vnezapnogo korotkogo zamykaniya, soprovozhdayushchegosya nebalansom moshchnosti [Increasing the Stability of Industrial Power Plants When Separated from the Energy System as a Result of a Sudden Short Circuit, Accompanied by a Capacity Unbalance]. *Izvestiya vysshikh ucheb-nykh zavedenii. Elektromekhanika — News of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2022, Vol. 65, No. 3, pp. 97–106. doi: 10.17213/0136-3360-2022-3-97-106. EDN: EYHEBS. [in Russian].
2. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical Simulation of the Operating Emergency Conditions for the Purpose of Energy Efficiency Increase of Thermal Power Plants Management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, 01–04 December 2015*. Tomsk, 2016. Vol. 124. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012056. [in Russian].
3. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A., Khlamova A.V., Tarasov V.M., Yagol'nikova E.B., Nikolaev N.A., Zinov'ev V.V. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza Katran 6.0* [Complex of Automated Regime Analysis Katran 6.0]. Certificate of Registration of the Computer Program, 2012. EDN: VWKKWJ. [in Russian].
4. Zaslavets B.I., Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Predstavlenie mashin peremennogo toka v raschetakh dinamicheskoi ustoichivosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii s sobstvennymi elektrostantsiyami [Representation of Alternating Current Machines in Calculations of the Dynamic Stability of Power Supply Systems of Industrial Enterprises with Their Own Power Plants]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika — Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2008, No. 11 (111), pp. 3–8. EDN: IUJOPX. [in Russian].
5. Md. Mhamud Hussen Sifat, Safwat Mukar-rama Choudhury, Sajal K. Das. Towards Electric Digital Twin Grid: Technology and Framework Review. *Energy and AI*. November 2022, Vol. 11 (3). 10.1016/j.egyai.2022.100213.
6. Xinhui Zhong. Construction of Power IoT Platform under Digital Transformation. *Energy Reports*, August 2022, Vol. 8, pp. 718–727.
7. *Osnovnye polozheniya kontseptsii intellektual'noi energosistemy s aktivno-adaptivnoi set'yu* [Basic Provisions of the Concept of an Intelligent Energy System with an Active-Adaptive Network] [Electronic Resource]. URL: www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf. [in Russian].
8. RD 153-34.0-20.527-98 «Rukovodyashchie ukazaniya dlya rascheta tokov korotkogo zamykaniya i vybora elektrooborudovaniya» [RD 153-34.0-20.527-98 «Guidelines for Calculating Short-Circuit Currents and Selecting Electrical Equipment»]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2002. 152 p. [in Russian].
9. Gabdushev D.M., Buslov V.V., Gusev S.V. e.a. O tselesoobraznosti primeneniya raspredelennoi generatsii dlya resheniya problemy nedostatochnoi propusknoi sposobnosti elektricheskoi seti [On the Feasibility of Using Distributed Generation to Solve the Problem of Insufficient Capacity of the Electrical Network]. *Materialy 94-go zasedaniya Mezhduna-rodnogo nauchnogo seminara «Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki», Alushta, 19–23 sentyabrya 2022 goda* [Proceedings of the 94th Meeting of the International Scientific Seminar «Methodological Issues in Studying the Reliability of Large Energy Systems», Alushta, September 19–23, 2022]. Irkutsk, Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie nauki Institut sistem energetiki im. L.A. Melent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2022, Issue 73, pp. 183–192. EDN YNQJYC. [in Russian].
10. *Godovoi otchet PAO «MMK» za 2019 god* [Annual Report of PJSC MMK for 2019] [Electronic Resource]. URL: https://rspp.ru/upload/uf/a87/mmk_GO_internet_rus_mini.pdf. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 03.10.2023; одобрена после рецензирования 10.10.2023; принята к публикации 12.10.2023.

The article was submitted 03.10.2023; approved after reviewing 10.10.2023; accepted for publication 12.10.2023.

Научная статья

УДК 621.313

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-89-100

ПРОГНОЗНЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПУТЕМ АНАЛИЗА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛА ВИБРАЦИИ ПОДШИПНИКОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Вячеслав Игоревич Королев**Vyacheslav I. Korolev**аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, НИУ «Московский энергетический институт», Москва, Россия*

Актуальность

В промышленности любые сбои и незапланированные простои машин или систем могут ухудшить или прервать основную деятельность компании, что потенциально может привести к значительным штрафам и невозможной потере репутации. Существующие традиционные подходы к обслуживанию (обслуживание по отказу или регламенту) страдают от некоторых допущений и ограничений, таких как высокие затраты на предотвращение или ремонт, неадекватные или неточные математические процессы деградации. В связи с тенденцией интеллектуального производства, интеллектуального анализа данных, искусственного интеллекта предиктивный технический контроль предлагается в качестве нового типа парадигмы обслуживания только после того, как аналитические модели предсказывают определенные сбои или деградации. Контроль состояния оборудования позволяет уменьшить вероятность появления отказов. Успешное решение задач технической диагностики и мониторинга сложных электромеханических подсистем и узлов обеспечивает увеличение срока службы, ресурса и надежности систем в целом.

Цель исследования

Общий обзор целей и задач технического обслуживания, которые в основном включают выявление и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях повышения надежности машины и полного использования ее ресурса, минимизацию затрат, максимизацию доступности/надежности и многокритериальную оптимизацию.

Объект исследования

Объектом исследования является техническое состояние подшипников качения вращающихся электрических машин. Происходит анализ основных дефектов, которые характерны для данного объекта. Кроме того, предлагается практичный и эффективный после-

Ключевые слова

электрические вращающиеся машины, прогнозный мониторинг, предиктивное обслуживание, подшипниковый узел, моделирование, машинное обучение

довательный метод профилактического обслуживания вращающихся электрических машин, состоящий из четырех этапов: генерация признаков и выбор диагностики неисправностей, уменьшение размерности данных и объединение признаков, обнаружение и диагностика неисправностей, а также оценка оставшегося срока полезного использования подшипников вращающихся электрических машин с помощью анализа сигнала вибраций (по форме сигнала во временной области и спектру исходного или производного сигнала можно рассчитать характеристики и оценить их эффективность для диагностики неисправности).

Методы исследования

Для проверки работоспособности предлагаемого метода производится моделирование отказа подшипника в модуле Simulink MATLAB. Отказ подшипника создается путем подачи возмущения колебаний в систему вала.

Результаты

На основании результатов моделирования строится заключение о работоспособности предлагаемого метода исследования технического состояния вращающихся электрических машин.

Для цитирования: Королев В. И. Прогнозный мониторинг технического состояния путем анализа составляющих сигнала вибрации подшипников вращающихся электрических машин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 89-100. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-89-100>.

Original article

PREDICTIVE MONITORING OF TECHNICAL CONDITION BY ANALYZING THE VIBRATION SIGNAL COMPONENTS OF ROTATING ELECTRIC MACHINE BEARINGS

Relevance

In industry, any failures and unplanned downtime of machines or systems can degrade or interrupt a company's core business, potentially leading to significant penalties and irreparable loss of reputation. Existing traditional maintenance approaches (failure or routine maintenance) suffer from some assumptions and limitations, such as high prevention or repair costs and inadequate or inaccurate mathematical degradation processes. Due to the trend of intelligent manufacturing, data mining, and artificial intelligence, predictive maintenance control is proposed as a new type of maintenance paradigm only after analytical models predict certain failures or degradations. Equipment condition monitoring can reduce the likelihood of failures occurring. Successful technical diagnostics and monitoring of complex electromechanical subsystems and assemblies provides an increase in service life and reliability of the systems as a whole.

Aim of research

A general overview of maintenance aims and objectives, which mainly include detection and prevention of failures and malfunctions, maintaining performance within established limits, condition prediction in order to improve machine reliability and full use of its resource, cost minimization, maximization of availability/reliability and multi-criteria optimization.

Object of research

The object of the study is the technical condition of rolling bearings of rotating electric machines. The main defects that are characteristic of this object are analyzed. In addition, a practical and effective sequential

Keywords

electrical rotating machines, predictive monitoring, predictive maintenance, bearing unit, modeling, machine learning

preventive maintenance method for rotating electrical machines is proposed, consisting of four steps: feature generation and fault diagnosis selection, data dimensionality reduction and feature fusion, fault detection and diagnosis, and estimation of the remaining useful life of rotating electrical machine bearings. Vibration signal analysis (from the time domain waveform and spectrum of the original or derivative signal, characteristics can be calculated and their effectiveness in diagnosing a fault can be assessed).

Research methods

To verify the performance of the proposed method, bearing failure is simulated in the Simulink MATLAB module. The bearing failure is created by feeding the vibration perturbation into the shaft system.

Results

Based on the results of the simulation, a conclusion on the operability of the proposed method for investigating the technical condition of rotating electric machines is drawn.

For citation: Korolev V. I. Prognoznyi monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya putem analiza sostavlyayushchikh signala vibratsii podshipnikov vrashchayushchikhsya elektricheskikh mashin [Predictive Monitoring of Technical Condition by Analyzing the Vibration Signal Components of Rotating Electric Machine Bearings]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 89-100. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-89-100>.

Введение

Электрические машины применяются во всех отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту. Почти вся электрическая энергия вырабатывается электрическими генераторами, а две трети ее преобразуется электрическими двигателями в механическую энергию. От правильного выбора и использования электрических машин во многом зависит технический уровень изделий многих отраслей промышленности. И, конечно же, от специалистов в области электромеханики требуются глубокие знания обслуживания и ремонта электрических машин, а также их правильной эксплуатации.

В процессе эксплуатации электромеханических агрегатов их технические характеристики могут меняться, что может приводить к отказам техники.

Контроль состояния оборудования позволяет уменьшить вероятность появления отказов. Успешное решение задач технической диагностики и мониторинга сложных электромеханических подси-

стем и узлов обеспечивает увеличение срока службы, ресурса и надежности систем в целом.

Известны фундаментальные работы [1–6], посвященные базовым вопросам проектирования систем диагностики. Их анализ показал, что большинство современных методов диагностики технического состояния электрических машин и оборудования базируется на обработке и анализе вибрационных параметров. Эти методы являются основой функциональной (рабочей) диагностики. Комплекс параметров вибрации практически полностью характеризует техническое состояние работающего агрегата и позволяет прогнозировать возникновение неисправностей и аварий электромеханического оборудования. Проблема вибродатчиков состоит в том, что их нужно устанавливать в труднодоступные части электрической машины.

Назначение диагностики — выявление и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание эксплуатационных показателей в установленных

пределах, прогнозирование состояния в целях повышения надежности машины и полного использования ее ресурса.

Конечная цель диагностирования — обнаружение и устранение дефекта, идентификация причин данного дефекта, выработка рекомендаций по коррекции текущего состояния. По статистике [2, 3, 7], основными и самыми распространенными дефектами электрических машин являются:

- межвитковые замыкания;
- изменение зазора между статором и ротором;
- биение ротора;
- повреждение/перегрев/обрыв обмоток;
- повреждение подшипников;
- неисправность управляющих блоков.

Данные дефекты приводят к параметрическому и функциональному отказам агрегатов, уменьшают срок службы.

В настоящее время для диагностики неисправностей и прогнозирования сроков отказов электромеханических агрегатов разработано множество методов, основанных на обработке информации с измерительных преобразователей, в качестве которых используют акустические и вибрационные датчики, датчики токов и напряжений, датчики температуры и электромагнитные преобразователи, с использованием методов машинного обучения. Совокупность этих методов получила название предиктивное техническое обслуживание, которое включает в себя сбор данных для проведения анализа, и позволяет производить ремонт тогда, когда в нем возникает необходимость. Благодаря этому можно, с одной стороны, не тратить средства и время на плановое обслуживание оборудования, которое и без ремонта способно нормально проработать еще несколько месяцев, с другой, — снижается вероят-

ность внепланового простоя, вызванного неожиданной поломкой.

В системах диагностики первичная информация, содержащая достаточно большое количество паразитной информации, с датчиков предварительно обрабатывается, после чего выполняются распознавание, очищение и восстановление данных, классификация дефектов привода в реальном времени. Как правило, при этом реализуется комплексная диагностика неисправностей по двум направлениям: выявление механических и электромагнитных дефектов агрегата.

В данной статье предлагается практичный и эффективный последовательный метод профилактического обслуживания вращающихся электрических машин, состоящий из четырех этапов: генерация признаков и выбор диагностики неисправностей, уменьшение размерности данных и объединение признаков, обнаружение и диагностика неисправностей, а также оценка оставшегося срока полезного использования. Этот метод будет подробно описан ниже, что будет подтверждено данными об износе ресурса подшипников, сгенерированной моделью, построенной в модуле Simulink MATLAB.

Описание предмета исследования

Подшипники являются механическими компонентами, используемыми во вращающихся электрических машинах, и они представляют собой один из основных источников неисправностей в таком оборудовании; неисправности подшипников могут составлять 44 % от общего числа неисправностей в некоторых устройствах [8]. Подшипник качения состоит из четырех основных компонентов: шарик, также называемый роликом или элементом качения, внутреннее кольцо, внешнее кольцо и сепаратор, который обеспечивает одинаковое расстояние между шариками для предотвра-

щения внутренних ударов. На этих компонентах могут появиться повреждения или неисправности, как показано на рисунке 1, или даже проявляться как генерализованное повреждение всего устройства. Существуют также другие стандартизированные формы роликовых элементов, такие как цилиндрические ролики, конические ролики, игольчатые и бочкообразные ролики, но они не входят в рамки настоящего исследования. Отдельные документы в этом обзоре касаются оценки серьезности неисправности, в основном, для внутреннего кольца, внешнего кольца и шара.

В основном дефекты подшипника классифицируются как одиночный дефект, множественный дефект и общая шероховатость, также называемая «распределенными дефектами». Точечный дефект определяется как единичный локализованный дефект на относительно неповрежденной опорной поверхности. Отдельный точечный дефект вызывает определенные характерные частоты неисправностей, которые проявляются в сигналах вибрации, тока, звука или акустической эмиссии. Эти частоты предсказуемы и зависят от поверхности подшипника, содержащей место неисправности, т.е. внутренней обоймы, внешней обоймы, шарика и сепаратора [9]; следо-

вательно, существует одна характеристическая частота отказа, связанная с каждым из четырех компонентов подшипника. Подробный анализ дефекта одиночного внутреннего кольца приведен в [10]. Примерами точечных дефектов являются трещины, ямки или отверстия, а также сколы. Трещины и отверстия на внутренней и внешней обоймах возникают, если подшипники используются в течение длительного времени. Эти неисправности являются серьезными, и во многих исследовательских работах обсуждался одноточечный дефект. Как утверждается в [11], трещины на внутренних и наружных кольцах являются наиболее частыми неисправностями, на долю которых приходится 90 % всех неисправностей подшипников качения, а трещины в обоймах шариков составляют 10 %. Выкрашивание или точечная коррозия являются основным проявлением развития неисправности в подшипнике на более ранних стадиях [12].

Несмотря на название, подшипник может иметь множественные точечные дефекты, состоящие из нескольких, возможно, перекрывающихся точечных дефектов. В таком случае спектры вибрационного сигнала отличаются от тех, которые ожидаются от одиночного точечного дефекта. Например, спектральные

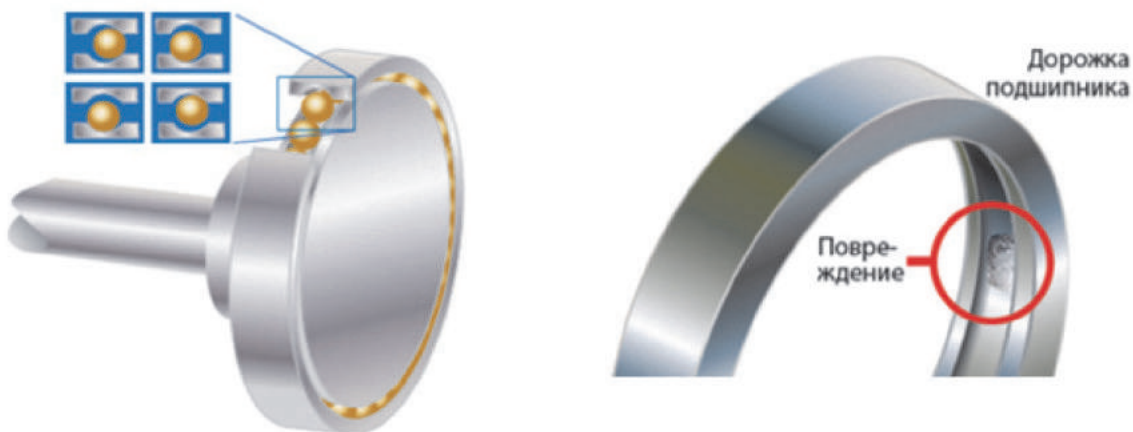


Рисунок 1. Неисправности в подшипниках

Figure 1. Faults in bearings

линии могут появляться на тех же частотах, что и ожидаемые для одиночных точечных дефектов, но относительные амплитуды компонентов могут значительно измениться, и, возможно, их гармоники не обязательно являются самыми большими компонентами. Подробное описание этого типа неисправностей дано в [13].

Описание признаков и выбор метода диагностики неисправностей

По форме сигнала во временной области и спектру исходного или производного сигнала можно рассчитать характеристики и оценить их эффективность для диагностики неисправности.

Как правило, для количественной оценки ценности признаков в прогнозировании используются характеристики монотонности и тенденции [7]. В частности, формула монотонности характеристики x имеет вид:

$$M(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|positive\ diff(x_i^j) - negative\ diff(x_i^j)|}{n-1}, \quad (1)$$

где n — количество измеряемых точек;

m — количество машин, за которыми ведется наблюдение;

x_i^j — i -ая характеристика j -ой машины;

$diff(x_i^j)$ — отклонение характеристики x_i^j , $diff(x_i^j) = x_i^j(t) - x_i^j(t-1)$.

Формула расчета тенденции характеристики x выглядит следующим образом:

$$T(x_i) = \min(|corr(x_i, x_k)|) \quad k = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где N — число функций.

Уменьшение размерности данных и объединение функций

При характеристике развития неисправности оборудования с помощью признаков, извлеченных из сигналов, будет обнаружено, что размерность большинства собственных векторов неис-

правности достигает сотен или даже тысяч. В практическом применении часто используется несколько датчиков для одновременного мониторинга одного оборудования. Алгоритм должен уметь правильно и эффективно обрабатывать эту информацию, что значительно поможет сократить объем вычислений и повысить эффективность алгоритма. В процессе уменьшения размерности обычно удаляются некоторые данные, в том числе избыточные данные, неверная информация, содержащее повторяющиеся выражений и т.д. Поэтому большинство классических методов уменьшения размерности основаны на этом содержании, а методы уменьшения размерности делятся на линейное уменьшение размерности и нелинейное уменьшение размерности, а нелинейные методы уменьшения размерности можно разделить на методы, основанные на функции ядра, и методы, основанные на собственных значениях. Как правило, нелинейные методы уменьшения размерности, такие как стохастического вложения соседних и ISOMAP [14, 15], подходят для различных сигналов датчиков, особенно для различных типов сигналов датчиков. А средства уменьшения линейной размерности, такие как метод главных компонент [16], могут дать приемлемый результат для объединения различных признаков, извлеченных из одного и того же сигнала датчика.

Обнаружение и диагностика неисправностей

Содержание этой части в основном включает в себя различие состояния неисправности оборудования и нормального состояния (обнаружение неисправности) или определение источника неисправности (диагностика неисправности), когда оборудование имеет неисправность. Алгоритм обнаружения и диагностики неисправностей может обучать

модель принятия решений, используя индикаторы состояния, извлеченные из данных. Модель может анализировать показатели, извлеченные из измеренных данных, для определения текущего состояния системы.

Стоит отметить, что одного признака обычно недостаточно для получения хорошего классификатора обобщения. Используя методы обработки сигналов и модели машинного обучения, данные можно разделить на несколько сегментов (чтобы создать больше последовательностей данных), можно извлекать и выбирать различные функции, связанные с диагностикой, в соответствии с уровнем важности функций, а функции можно объединять и уменьшать в размерах, когда это необходимо. Таким образом, мы можем получить более сложный и продвинутый классификатор [17].

Прогноз оставшегося срока полезного использования

Оставшийся срок полезного использования механического оборудования относится к ожидаемому сроку службы или оставшемуся сроку службы до того, как потребуется ремонт машины или замена компонентов. Для оценки и прогнозирования остаточного срока полез-

ного использования обычно требуется индикатор состояния. Его изменение во времени (тренд, монотонность и предсказуемость) наблюдаемо и связано с процессом деградации оборудования надежным и измеримым образом.

Моделирование и анализ

В данной статье рассматривается моделирование работы вала, чтобы получить данные об эволюции неисправности подшипникового узла. Предлагаемый метод профилактического обслуживания будет изучен и проверен с помощью полученных данных [18].

Моделирование отказа подшипника происходит по схеме, показанной на рисунке 2.

Отказ подшипника создается путем подачи возмущения колебаний в систему вала. Переменная модель BearingGain управляет интерференционной силой, притом значение BearingGain, равное нулю, означает отсутствие повреждения подшипника. Для моделирования данных ухудшения состояния подшипника значение BearingGain изменяется от 0 до -4,0 с шагом 0,1. Модель запускается при каждом изменении значения BearingGain, и каждый раз собирается 40-секундный сигнал вибраций.

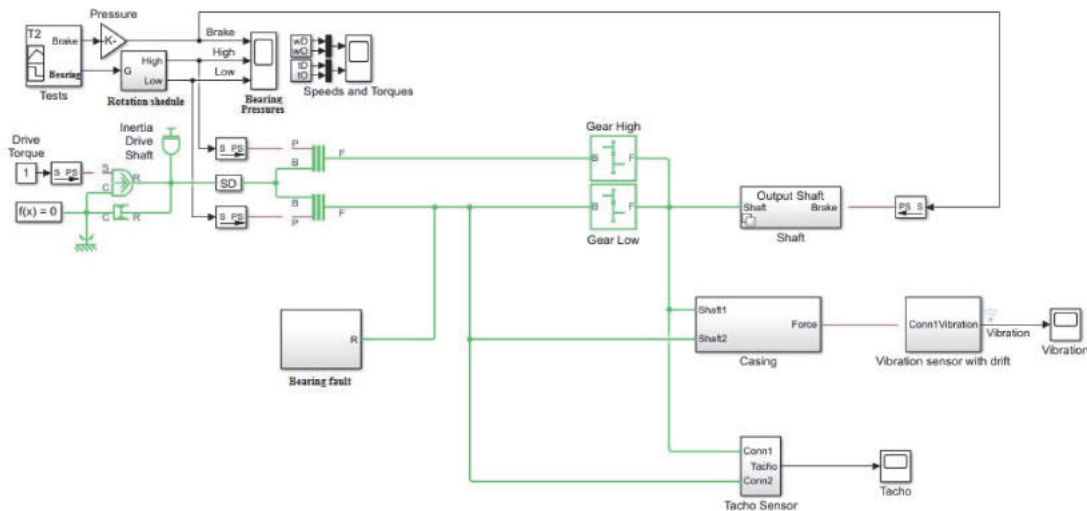


Рисунок 2. Блок-схема Simulink

Figure 2. Simulink block diagram

Для каждого вибрационного сигнала мы можем извлечь из исходного сигнала всевозможные характеристики как во временной, так и в частотной областях, а также рассчитать характеристики вторичного сигнала и проанализировать тенденцию изменения этих характеристик в процессе усугубления степени дефектов подшипника, затем найти признаки со значительным трендом для оценки остаточного ресурса оборудования, что является основной идеей профилактического обслуживания. Эти характеристики обычно включают среднее значение, дисперсию, пиковое значение, приблизительную энтропию, эксцесс сигнала, эксцесс спектра, энергию огибающей, показатель Ляпунова и другие нелинейные характеристики сигнала, а также синхронную во времени среднюю пиковую частоту и мощность времени.

Синхронная средняя огибающая вибрационного сигнала

Монотонность и тенденция каждого признака сигнала рассчитываются для

оценки его вклада в оценку остаточного ресурса в соответствии с методом, описанным ранее. Трудно выбрать подходящие признаки для представления процесса развития неисправности подшипника в соответствии с монотонными или трендовыми результатами одного признака сигнала. Таким образом, для получения всестороннего ранжирования сложим результаты оценки монотонности и тренда сигнала функций. Всесторонние результаты ранжирования важности признаков показаны на рисунке 3.

Затем метод главных компонент используется для объединения функций с важностью выше 0,1 [19]. Визуализация данных происходит в осях первых двух главных компонент, как показано на рисунке 4. Можно видеть, что с постепенным разрушением подшипника очевидна тенденция к увеличению первой главной компоненты, в то время как тенденция второй главной компоненты не очевидна. Поэтому мы выбираем первый главный компонент в качестве важного показателя работоспособности оборудования.

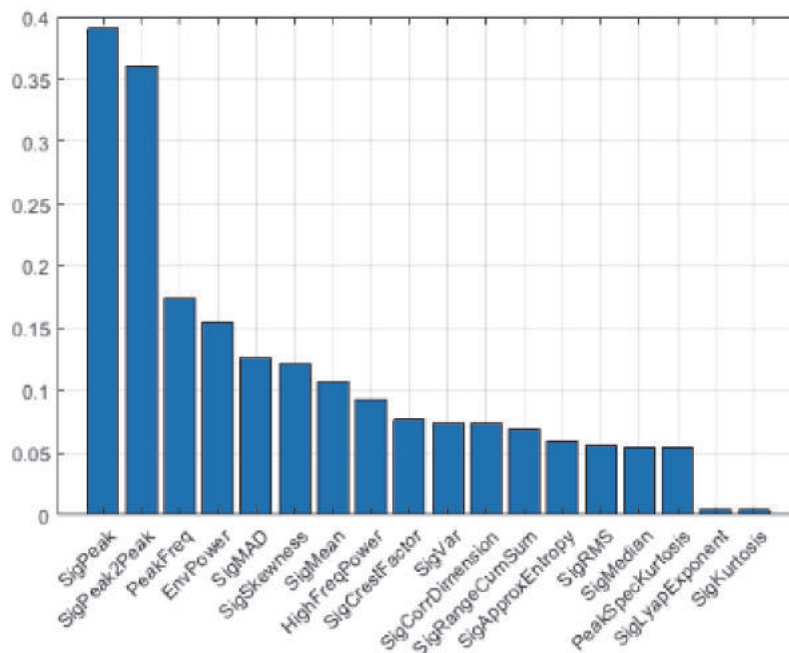


Рисунок 3. Ранжирование функций сигнала

Figure 3. Signal function ranking

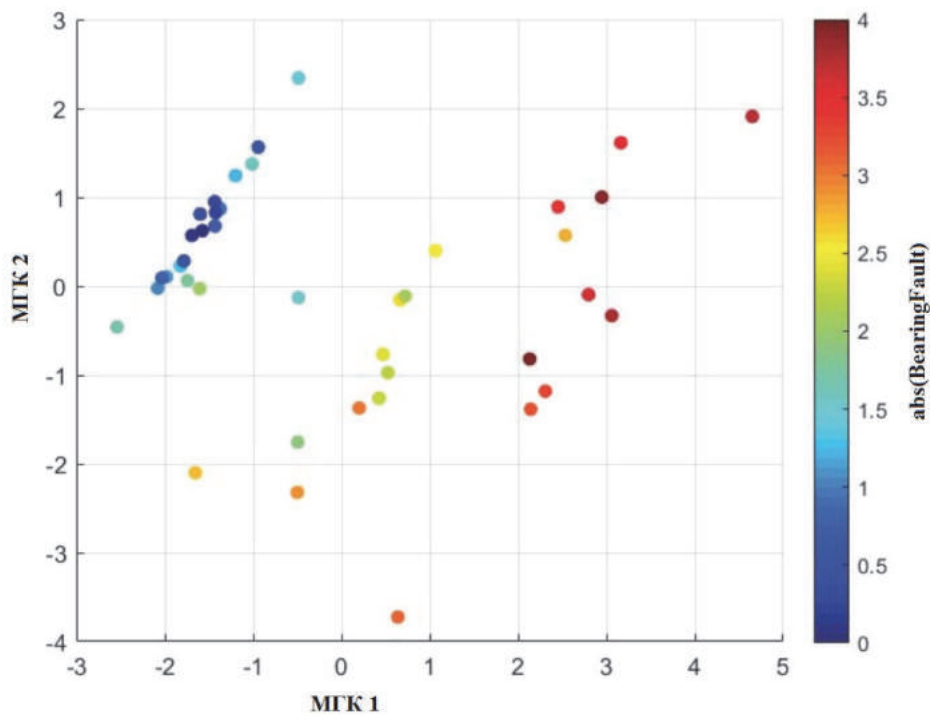


Рисунок 4. Результаты слияния признаков функций по методу главных компонент

Figure 4. Results of feature fusion using the principal component method

Однако вся тенденция не монотонна, что может быть вызвано шумом. Сглаживание исходного графика тренда с помощью фильтрации производится сглаживание исходного графика тренда. Результат представлен на рисунке 5. Из сглаженного графика тренда видно, что при BearingGain около $-2,0$ (на графике берется абсолютное значение, равное $2,0$), первая главная компонента явно изменяется и начинает возрастать выше нуля. Следовательно, ее можно использовать в качестве граничной линии для определения состояния неисправности подшипника. Кроме того, также видно, что при дальнейшем ухудшении состояния отказа подшипника, когда BearingGain достигает примерно $-3,0$, первая главная составляющая начинает увеличиваться до более чем $1,0$, поэтому его можно использовать в качестве еще одной точки перехода для оценки статуса отказа подшипника.

Для проверки модели генерируются данные путем установки BearingGain на $-0,55, -1,55, -2,55, -3,65$, чтобы извлечь

данные сигнала вибрации, собранного датчиком вибрации [20]. Затем уменьшается размерность нескольких выбранных значимых признаков, и берем первую главную компоненту, которая отражается на сглаженном графике тренда (красный треугольник), как показано на рисунке 5. Из анализа рисунка 5 видно, что результат суждения о состоянии неисправности подшипника, полученный с помощью сгенерированных данных проверки, в пределах погрешности соответствует реальному BearingGain, и оно также может правильно идентифицировать стадию неисправности подшипника. Таким образом, в реальном процессе мониторинга несколько измеренных значений сигнала вибрации должны быть прикреплены к соответствующим временным меткам, а затем в сочетании с вышеуказанным процессом/результатами анализа можно оценить оставшийся доступный срок службы оборудования/компонентов, а также провести профилактическое техническое обслуживание.

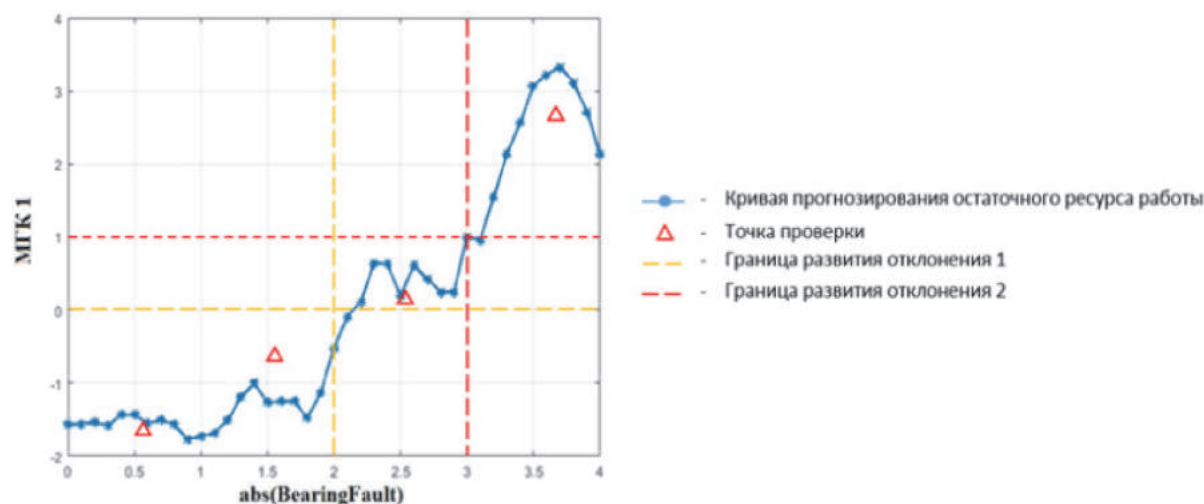


Рисунок 5. График изменения первой главной компоненты в зависимости от степени неисправности подшипника (после сглаживания)

Figure 5. Diagram of the change in the first principal component as a function of the degree of bearing failure (after smoothing)

Вывод

В данной работе представлен обзор целей и подходов системы предиктивного технического обслуживания электро-механических систем, основанного на методах машинного обучения. Пред-

ложен метод оценки состояния подшипников вращающихся электрических машин с помощью анализа сигнала вибраций. Произведено моделирование отказа подшипника.

Список источников

1. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. СПб.: Лань, 2017. 376 с. ISBN 978-5-8114-6794-5.
2. Geitner F.K., Bloch H.P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Butterworth Heinemann, 2012. 743 p. doi: 10.1016/b978-0-12-386045-3.00001-5.
3. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. Л.: Энергомашиниздат, 1989. 334 p. ISBN 5-283-04431-9.
4. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 276 p.
5. Тэттэр В.Ю., Тэттэр А.Ю., Барашук В.С. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах. 2005. 90 с.
6. Барков А.В., Баркова Н.А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок: сборн. тр. семинара. СПб., 1999. С. 115–156.
7. Cerrada M. e.a. A Review on Data-Driven Fault Severity Assessment in Rolling Bearings // Mechanical Systems and Signal Processing. January 2018. Vol. 99. P. 169-196. doi:10.1016/j.ymssp.2017.06.012.
8. Georgoulas G., Loutas T., Stylios C.D., Kostopoulos V. Bearing Fault Detection Based on Hybrid Ensemble Detector and Empirical Mode Decomposition // Mechanical Systems and Signal Processing. December 2013. Vol. 41 (1-2). P. 510–525. doi:10.1016/j.ymssp.2013.02.020.
9. Stack J.R., Habetler T.G., Harley R.G. Fault Classification and Fault Signature Production for Rolling Element Bearings in Electric Machines // IEEE Trans. Ind. Appl. 2004. Vol. 40 (3). P. 735–739. doi:10.1109/TIA.2004.827454.
10. McFadden P., Smith J. Model for the Vibration Produced by a Single Point Defect in a Rolling Element Bearing // J. Sound Vib. 1984. Vol. 96 (1). P. 69–82. doi: 10.1016/0022-460X(84)90595-9.
11. Kateris D., Moshou D., Pantazi X.-E., Gravalos I., Sawalhi N., Loutridis S. A Machine Learning Approach for the Condition Monitoring of Rotating Machinery // J. Mech. Sci. Technol. 2014. Vol. 28 (1). P. 61–71. doi: 10.1007/S12206-013-1102-Y.
12. Zhao S.F., Liang L., Xu G.H., Wang J., Zhang W.M. Quantitative Diagnosis of a Spall-Like Fault of a Rolling Element Bearing by Empirical

Mode Decomposition and the Approximate Entropy Method // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. Vol. 40 (1). P. 154–177. doi: 10.1016/j.ymssp.2013.04.006.

13. McFadden P., Smith J. The Vibration Produced by Multiple Point Defects in a Rolling Element Bearing // *J. Sound Vib.* 1985. Vol. 98 (2). P. 263–273. doi: 10.1016/0022-460X(85)90390-6.

14. Chan D.M., Rao R., Huang F., Canny J.F. T-SNE-CUDA: GPU-Accelerated T-SNE and Its Applications to Modern Data // 2018 30th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD). 2018. doi: 10.1109/cahpc.2018.8645912.

15. Singh K.P., Bhai R., Mishra V., Nagar P., Kasinayal J. Localization in Wireless Sensor Network Using LLE-ISOMAP Algorithm // *TENCON 2017 — 2017 IEEE Region 10 Conference*. 2017. doi: 10.1109/tencon.2017.822789.

16. Zeng Y., Lou Z. The New PCA for Dynamic and Non-Gaussian Processes // 2020 Chinese Automation Congress (CAC). 2020. doi: 10.1109/cac51589.2020.9327.

17. Cong Zhang, Yuanan Liu, Fan Wu, Wenhao Fan, Jielong Tang, Haosong Liu. Multi-Dimensional Joint Prediction Model for IoT Sensor Data Search // *Access IEEE*. 2019. Vol. 7. P. 90863–90873. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927239.

18. Singh J., Darpe A., Singh S. Bearing Damage Assessment Using Jensen-Rényi Divergence Based on EEMD // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 87 (Part A). P. 307–339. doi:10.1016/j.ymssp.2016.10.028.

19. Pacheco F., Cerrada M., Sanchez R.-V., Cabrera D., Li C., de Oliveira J.V. Attribute Clustering Using Rough Set Theory for Feature Selection in Fault Severity Classification of Rotating Machinery // *Expert Syst. Appl.* 2017. Vol. 71. P. 69–86. doi:10.1016/j.eswa.2016.11.024.

20. Ozlem Ece Yurek, Derya Birant. Remaining Useful Life Estimation for Predictive Maintenance Using Feature Engineering // *Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*. 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/ASYU48272.2019.8946397.

References

1. Nosov V.V. *Diagnostika mashin i oborudovaniya* [Diagnostics of Machinery and Equipment]. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2017. 376 p. ISBN 978-5-8114-6794-5. [in Russian].

2. Geitner F.K., Bloch H.P. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Butterworth Heinemann, 2012. 743 p. doi: 10.1016/b978-0-12-386045-3.00001-5.

3. Gemke R.G. *Neispravnosti elektricheskikh mashin* [Failures of Electrical Machines]. Lening-

rad, Energomashinizdat Publ., 1989. 334 p. ISBN 5-283-04431-9. [in Russian].

4. Shirman A.R., Solov'ev A.B. *Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya* [Practical Vibrodiagnostics and Condition Monitoring of Mechanical Equipment]. Moscow, 1996. 276 p. [in Russian].

5. Tetter V.Yu., Tetter A.Yu., Barashchuk V.S. *Diagnostirovanie podshipnikovykh i reduktornykh uzlov na perekhodnykh rezhimakh* [Diagnosing of Bearing and Gearbox Units during Transition Modes]. 2005. 90 p. [in Russian].

6. Barkov A.V., Barkova N.A. Intellektual'nye sistemy monitoringa i diagnostiki mashin po vibratsii [Intelligent Machine Vibration Monitoring and Diagnostic Systems]. *Sbornik trudov seminarov «Sovremennye problemy vibratsionnoi diagnostiki i vibrozashchity energeticheskikh ustanovok»* [Collection of Proceedings of the Seminar «Modern Problems of Vibration Diagnostics and Vibration Protection of Power Plants»]. SPb., 1999. S. 115–156. [in Russian].

7. Cerrada M. et al. A Review on Data-Driven Fault Severity Assessment in Rolling Bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, January 2018, Vol. 99, pp. 169–196. doi:10.1016/j.ymssp.2017.06.012.

8. Georgoulas G., Loutas T., Stylios C.D., Kostopoulos V. Bearing Fault Detection Based on Hybrid Ensemble Detector and Empirical Mode Decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, December 2013, Vol. 41 (1–2), pp. 510–525. doi:10.1016/j.ymssp.2013.02.020.

9. Stack J.R., Habetler T.G., Harley R.G. Fault Classification and Fault Signature Production for Rolling Element Bearings in Electric Machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2004, Vol. 40 (3), pp. 735–739. doi:10.1109/TIA.2004.827454.

10. McFadden P., Smith J. Model for the Vibration Produced by a Single Point Defect in a Rolling Element Bearing. *J. Sound Vib.*, 1984, Vol. 96 (1), pp. 69–82. doi: 10.1016/0022-460X(84)90595-9.

11. Kateris D., Moshou D., Pantazi X.-E., Gravalos I., Sawalhi N., Loutridis S. A Machine Learning Approach for the Condition Monitoring of Rotating Machinery. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2014, Vol. 28 (1), pp. 61–71. doi: 10.1007/S12206-013-1102-Y.

12. Zhao S.F., Liang L., Xu G.H., Wang J., Zhang W.M. Quantitative Diagnosis of a Spall-Like Fault of a Rolling Element Bearing by Empirical Mode Decomposition and the Approximate Entropy Method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, Vol. 40 (1), pp. 154–177. doi: 10.1016/j.ymssp.2013.04.006.

13. McFadden P., Smith J. The Vibration Produced by Multiple Point Defects in a Rolling Element Bearing. *J. Sound Vib.*, 1985, Vol. 98 (2), pp. 263–273. doi: 10.1016/0022-460X(85)90390-6.
14. Chan D.M., Rao R., Huang F., Canny J.F. T-SNE-CUDA: GPU-Accelerated T-SNE and Its Applications to Modern Data. *2018 30th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD)*, 2018. doi: 10.1109/cahpc.2018.8645912.
15. Singh K.P., Bhai R., Mishra V., Nagar P., Kasinayal J. Localization in Wireless Sensor Network Using LLE-ISOMAP Algorithm. *TENCON 2017 — 2017 IEEE Region 10 Conference*, 2017. doi: 10.1109/tencon.2017.822789.
16. Zeng Y., Lou Z. The New PCA for Dynamic and Non-Gaussian Processes. *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2020. doi: 10.1109/cac51589.2020.9327.
17. Cong Zhang, Yuanan Liu, Fan Wu, Wenhao Fan, Jielong Tang, Haosong Liu. Multi-Dimensional Joint Prediction Model for IoT Sensor Data Search. *Access IEEE*, 2019. Vol. 7. P. 90863–90873. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927239.
18. Singh J., Darpe A., Singh S. Bearing Damage Assessment Using Jensen-Rényi Divergence Based on EEMD. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, Vol. 87 (Part A), pp. 307–339. doi: 10.1016/j.ymssp.2016.10.028.
19. Pacheco F., Cerrada M., Sanchez R.-V., Cabrera D., Li C., de Oliveira J.V. Attribute Clustering Using Rough Set Theory for Feature Selection in Fault Severity Classification of Rotating Machinery. *Expert Syst. Appl.*, 2017, Vol. 71, pp. 69–86. doi:10.1016/j.eswa.2016.11.024.
20. Ozlem Ece Yurek, Derya Birant. Remaining Useful Life Estimation for Predictive Maintenance Using Feature Engineering. *Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ASYU48272.2019.8946397.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 01.06.2023.

The article was submitted 11.04.2023; approved after reviewing 24.05.2023; accepted for publication 01.06.2023.

Научная статья

УДК 621.315.2.016.2:621.313.333.2

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-101-117

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ — АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» НА ОСНОВЕ БАЛАНСА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

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

Актуальность

В Российской Федерации 82 % нефти добывается при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), при этом всего 63 % скважин оборудовано подобными насосами. Так как больше половины эксплуатируемых скважин оборудовано УЭЦН, то разработка методов снижения затрат при эксплуатации подобных скважин является рациональной и логичной точкой приложения человеческих, материальных и финансовых ресурсов. Одним из методов повышения рентабельности добычи нефти из низко- и среднедебитных скважин является перевод скважины, оборудованной УЭЦН, с режима непрерывной эксплуатации на режим периодической эксплуатации скважины (ПЭС). При переводе на ПЭС происходит уменьшение потребления электроэнергии до 40 % и увеличение добычи нефти до 3 % за счет частичной гравитационной сепарации добываемого флюида на этапе накопления. Однако негативный эффект от перевода на технологию ПЭС проявляется в уменьшении среднего срока наработки на отказ из-за уменьшения ресурса гидрозащиты УЭЦН, ускоренного износа шайб в компоновке центробежного насоса, ускоренного износа промежуточных радиальных и упорных подшипников. Причиной появления негативных эффектов является повышенный уровень вибрации при интенсивном запуске.

Способ борьбы с обозначенными проблемами заключается в переходе с существующей скалярной разомкнутой системы на векторную бездатчиковую систему управления погружным электродвигателем (ПЭД). Для реализации указанной системы одним из этапов необходимо получить информацию о векторе переменных состояния подземной электротехнической части УЭЦН. Перспективный путь получения информации — создание наблюдателей переменных состояния на основе явных математических моделей. Для создания наблюдателя переменных состояний необходимо составить математические модели каждого компонента, входящего в исследу-

Ключевые слова

УЭЦН, периодическая эксплуатация, генетический алгоритм, асинхронный двигатель, кабельная линия, оценивание параметров схемы замещения, динамическая идентификация, GitHub

емую систему. При измерении токов и напряжений на выходе повышающего трансформатора УЭЦН исследуемой системой будет являться электротехнический комплекс «Кабельная линия — Асинхронный двигатель». Для реализации этого наблюдателя необходимо определить параметры схемы замещения исследуемого комплекса.

На основании вышеизложенного, разработка методики идентификации параметров схемы замещения электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» при измерении токов и напряжений на поверхности является своевременной и актуальной задачей, решение которой позволит создать предпосылки для реализации векторной системы управления ПЭД, увеличения надежности УЭЦН при ПЭС и, как следствие, увеличения рентабельности добычи нефти из низко- и среднедебитных нефтяных скважин.

Цель исследования

Разработать и экспериментально подтвердить работоспособность методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности.

Методы исследования

Анализ литературных источников, системный анализ, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

Результаты

Экспериментально опробована и подтверждена работоспособность методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Для цитирования: Раков И. В. Методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. 101-117. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-101-117>.

Original article

METHODOLOGY FOR EVALUATING PARAMETERS OF THE ELECTRICAL COMPLEX «CABLE LINE — INDUCTION MOTOR» BASED ON POWER CONSUMPTION BALANCE

Relevance

In the Russian Federation, 82 % of oil is produced using Electric Submersible Pumps (ESP), while only 63 % of wells are equipped with such pumps. Since more than half of the operating wells are equipped with ESP, developing methods to reduce operating costs for these wells is a rational and logical allocation of human, material, and financial resources. One method to increase the profitability of oil production from low- and medium-flow rate wells is to transition a well equipped with ESP from continuous operation to intermittent operation, specifically cyclic operation. Intermittent operation reduces energy consumption by up to 40 % and

Keywords

ESP, intermittent operation, genetic algorithm, asynchronous motor, cable line, equivalent circuit parameter estimation, dynamic identification, GitHub

increases oil production by 3 % due to partial gravitational separation of the produced fluid during accumulation. However, the negative effect of transitioning to intermittent operation is reflected in the reduction of the average runtime before failure due to a decreased ESP hydroprotection resource, accelerated wear of the pump unit thrust bearings, and intermediate radial bearings. The cause of these negative effects is the increased vibration level during intensive startup.

One way to address these issues is transitioning from the existing scalar open-loop control system to a vector sensorless control system for the ESP. To implement such a system, it is necessary to obtain information about the vector of the ESP state variables. A promising approach to obtaining information about the ESP state involves creating observers based on explicit mathematical models. To create an observer for the state variables, mathematical models for each component of the studied system must be developed and combined into a unified system. When measuring currents and voltages at the output of the step-up transformer, the studied system will be an electric complex «Cable Line — Induction Motor». To implement this observer, it is necessary to determine the parameters of the equivalent circuit of the studied complex.

Based on the above, developing a methodology for identifying the parameters of the equivalent circuit of the electric complex «Cable Line — Induction Motor» when measuring currents and voltages on the surface is a timely and relevant task. Solving this task will create prerequisites for the implementation of a vector control system for the ESP, increasing the reliability of the ESP during intermittent operation, and consequently, increasing the profitability of oil production from low- and medium-flow rate oil wells.

Aim of research

To develop and experimentally confirm the effectiveness of a methodology for assessing the parameters of the electric complex «Cable Line — Induction Motor» based on the balance of consumed power.

Research methods

Analysis of literary sources, system analysis, mathematical modeling, experimental research.

Results

The effectiveness of the methodology for assessing the parameters of the electric complex «Cable Line — Induction Motor» based on the balance of consumed power has been experimentally tested and confirmed.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FENG-2023-0001 «Predictive Control of Energy Flows of Electricity Generating Complexes in the Arctic and the Far North, with Stochastic Patterns of Consumption and Generation of Electrical Energy: Theory, Synthesis, Experiment»).

For citation: Rakov I. V. Metodika otsnivaniya parametrov elektrotekhnicheskogo kompleksa «Kabel'naya liniya – Asinkhronnyi dvigatel'» na osnove balansa potrebyaemoy moshchnosti [Methodology for Evaluating Parameters of the Electrical Complex «Cable Line – Induction Motor» Based on Power Consumption Balance]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 101-117 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-101-117>.

Введение

В связи с существенным истощением нефтеносных пластов на месторождениях России перед нефтедобывающими компаниями встает вопрос об увеличении энергетической рентабельности добычи нефти [1]. Так как в Российской Федерации 82 % нефти добывается при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [2], то приложении усилий для оптимизации режимов работы УЭЦН может принести большой энергетической и экономической эффект. Один из таких методов оптимизации работы УЭЦН заключается в переводе скважины с непрерывного режима на режим периодической эксплуатации.

На нескольких месторождениях западной Сибири и Урала за 3 года доля установок [3], работающих в периодическом режиме эксплуатации (ПЭС), увеличилась с 41 % до 78 %. Перевод на такую технологию дает уменьшение потребления электроэнергии до 40 % и увеличение количества добываемой нефти до 3 % [4]. Однако при изменении режима эксплуатации на ПЭС средний срок наработки на отказ снизился с 420 до 149 сут [3], т.е. перевод в большом объеме скважин на ПЭС приводит к повышению количества вышедших из строя погружных электродвигателей (ПЭД) и компонентов насоса в ограниченный промежуток времени; это, в свою очередь, может нивелировать полученные положительные эффекты от экономии электроэнергии и увеличения количества добытой нефти за счет расхода средств на ремонт ПЭД.

Первопричиной уменьшения среднего срока наработки на отказ является уменьшение времени разгона ПЭД с нескольких десятков минут до нескольких десятков секунд. Время разгона изменяется исходя из технологических требований предприятия. Это влечет за собой увеличение бросков тока / момента и, как след-

ствие, увеличение крутильных колебаний и вибраций. При увеличении вибрации происходит рост утечек через торцовые уплотнения в 5–10 раз. Объем масла уменьшается, что приводит к попаданию пластовой жидкости внутрь маслосистемы, попаданию добываемого флюида в полости ПЭД и, как следствие, ускоренному старению изоляции и межвитковым замыканиям [3].

Вариант, который обеспечит максимально интенсивный разгон при минимальных бросках тока и момента, — это переход на векторную систему управления. Основная проблема, стоящая перед реализацией векторной системы управления, — это отсутствие информации о переменных состоянии ПЭД. Один из методов получения информации, который позволяет оценивать переменные состояния без изменения и доработки подземной части оборудования УЭЦН — создание наблюдателей полного порядка переменных состояния электротехнической подсистемы УЭЦН на основе явных математических моделей. Для разработки наблюдателя переменных состояний ПЭД необходимо составить математические модели каждого электротехнического компонента, входящего в силовую электрическую цепь УЭЦН, а именно «Преобразователь частоты (ПЧ) — синус-фильтр (СФ) — повышающий трансформатор (ПТ) — нефтепогружной кабель (НПК) — погружной электродвигатель (ПЭД)», затем объединить каждую отдельную модель в общую систему [5]. Если обеспечить измерение токов и напряжений на выходе ПТ, входе НПК, то достаточно будет составить только математические модели НПК и ПЭД, а затем объединить их в общую систему, получив таким образом модель «кабельная линия — асинхронный двигатель». Одной из преград для реализации наблюдателя вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия

— Асинхронный двигатель» является отсутствие методик оценивания параметров схемы замещения этого комплекса на основании наземных измерений.

Методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности

Анализ литературных источников [6–10] показал, что для задачи идентификации параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель», включенного в систему УЭЦН, может принципиально подходить только метод динамической идентификации. Этот метод подходит из-за того, что исследуемый электротехнический комплекс находится в агрессивных термодимических внешних условиях на большой глубине, где в зависимости от режима эксплуатации меняются электрические параметры системы. Для обеспечения адекватной оценки параметров необходимо в процессе эксплуатации с заданной периодичностью проводить процесс идентификации и корректировать значения параметров схемы замещения в наблюдателе. Помимо окружающей среды, также необходимо учитывать ограничение, которое исходит из специфики режима работы при ПЭС [4, 11–13], а именно: ограниченный во времени период останова (от 10 до 30 мин), за который необходимо провести процедуру оценивания параметров. Так как математическое описание электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» представляет собой сложную динамическую настраиваемую модель, у которой только размерность по оцениваемым параметрам равняется 9, основную работу по оценке параметров необходимо провести до того, как весь комплекс будет спущен в скважину.

Необходимо заранее оценить параметры схемы замещения небольшого участка кабельной линии и асинхронного двигателя, а затем проводить процедуру уточнения параметров, что можно реализовать за более короткий промежуток времени.

Учитывая ограничения во времени на процедуру оценивания параметров всей исследуемой системы, а также необходимость корректировки параметров в процессе работы, была сформирована методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель». Методика состоит из 6 пунктов:

1. Оценить параметры асинхронного двигателя, планируемого к установке;
2. Оценить параметры участка кабельной линии (не менее 200 м), планируемого к установке;
3. Смонтировать установку электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» с измерением токов / напряжений на входе кабельной линии;
4. Внести в ПО ранее оцененные параметры, длину участка кабельной линии и фактическую длину кабельной линии;
5. Оценить параметры электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель»;
6. Произвести повторную оценку параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» при увеличении невязки между полной потребляемой мощностью объекта и модели более 25 % или по условию останова исследуемого комплекса.

Математическая модель исследуемого комплекса

Электротехнический комплекс «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» с учетом длины кабельной линии

описывается системой дифференциальных уравнений, в которой кабель представлен редуцированной математической моделью (1). Порядок редуцированной математической модели кабельной линии зависит от частоты питающей сети и длины кабельной линии [5]. При частоте питания 50 Гц количество звеньев редуцированной математической модели можно указывать из расчета 1 звено на 1 км кабельной линии. При нецелочисленной длине кабельной линии необходимо указывать количество звеньев в большую сторону, т.е. при длине кабельной линии в 3,5 км количество звеньев будет равняться 4.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{di_{1\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{1\alpha_вх}(t) - i_{1\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{1\alpha_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\
 \frac{di_{1\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{1\beta_вх}(t) - i_{1\beta_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{1\beta_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\
 \frac{du_{1\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{1\alpha_каб}(t) - u_{1\alpha_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{2\alpha_каб}(t))}{C_{каб}/n} \\
 \frac{du_{1\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{1\beta_каб}(t) - u_{1\beta_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{2\beta_каб}(t))}{C_{каб}/n} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \frac{di_{(n-1)\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{(n-1)\alpha_вх}(t) - i_{(n-1)\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{(n)\alpha_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\
 \frac{di_{(n)\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{(n-1)\beta_вх}(t) - i_{(n)\beta_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{(n)\beta_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\
 \frac{du_{(n)\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{(n)\alpha_каб}(t) - u_{(n)\alpha_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{1\alpha}(t))}{C_{каб}/n} \\
 \frac{du_{(n)\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{(n)\beta_каб}(t) - u_{(n)\beta_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{1\beta}(t))}{C_{каб}/n} \\
 \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot u_{(n)\alpha_вых}(t) - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha}(t) + \\
 + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha}(t) + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\beta}(t) \\
 \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot u_{(n)\beta_вых}(t) - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\beta}(t) + \\
 + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta}(t) - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\alpha}(t) \\
 \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha}(t) + \\
 + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\beta}(t) \\
 \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta}(t) + \\
 + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\alpha}(t) \\
 M_{эм}(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \times \\
 \times (\Psi_{2\alpha}(t) \cdot i_{1\beta}(t) + \Psi_{2\beta}(t) \cdot i_{1\alpha}(t)) \\
 \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{эм}(t) - M_c(t)) \quad (1)
 \end{array} \right.$$

где $i_{(n)\alpha_каб}(t)$ — состояние вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси α ;

$i_{(n)\beta_каб}(t)$ — состояние вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси β ;

$u_{\alpha_вх}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси α ;

$u_{\beta_вх}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси β ;

$u_{(n)\alpha_вых}(t)$ — состояние вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси α ;

$u_{(n)\beta_вых}(t)$ — состояние вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси β ;

$i_{1\alpha}(t)$ — состояние вектора тока статора в момент времени t по оси α ;

$i_{1\beta}(t)$ — состояние вектора тока статора в момент времени t по оси β ;

$\Psi_{2\alpha}(t)$ — состояние вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси α ;

$\Psi_{2\beta}(t)$ — состояние вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси β ;

$M_{эм}(t)$ — состояние электромагнитного момента АД;

$M_c(t)$ — состояние момента статического сопротивления на валу АД;

$\omega(t)$ — угловая скорость вращения ротора АД;

$R_{каб}$ — сопротивление токоведущих жил;

$L_{каб}$ — индуктивность токоведущих жил;

$C_{каб}$ — эквивалентная ёмкость фазы относительно двух других фаз и брони;

$G_{каб}$ — проводимость изоляции;

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ — эквивалентная индуктивность обмотки статора;

$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ — эквивалентная индуктивность обмотки ротора;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_{2\sigma}'} —$ коэффициент рассеяния;

$R_3 = R_1 + \frac{R_2' \cdot L_m^2}{L_{2\sigma}'}$ — эквивалентное активное сопротивление цепей статора;

R_1 — сопротивление обмотки статора;

R_2' — приведенное к статору сопротивление обмотки ротора;

$L_{1\sigma}$ — индуктивность рассеяния обмотки статора;

$L_{2\sigma}'$ — приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора;

J — момент инерции одномассовой механической системы электропривода;

z_p — число пар полюсов.

Процедура оценивания параметров схемы замещения на основе баланса потребляемой мощности

Процедура оценивания параметров схемы замещения объекта исследования на основе потребляемой мощности приведена на рисунке 1.

Основная идея динамической идентификации [14] параметров схемы замещения заключается в том, что на нестационарный динамический объект подается входное напряжение, откликом объекта является ток. Записанные значения тока и напряжения передаются в микропроцессорную систему управления. На математическую модель исследуемого

объекта подается входное воздействие в виде значений зафиксированного ранее напряжения, откликом модели является значение тока.

После того как зафиксировано напряжение, получены значения отклика объекта и модели, данные передаются на блоки вычисления потребляемой мощности объекта и модели соответственно. Потребляемая полная мощность принята в качестве критерия для оценивания параметров, во-первых, по тому, что при изменении какого-либо электрического параметра в электротехническом комплексе изменится потребляемая им активная, реактивная и полная мощность, а так как параметры в настраиваемой математической модели не изменяются, то возникает невязка между показаниями потребляемой мощности объекта и модели. Во-вторых, потребляемая полная мощность содержит в себе информацию о всех входных воздействиях и откликах объекта исследования, что отсекает необходимость дальнейшего выбора критерия построения целевой функции. Для вычисления активной и реактивной потребляемой мощности, без использования фазометра, необходимо перевести зафиксированное напряжение и токи из трехфазной системы в двухфазную $\alpha\beta$ по формуле:

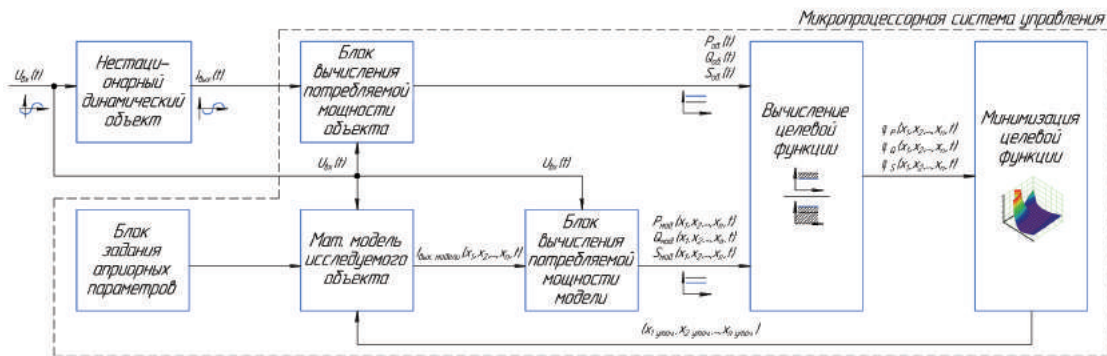


Рисунок 1. Схема процедуры оценивания параметров на основе баланса потребляемой мощности

Figure 1. Scheme of the procedure for estimating parameters based on the power balance consumption

$$\begin{aligned} U_{\alpha}(t) &= U_A(t); \\ U_{\beta}(t) &= \frac{U_B(t) - U_C(t)}{\sqrt{3}}; \\ I_{\alpha}(t) &= I_A(t); \\ I_{\beta}(t) &= \frac{I_B(t) - I_C(t)}{\sqrt{3}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{\alpha}(t)$ — проекция результирующего вектора тока по оси α ;

$U_{\alpha}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения по оси α ;

$I_{\beta}(t)$ — проекция результирующего вектора тока по оси β ;

$U_{\beta}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения по оси β .

Затем путем скалярного и векторного [15, 16] произведения масштабированных векторов для объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{I_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{I_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right)$, для модели объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}}, \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right)$,

заданных координатами в ортогональном базисе, необходимо вычислить

активную мощность:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= \\ = m \left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}} + \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

реактивную мощность:

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= \\ = m \left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}} - \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}} \right); \end{aligned} \quad (4)$$

после вычисляется полная мощность:

$$\begin{aligned} \hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= \\ = \sqrt{\left(\hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)\right)^2 + \left(\hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)\right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

где m — количество фаз, ед.

Следующим шагом вычисляется невязка между полной потребляемой мощностью объекта и модели. Для описания невязки между экспериментальными и модельными значениями полной потребляемой мощности составляется целевая функция с позиции метода наименьших модулей:

$$\begin{aligned} \Psi_{S_mdl}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= \\ = \int_0^t |S(t) - \hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)| dt, \end{aligned} \quad (6)$$

где $S(t)$ — полная потребляемая мощность объекта исследования;

$S_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ — состояние вектора полной потребляемой мощности в момент времени t ;

$\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n$ — параметры математической модели.

Сформированная целевая функция передается на блок минимизации. Общая задача многомерной минимизации формулируется следующим образом [17]: необходимо найти вектор параметров $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ таким образом, чтобы обеспечить минимизацию или максимизацию выбранной целевой функции $f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)] \rightarrow \min/\max$, определенной на n -мерном евклидовом пространстве \mathbb{R}^n , заданной ограничениями области $g(X) = [g_1(X), g_2(X), \dots, g_j(X)]$.

В качестве инструмента минимизации целевой функции в данной статье будет применяться генетический алгоритм (ГА). Полный пример кода представлен в файловом хранилище [18], описание работы представлено в [14]. После минимизации целевой функции оцененные параметры передаются на математическую модель объекта исследования для вычисления ошибки восстановления сигнала полной потребляемой мощности.

Описание экспериментальных установок для апробирования разработанной методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель»

Схемы используемых экспериментальных установок для реализации пунктов 1, 2 и 5 методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» представлены на рисунке 5.

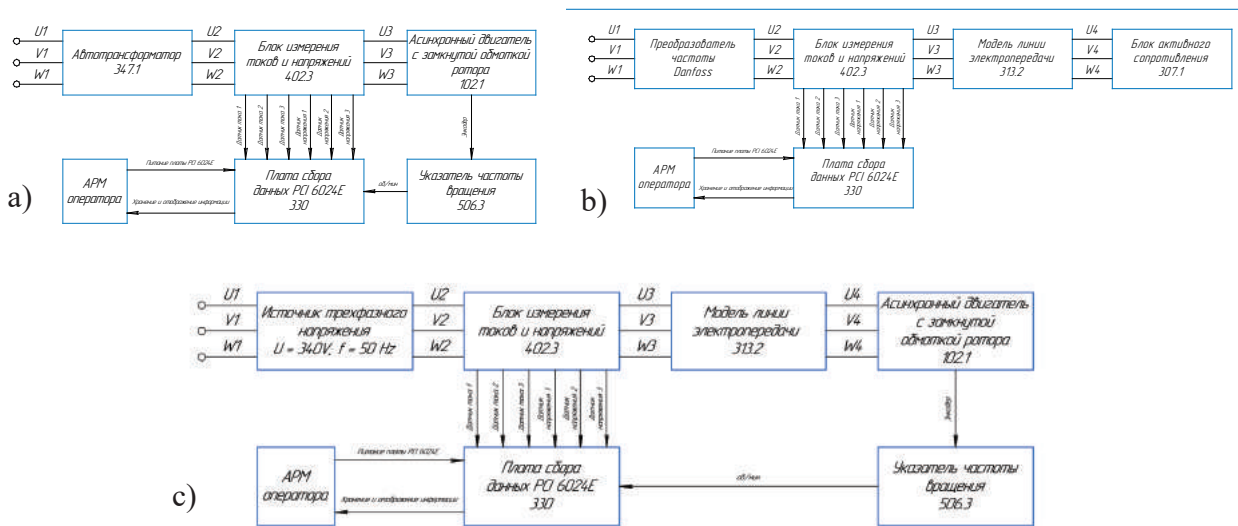


Рисунок 2. Схемы экспериментальных установок: для выполнения пункта № 1 разработанной методики (а), для выполнения пункта № 2 разработанной методики (б), для выполнения пункта № 5 разработанной методики (с)

Figure 2. Schemes of experimental setups: to carry out point No. 1 of the developed method (a), to carry out point No. 2 of the developed method (b), to carry out point No. 5 of the developed method (c)

Экспериментальная установка на рисунке 2, а состоит из регулируемого источника питания, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных и асинхронного двигателя, который планируется к установке. Параметры асинхронного двигателя приведены в таблице 1.

Экспериментальная установка на рисунке 2, б состоит из преобразователя частоты Danfos, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных, участка кабельной линии имитирующей кабель длиной 1 км, который планируется к установке, и активной нагрузки. Пара-

метры участка кабельной линии и активной нагрузки приведены в таблице 2.

Экспериментальная установка на рисунке 2, с состоит из источника питания, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных, двух участков кабельной линии, имитирующих кабель длиной 2 км, асинхронного двигателя и датчика угловой скорости вращения. Так как рассматриваемый объект исследования содержит в силовом канале синус-фильтр, то питание ПЭД также происходит от синусоидального напряжения. В связи с этим фактом применение в полу-

Таблица 1. Параметры асинхронного двигателя

Table 1. Parameters of the induction motor

$P_{ном}$, Вт	$n_{синх}$, об/мин	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$, о.е.
30	1500	1250	0,35	36	0,73

Таблица 2. Параметры участка кабельной линии и активной нагрузки

Table 2. Parameters of the cable line section and active load

R , Ом	L/R , Гн/Ом	C , мкФ	$R_{нагр}$, Ом
50	0,3 / 8	0,18	41,2

натурном экспериментальном стенде напряжения питания от промышленной сети является возможным, т.к. оно является синусоидальным.

Блок датчиков тока / напряжения во всех трех экспериментах используется один и тот же, содержит три измерительных преобразователя «ток — напряжение» типа HMS 20-P, три измерительных преобразователя «напряжение — напряжение» типа LV 25-1000. Плата сбора данных использовалась PCI 6024E компании National Instruments. Информация о метрологических характеристиках дат-

чиков и платы сбора данных представлена в работе [14].

В результате проведения трех экспериментов пуска на холостом ходу и останова выбегом были получены мгновенные значения токов / напряжений, представленные на рисунке 3.

После проведения экспериментов и фиксации данных был произведен перевод экспериментальных трехфазных мгновенных значений напряжения и тока в двухфазную систему координат $\alpha\beta$ (2), а затем выполнен расчет потребляемой активной, реактивной и полной мощности (3–5).

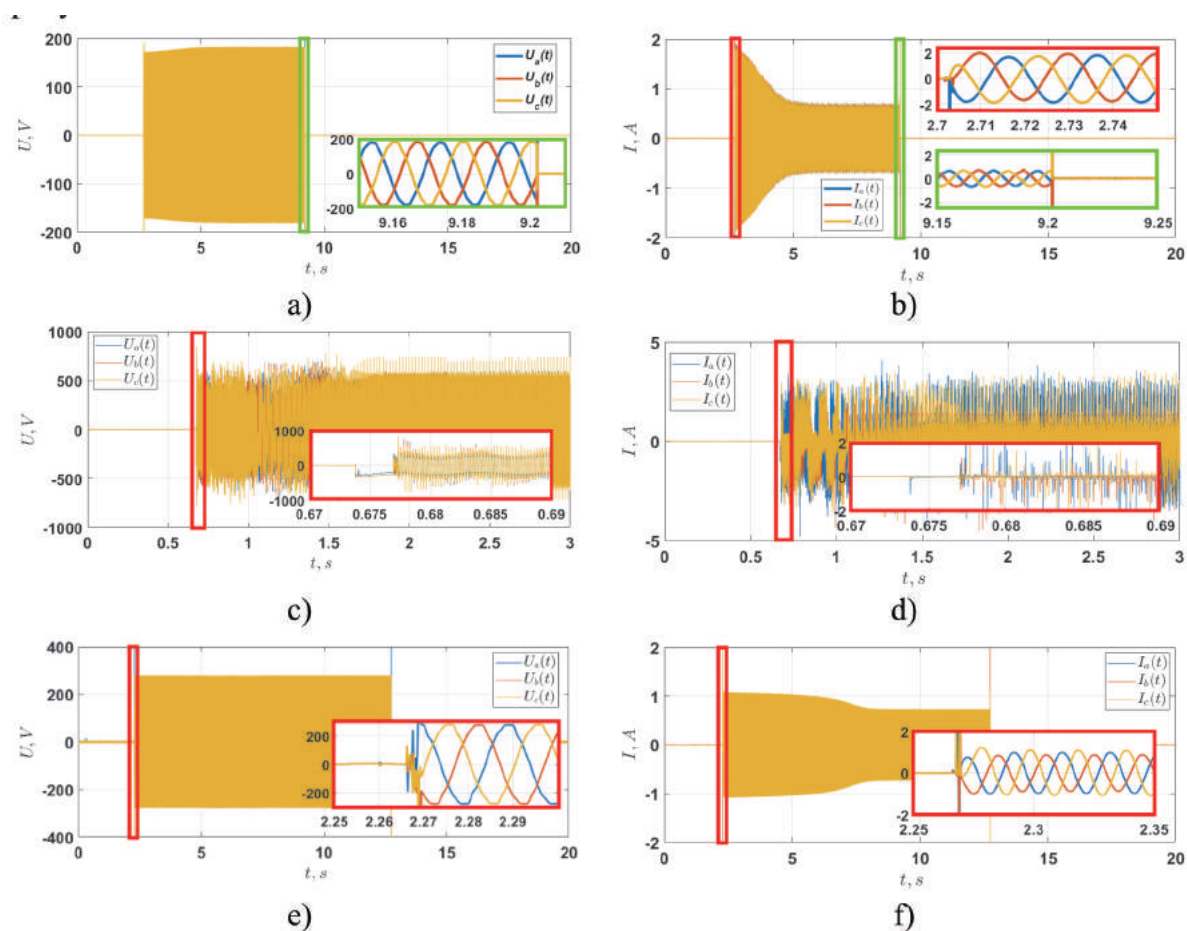


Рисунок 3. Напряжения / токи, зафиксированные при проведении экспериментальных исследований при: оценивании параметров схемы замещения АД (а, б), оценивании параметров схемы замещения участка кабельной линии (с, д), оценивании параметров схемы электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» (е, ф)

Figure 3. Voltages / currents recorded during experimental studies of the points of the developed technique: estimating the parameters of the induction motor equivalent circuit (a, b); estimating the parameters of the equivalent circuit of a cable line section (c, d); estimating the parameters of the electrical complex circuit «cable line — induction motor» (e, f)

Результаты расчетов

После получения экспериментальных значений потребляемой мощности в трех экспериментах были сформированы целевые функции:

$$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J}) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J})| dt; \quad (7)$$

$$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб})| dt; \quad (8)$$

$$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J}) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J})| dt. \quad (9)$$

В результате процесса минимизации целевых функций (7), (8) был получен итерационный процесс процедуры минимизации (рисунок 4).

Сведем полученные результаты в таблицу 3 и вычислим ошибку восстановления сигнала полной потребляемой мощности на основе идентифицированных параметров по формуле:

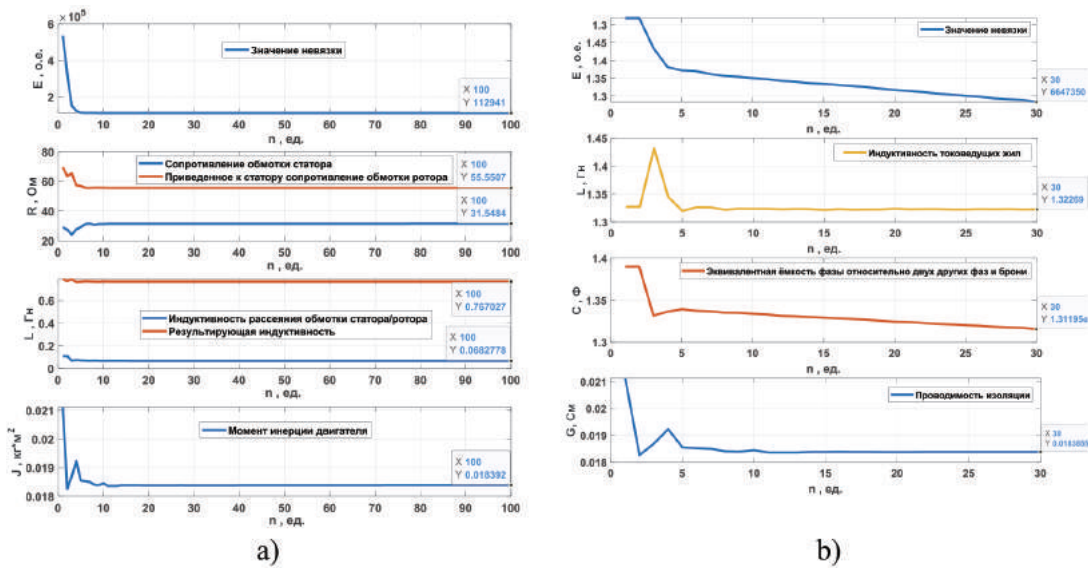


Рисунок 4. Итерационный процесс минимизации целевой функции: оценивание параметров АД (а); оценивание параметров участка кабельной линии, имитирующей кабель длиной 1 км (б)

Figure 4. Iterative process of minimizing the objective function: assessment of induction motor parameters (a); assessment of the parameters of a section of a cable line simulating a 1 km long cable (b)

Таблица 3. Сводная таблица идентифицированных параметров схемы замещения АД и участка кабельной линии

Table 3. Summary table of identified parameters of the equivalent circuit of the induction motor and the cable line section

Асинхронный двигатель					
Наименование параметра	\hat{R}_1 , Ом	$\hat{L}_{1\delta}$, Гн	\hat{L}_m , Гн	\hat{R}'_2 , Ом	\hat{J} , кг·м ²
Оцененное значение	31,54	0,06	0,76	55,55	0,01
Ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности	2,71 %				
Участок кабельной линии, имитирующий кабель длиной 1 км					
Наименование параметра	$\hat{R}_{каб}$	$\hat{L}_{каб}$	$\hat{C}_{каб}$	$\hat{G}_{каб}$	
Оцененное значение	58,70 Ом	1,30 Гн	0,13 мкФ	18,39 мкСм	
Ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности	15,70 %				

$$\varepsilon_S = \frac{\int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)| dt}{\int_0^t |S(t)| dt} \cdot 100. \quad (10)$$

Проследим на рисунке 5, как восстанавливается сигнал полной потребляемой мощности при использовании идентифицированных параметров относительно экспериментальных данных.

Переходим к пункту № 4 и вносим в ПО ранее оцененные параметры схемы замещения АД и участка кабельной линии, длину участка кабельной линии, а также общую длину смонтированной кабельной линии. Целевая функция, передаваемая на блок оптимизации, представлена в (9). Информация, внесенная в программное обеспечение генетического алгоритма, представлена в таблице 4 и выделена жирным шрифтом.

Основной задачей на этапе № 4 разработанной методики является ограничение поискового пространства решения целевой функции при ее минимизации с целью ускорить процесс оценивания параметров исследуемого электротехнического комплекса в сборе. В результате

процесса оптимизации целевой функции (9) с жестким ограничением поискового пространства были получены параметры схемы замещения всего комплекса. Результаты представлены в таблице 5.

Как видно в таблице 5, оцененные параметры позволяют восстановить полную потребляемую мощность с погрешностью в 3,09 %, а ошибка восстановления угловой скорости вращения (11) составляет 5,31 %:

$$\varepsilon_\omega = \frac{\int_0^t |\omega(t) - \omega(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)| dt}{\int_0^t |\omega(t)| dt} \cdot 100. \quad (11)$$

Построим графики потребляемой полной мощности угловой скорости вращения (рисунок 6).

Обсуждение результатов

Проанализировав данные таблицы 5 и рисунка 6, можно утверждать, что разработанная методика позволяет оценивать параметры электротехнического комплекса в сборе на основании измерений токов / напряжений на входе кабельной линии. Однако перед этим необходимо

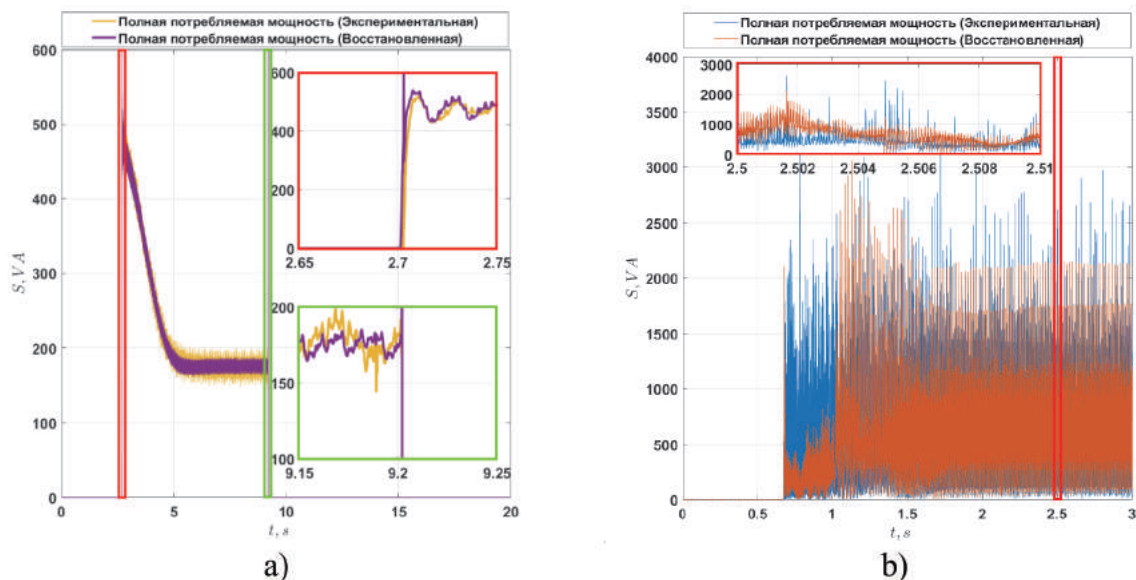


Рисунок 5. Экспериментальный и восстановленный сигналы полной потребляемой мощности АД (а) и активной нагрузки, подключенной к преобразователю частоты Danfos через участок кабельной линии (б)

Figure 5. Experimental and reconstructed signal of the total power consumption of the induction motor (a) and the active load connected to the Danfos frequency converter through the section of the cable line (b)

Таблица 4. Информация, вносимая в ПО генетического алгоритма для оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса

Table 4. Information entered into the genetic algorithm software for estimating the parameters of the equivalent circuit of an electrical complex

№, п/п	Наименование параметра и настройки	Оцененные параметры на предыдущих этапах	Нижняя граница ограничения	Верхняя граница ограничения
1	Используемые целевые функции	$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}'_2, \hat{J})$		
2	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{R}_{каб}$, Ом	58,70	$0,8 \cdot \hat{R}_{каб}$	$2 \cdot \hat{R}_{каб}$
3	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{L}_{каб}$, Гн	1,30	$0,8 \cdot \hat{L}_{каб}$	$1,1 \cdot \hat{L}_{каб}$
4	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{C}_{каб}$, мкФ	0,13	$0,8 \cdot \hat{C}_{каб}$	$1,1 \cdot \hat{C}_{каб}$
5	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{G}_{каб}$, мкСм	18,39	$0,8 \cdot \hat{G}_{каб}$	$1,1 \cdot \hat{G}_{каб}$
6	Ограничение поискового пространства по параметру \hat{R}_1 , Ом	31,54	$0,8 \cdot \hat{R}_1$	$2 \cdot \hat{R}_1$
7	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{L}_{1\delta}$, Гн	0,06	$0,8 \cdot \hat{L}_{1\delta}$	$1,1 \hat{L}_{1\delta}$
8	Ограничение поискового пространства по параметру \hat{L}_m , Гн	0,76	$0,8 \cdot \hat{L}_m$	$1,1 \hat{L}_m$
9	Ограничение поискового пространства по параметру \hat{R}'_2 , Ом	55,55	$0,8 \cdot \hat{R}'_2$	$2 \cdot \hat{R}'_2$
10	Ограничение поискового пространства по параметру \hat{J} , кг·м ²	0,01	$0,8 \cdot \hat{J}$	$1,1 \cdot \hat{J}$
11	Длина участка кабельной линии, км	1		
12	Общая длина кабельной линии, км	2		

Таблица 5. Сводная таблица оцененных параметров схемы замещения электротехнического комплекса, ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности и угловой скорости вращения вала асинхронного двигателя, подключенного к источнику питания через кабельную линию

Table 5. Summary table of calculated parameters for the equivalent circuit of an electrical complex, error in restoring the signal for total power consumption and the angular speed of an induction motor connected to the power source via a cable line

Наименование параметра	Оцененное значение	Ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности	Ошибка восстановления сигнала угловой скорости вращения
\hat{R}_1 , Ом	39,77	3,09 %	5,31 %
$\hat{L}_{1\delta}$, Гн	0,04		
\hat{L}_m , Гн	0,50		
\hat{R}'_2 , Ом	46,69		
\hat{J} , кг·м ²	0,01		
$\hat{R}_{каб}$, Ом	59,47		
$\hat{L}_{каб}$, Гн	0,30		
$\hat{C}_{каб}$, мкФ	0,16		
$\hat{G}_{каб}$, мкСм	18,39		

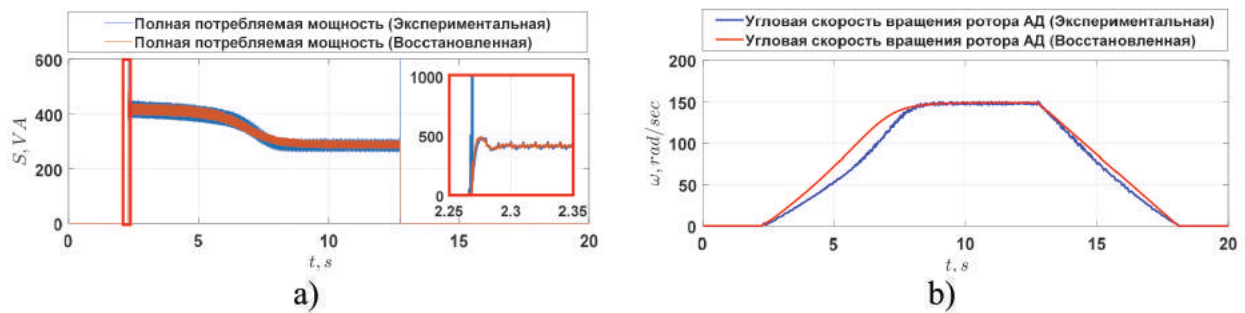


Рисунок 6. Графики экспериментального и восстановленного сигнала полной потребляемой мощности (а) и угловой скорости вращения АД с КЗ ротором подключенного к источнику питания через кабельную линию (б)

Figure 6. Graphs of the experimental and reconstructed signals for total power consumption (a) and angular speed of rotation of an induction motor with a squirrel-cage rotor connected to the power source via a cable line (b)

проводить подготовительные работы по оцениванию параметров каждого компонента исследуемого комплекса в отдельности для последующего жесткого ограничения поискового пространства решения задачи оптимизации. Подобный подход к решению задач в системном анализе называется декомпозицией — процесс разбиения сложной системы на более мелкие и управляемые части или подсистемы с целью более эффективного анализа, проектирования и управления системой в целом.

На первом этапе методики при использовании оцененных параметров схемы замещения АД ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности составила 2,71 %, что является приемлемым результатом.

На втором этапе методики при использовании оцененных параметров участка кабельной линии, имитирующей кабель длиной 1 км, ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности составила 15,70 %. Основной вклад в эту ошибку вносит участок с 0,7 до 1,2 с, т.е. на участке переходного процесса, затем сигнал стабилизируется, и ошибка восстановления на участке работы от 2 до 3 с составляет 4,9 %. Такую ошибку восстановленного сигнала можно обосновать тем, что схема замещения кабеля, используемая при моделировании, состоит из

одного элементарного четырехполюсника, который из-за ШИМ-модулированного напряжения на входе не позволяет достоверно отобразить переходные процессы в кабельной линии, но его достаточно для того, чтобы отобразить процессы, происходящие в кабеле при установившейся работе. Так как исследуемая кабельная линия представлена однородной, то учесть распределение температуры по длине кабельной линии возможно при ручном внесении масштабирующих коэффициентов к параметрам схемы замещения в зависимости от температуры на забое и устье скважины.

Несмотря на такую погрешность, при использовании оцененных параметров схемы замещения на этапе № 5, на котором кабельная линия увеличена в 2 раза, а математическое описание всего комплекса состоит из редуцированной математической модели кабельной линии и асинхронного двигателя, погрешность восстановления сигнала полной потребляемой мощности электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» составила всего 3,09 %, что является приемлемым результатом. В силу принятых допущений и некоторой погрешности в самой оценке параметров ошибка восстановления сигнала угловой скорости вращения составила 5,31 %, что является высокой

погрешностью, которая в свою очередь будет уменьшена при реализации наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель».

Выводы

1. Разработана методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности. Методика состоит из 6 пунктов. Основная идея разработанной методики заключается в раздельной оценке параметров АД и небольшого участка кабельной линии, а затем на основе оцененных параметров задать ограничения поискового пространства для оценивания параметров всего комплекса в сборе.

2. В качестве инструмента минимизации целевой функции применен генетический алгоритм (ГА) с ограничением поискового пространства. Применение ГА позволило отойти от классических методов решения целевой функции и,

как следствие, отойти от проблемы, связанной с появлением разрывов первого и второго рода при взятии производных от зашумленного сигнала.

3. В результате экспериментальной апробации разработанной методики были получены параметры схемы замещения исследуемого комплекса, которые позволили, основываясь только на данных, полученных на входе кабельной линии, восстановить сигнал полной потребляемой мощности с приемлемой точностью.

4. Разработанная методика станет одним из основных компонентов при реализации наблюдателя вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель». В свою очередь, разработанный наблюдатель ляжет в основу векторной системы управления погружным электродвигателем, что позволит правильно, с точки зрения электропривода, переводить низко- и среднедебитные скважины на периодический режим эксплуатации без существенного снижения среднего срока наработки на отказ.

Список источников

1. Nogovitsyn R., Sokolov A. Preliminary Calculation of the EROI for the Production of Gas in Russia // *Sustainability*. 2014. Vol. 6 (10). P. 6751–6765. doi:10.3390/su6106751.

2. Алексеев А.П. Путь навверх // *Сибирская нефть — корпоративный журнал ПАО «Газпром Нефть»*. 2018. № 149. С. 14–19.

3. Лихачева Е.А., Островский В.Г., Лыкова Н.А., Мусинский А.Н., Байдаров П.А. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации // *ПРОнефть. Профессионально о нефти*. 2021. Т. 6, № 1. С. 54–58. doi: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58. EDN: BYHGJK.

4. Антипин М.Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО «Самотлорнефтегаз» // *Инженерная практика*. 2011. № 5. С. 74–80.

5. 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. Оптимизация порядка реду-

цированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, №9. С. 154–167. doi: 10.18799/24131830/2021/9/3365.

6. Буньков Д.С. Обзор методов оценивания параметров схемы замещения асинхронной электрической машины для организации векторной системы управления // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2021. Т. 17, № 3–4. С. 24–38. doi: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-24-38. EDN: DDOOHW.

7. Аникин В.В. Методика и средства предварительной идентификации параметров модели послеремонтных регулируемых погружных асинхронных электродвигателей: дисс. ... канд. техн. наук. Ханты-Мансийск, 2020. 182 с.

8. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Идентификация параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроцентробежных насосов для добычи нефти // *Актуальные проблемы энергетики*

АПК: материалы V Международной науч.-практ. конф. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2014. С. 178–183. EDN: SDPAUN.

9. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 123–131. EDN: YGSRYP.

10. Леонов А.П., Редько В.В. Определение параметров схемы замещения кабельных изделий при испытаниях по категории «ЭИ-2» // Кабели и провода. 2014. Т. 345, № 2. С. 18–21. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48.

11. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Якимов С.Б., Клусов А.А. Учет условий эксплуатации при проектировании периодических режимов работы скважин, оборудованных УЭЦН // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса Equipment and Technologies for oil and Gas Complex. 2013. № 6. С. 33–39. EDN: RQALCX.

12. Ивановский В.Н., Сазонов Ю.А., Сабиров А.А., Соколов Н.Н., Донской Ю.А. О некоторых перспективных путях развития УЭЦН // Территория нефтегаз. 2008. № 5. С. 24–33. EDN: KNPXVH.

13. Дроздов А.Н. Эксплуатация скважин, оборудованных УЭЦН на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами // Территория нефтегаз. 2008. № 10. С. 82–85. EDN: KNPXCV.

14. 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. Т. 19, № 1. С. 24–48. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48.

15. 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.

16. 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.

17. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. СПб.: Лань, 2021. 512 с. ISBN 978-5-8114-1887-9.

18. 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).

References

1. Nogovitsyn R., Sokolov A. Preliminary Calculation of the EROI for the Production of Gas in Russia. *Sustainability*, 2014, Vol. 6 (10), pp. 6751–6765. doi:10.3390/su6106751.

2. Alekseev A.P. Put' naverkh [Way up]. *Sibirskaya nef't' — korporativnyi zhurnal PAO «Gazprom Nef't'» — Siberian Oil — Corporate Magazine of PJSC Gazprom Nef't*, 2018, No. 149, pp. 14–19. [in Russian].

3. Likhacheva E.A., Ostrovskii V.G., Lykova N.A., Musinskii A.N., Baidarov P.A. Nadezhnost' pogruzhnykh nef'tyanykh nasosov pri periodicheskoi eksploatatsii [Oil Submersible Pumps Reliability during Cyclic Operation]. *PRoneft'. Professional'no o nef'ti — PRoneft. Professionally about Oil*, 2021, Vol. 6, No. 1, pp. 54–58. doi: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58. EDN: BYHGJK. [in Russian].

4. Antipin M.N. Rezul'taty vnedreniya tsiklicheskoi eksploatatsii UETsN v OAO «Samotlorneftegaz» [Results of Implantation of the Electrical Submersible Cyclic Operation Pump Units on JSC «Samotlorneftegaz»]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2011, No. 5, pp. 74–80. [in Russian].

5. 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. Optimizatsiya poryadka redutsirovannoi dinamicheskoi modeli nena-gruzhennogo neftepogruzhnogo kabelya na osnove approksimatsii amplitudno-chastotnoi kharak-teristiki [Unloaded Oil-Submersible Cable Reduced Dynamic Model Order Optimization Based on the Frequency Response Approximation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, Vol. 332, No. 9, pp. 154–167. doi: 10.18799/24131830/2021/9/3365. [in Russian].

6. Bun'kov D.S. Obzor metodov otsenivaniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoi elektricheskoi mashiny dlya organizatsii vektornoii sistemy upravleniya [The Review Methods of Induction Machine Equivalent Circuit Parameters Estimation for Field Oriented Control Implementation]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 3–4, pp. 24–38. doi: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-24-38. EDN: DDOOHW. [in Russian].

7. Anikin V.V. *Metodika i sredstva predvaritel'noi identifikatsii parametrov modeli posle-remontnykh reguliruemyykh pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelei: diss. ... kand. tekhn. nauk.* [Methods and Means of Preliminary Identification of Model Parameters after Repair of Adjustable Submersible Asynchronous Electric Motors: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Khanty-Mansiisk, 2020. 182 p. [in Russian].

8. Anikin V.V., Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M. Identifikatsiya parametrov pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelei ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefiti [Identification of parameters of submersible asynchronous electric motors of electric centrifugal pump installations for oil production]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy energetiki APK»: materials of the V International scientific and practical. conf.* [Materials of the V International Scientific and Practical Conference «Current Problems of Energy of the Agro-Industrial Complex»]. Saratov, Saratovskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet im. N.I. Vavilova, 2014, pp. 178–183. EDN: SDPAUN. [in Russian].

9. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Metod identifikatsii parametrov pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelei ustanovok elektroprivodnykh tsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefiti [Method for Identifying Parameters of Submersible Induction Motors of Electrical Submersible Pump Units for Oil Production]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geo-resursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, Vol. 328, No. 1, p. 123–131. EDN: YGSRYP. [in Russian].

10. Leonov A.P., Red'ko V.V. Opreделение parametrov skhemy zameshcheniya kabel'nykh izdelii pri ispytaniyakh po kategorii «EI-2» [Determination of the Parameters of the Equivalent Circuit of Cable Products When Tested according to Category «EI-2»]. *Kabeli i provoda — Cables and Wires*, 2014, Vol. 345, No. 2, pp. 18–21. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48. [in Russian].

11. Ivanovskii V.N., Sabirov A.A., Yakimov S.B., Klusov A.A. Uchet uslovii ekspluatatsii pri proektirovanii periodicheskikh rezhimov raboty skvazhin, oborudovannykh UETsN [Accounting of Operational Conditions while Designing Periodic Operational Modes of Wells, Equipped by Electric Submersible Pumping Units]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2013, No. 6, pp. 33–39. EDN: RQALCX. [in Russian].

12. Ivanovskii V.N., Sazonov Yu.A., Sabirov A.A., Sokolov H.H., Donskoi Yu.A. O nekotorykh perspektivnykh putyakh razvitiya UETsN [On Some Potential Ways of ESP Development]. *Territoriya neftegaz — Neftegaz Territory*, 2008, No. 5, pp. 24–33. EDN: KNPXVH. [in Russian].

13. Drozdov A.N. Ekspluatatsiya skvazhin, oborudovannykh UETsN na mestorozhdeniyakh s trudnoizvlekaemymi zapasami [Operation of Wells Equipped with ESP in Fields with HTR Reserves]. *Territoriya neftegaz — Neftegaz Territory*, 2008, No. 10, pp. 82–85. EDN: KNPXCV. [in Russian].

14. 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, Vol. 19, No. 1, pp. 24–48. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48. EDN: CTDOAF. [in Russian].

15. 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 Three Phase Symmetrical Network]. Patent RF, No. 2689994, 2019. [in Russian].

16. 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].

17. 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. ISBN 978-5-8114-1887-9. [in Russian].

18. *Rezul'taty eksperimentov dlya stat'i «Geneticheskii algoritm v zadache dinamicheskoi identifikatsii parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya»: Personal'naya stranitsa I. V. Rakova.* [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].

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 09.10.2023; принята к публикации 11.10.2023.

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 09.10.2023; accepted for publication 11.10.2023.

Научная статья

УДК 621.313.13

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-118-132

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ЗАМКНУТЫМ СПИРАЛЬНЫМ ВТОРИЧНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

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

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

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

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

**Евгений Михайлович Федосов****Evgeny M. Fedosov**

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

**Андрей Викторович Лобанов****Andrey V. Lobanov**

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

**Тагир Рафаилович Терезулов****Tagir R. Teregulov**

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

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

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

**Андрей Викторович Стыскин****Andrey V. Styskin**

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

Актуальность

Разработка новых конструкций электромеханических вибрационных преобразователей (ЭМВП) является актуальной задачей и вызвана необходимостью создания устройств, удовлетворяющих в той или иной мере многим, зачастую противоречивым, требованиям по точности и пределам измерения, частотному диапазону, чувствительности, габаритным размерам, массе, стоимости, эксплуатационным характеристикам и т.д.

Важной предпосылкой решения поставленных задач является исследование и разработка новых перспективных элементов конструкции электромеханических преобразователей, материалов, комплектующих изделий, специальных технологических процессов производства.

Быстрое развитие науки и техники обуславливает большое разнообразие и усложнение автоматических систем управления. Создаются инвариантные, самонастраивающиеся и другие комплексные информационно-измерительные и управляющие системы, к которым предъявляются повышенные требования.

Современное развитие автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими и физическими процессами характеризуется широким использованием первичных средств сбора и обработки информации. При этом электромеханические вибрационные преобразователи ЭМВП-датчики параметров вибрации являются звеном любой информационно-зрительной или управляющей системы и практически определяют ее метрологические характеристики. Потери в точности и надежности конечного результата, связанные с неудачным применением датчика, неспособна восстановить самая совершенная система преобразования информации.

Номенклатура выпускаемых промышленностью вибрационных датчиков ограничена, а их эффективная эксплуатация и оценка результатов эксперимента весьма затруднительны. Отсутствие четких рекомендаций по выбору того или иного типа датчика, обоснованных методик инженерных расчетов и экспериментальных исследований, анализа предельных эксплуатационных и технологических возможностей привело к тому, что многие типы и конструкции датчиков оказались нежизнеспособными.

Большое количество публикаций, связанных с проектированием новых конструкций вибрационных датчиков различного назначения и совершенствованием уже известных, позволяет судить о неослабевающем интересе разработчиков к этому классу устройств, особенно с развитием технических роботов и гибких модулей.

Ключевые слова

генерация, низкочастотные колебания, спиральная пружина, продольные прорези, пластина, вихревые токи, скос, магнитное число Рейнольдса, угловое ускорение

Отсутствие основ теории и инженерных методик расчета статических характеристик ЭМВП в режиме как датчика, так и двигателя со спиральным электропроводящим элементом ограничивает возможность рационального их проектирования для информационно-измерительных и управляющих систем. Поэтому задачи исследования и создания высокоэффективных ЭМВП со спиральным вторичным элементом, наиболее полно удовлетворяющих специальным требованиям со стороны систем управления, актуальны.

Цель исследования

Исследование вибрационного преобразователя (ЭМВП) с замкнутым спиральным вторичным элементом в режиме генерации низкочастотных колебаний и улучшения механических данных за счет выполнения продольных прорезей со скосом в спиральной электропроводящей пружине.

Методы исследования

Литературный обзор и патентная проработка, методы математического моделирования и экспериментальных исследований вибрационных колебаний.

Результаты

Впервые разработаны метод и методология проектирования электромеханических вибрационных преобразователей со спиральным вторичным элементом с теоретическим и экспериментальным подтверждением основных полученных положений.

Разработан натурный образец с теоретическими положениями, получен патент РФ, показана возможность использования конструкционного решения в бытовых приборах (планшетах, ноутбуках, часах электронных, наноробототехнике, сосудистой медицине и кардиологии, передаче информации как элементы GPS и GSM и т.д.).

Для цитирования: Янгиров И. Ф., Халиков А. Р., Федосов Е. М., Лобанов А. В., Терегулов Т. Р., Максудов Д. В., Стыскин А. В. Электромеханический вибрационный преобразователь с замкнутым спиральным вторичным элементом и улучшенными характеристиками // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 118-132. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-118-132>.

Original article

ELECTROMECHANICAL VIBRATION TRANSDUCER WITH A CLOSED SPIRAL SECONDARY ELEMENT AND IMPROVED CHARACTERISTICS

Relevance

The development of new designs of electromechanical vibration transducers (EMVT) is an urgent task and is caused by the need to create devices that meet to one degree or another many, often contradictory requirements for accuracy and measurement limits, frequency range, sensitivity, overall dimensions, weight, cost, performance characteristics, etc.

An important prerequisite for solving the set tasks is the study and development of new promising structural elements of electromechanical converters, materials, components, special production processes.

The rapid development of science and technology causes a great variety and complexity of automatic control systems. Invariant, self-adjusting and other complex information-measuring and control systems are created, to which increased requirements are imposed.

Keywords

generation, low-frequency oscillations, spiral spring, longitudinal slots, plate, eddy currents, bevel, magnetic Reynolds number, angular acceleration

The modern development of automated monitoring and control systems for various technological and physical processes is characterized by the widespread use of primary means of collecting and processing information. At the same time, electromechanical vibration transducers EMVP-sensors of vibration parameters are a link in any information-visual or control system and practically determine its metrological characteristics. Losses in the accuracy and reliability of the final result associated with unsuccessful use of the sensor cannot be restored by the most advanced information conversion system.

The range of industrially produced vibration sensors is limited, and their effective operation and evaluation of experimental results is very difficult. The lack of clear recommendations for choosing one type of sensor or another, sound methods of engineering calculations and experimental studies, and analysis of limiting operational and technological capabilities has led to the fact that many types and designs of sensors turned out to be unviable.

A large number of publications related to the design of new designs of vibration sensors for various purposes and the improvement of already known ones allows us to judge the continued interest of developers in this class of devices, especially with the development of technical robots and flexible modules.

The lack of fundamental theory and engineering methods for calculating the static characteristics of electric motors in the mode of both a sensor and a motor with a spiral electrically conductive element limits the possibility of their rational design for information-measuring and control systems. Therefore, the tasks of researching and creating highly efficient EMVPs with a spiral secondary element that most fully satisfy the special requirements of control systems are relevant.

Aim of research

To investigate a vibration transducer (EMVT) with a closed spiral secondary element in the mode of generating low-frequency vibrations and improving mechanical data due to the execution of longitudinal slits with a bevel in a spiral electrically conductive spring.

Research methods

Literary review and patent study, methods of mathematical modeling and experimental studies of vibration oscillations.

Results

For the first time, a method and methodology have been developed for the design of electromechanical vibration converters with a spiral secondary element with theoretical and experimental confirmation of the main obtained positions.

A full-scale sample with theoretical provisions was developed, a patent of the Russian Federation was obtained, the possibility of using a structural solution in household devices (tablets, laptops, electronic watches, nanorobototechnology, vascular medicine and cardiology, information transmission as GPS u GSM elements, etc.) was shown.

For citation: Yangirov I. F., Khalikov A. R., Fedosov E. M., Lobanov A. V., Teregulov T. R., Maksudov D. V., Styskin A. V. Elektromekhanicheskii vibratsionnyi preobrazovatel' s zamknutym spiral'nym vtorichnym elementom i uluchshennymi kharakteristikami [Electromechanical Vibration Transducer with a Closed Spiral Secondary Element and Improved Characteristics]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 118-132. [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-118-132>.

Введение

В данной работе исследуется электро-механический вибрационный преобразователь (ЭМВП) с замкнутым спиральным вторичным элементом [1–3] за счет выполнения продольных прорезей со скосом в спиральной электропроводящей пружине, который найдет применение в приборостроении, машиностроении благодаря своей многофункциональности, улучшенным метрологическим и механическим характеристикам.

В работе решается задача по определению выходной характеристики новой конструкции ЭМВП-двигателя с учетом скоса продольных прорезей [4] для возможности создания инженерной методики расчета и оптимизационных решений. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации элементов автоматики подобного назначения. Анализ существующих в настоящее время таких преобразователей показывает, что все же возникает потребность в разработке новых преобразователей, генераторов крутильных колебаний и датчиков угловых ускорений и скоростей в целях расширения их метрологических функциональных характеристик и возможностей. В работе впервые представлена новая конструкция ЭМВП и впервые соответственно получены выражения для расчета выходных характеристик с учетом скоса продольных различного размера прорезей в спиральной пружине, что говорит о новизне представленной работы в области электромеханики и автоматики [5–7].

Задача исследования. Предлагается конструкция ЭМВП, отличающегося от ранее известной конструкции [1] тем, что продольные прорези выполнены в электропроводящей спиральной пружине и прорезаются под некоторым углом α . Такое исполнение продольных прорезей за счет компенсации высших

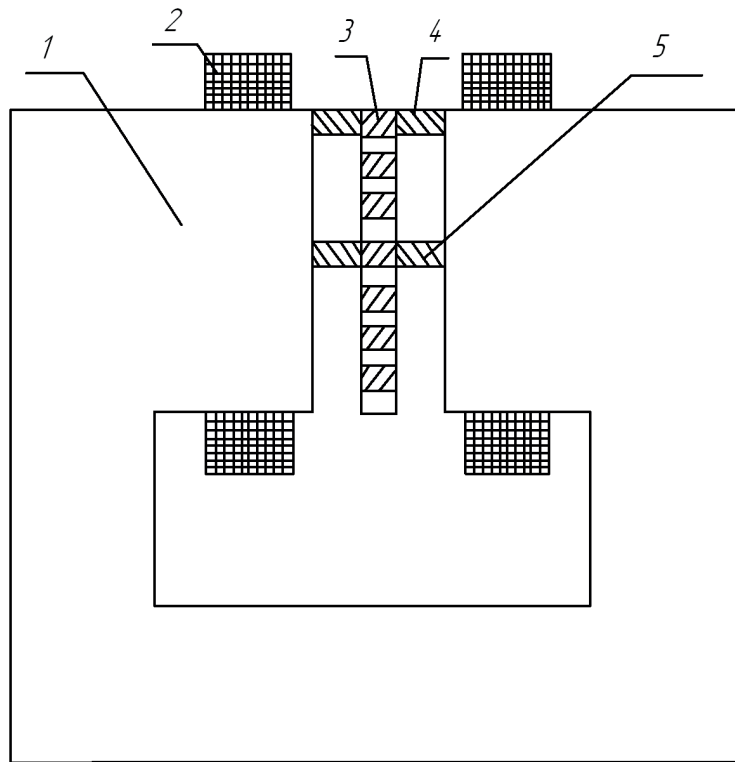
нечетных гармоник $\nu = 3, 5, 7, \dots$ приводит к улучшениям метрологических и механических характеристик ЭМВП, т.е. уничтожается спектр сигналов, искажающих информационный сигнал, исходящих непосредственно от объекта, в случае генератора крутильных колебаний компенсируется тормозящий момент от нечетных высших гармоник [8]. На рисунке 1 изображена схема конструкции в сечении.

Конструкция

Устройство для крутильных колебаний с короткозамкнутой спиральной плоской пружиной [1, 3] имеет определенное преимущество перед другими вибрационными машинами. Конструкция (рисунок 1) содержит шихтованный магнитопровод 1 с обмоткой переменного тока 2. Электропроводящая плоская пружина 3 расположена в воздушном зазоре магнитопровода 1, крепится жестко на осях 4 и 5, причем ось 4 подвижна для крутильных колебаний. При подключении обмотки 2 на источник переменного тока в зазоре создается переменное магнитное поле. Последнее индуцирует в короткозамкнутой спирали 3 ток, между токопроводящими витками спирали возникает переменная электродинамическая сила. Сила, закручивая и раскручивая спирали, заставляет ось 4 соответственно закручиваться и раскручиваться, тем самым создавая попеременный по знаку вращающий момент. То же самое возможно при подвижной оси 4, т.е. режим вибродвигателя или генератора низкочастотных колебаний [9–12].

Методы исследования

При решении задачи использованы общепринятые допущения [5, 8], которые далее корректировались известными поправочными коэффициентами. Для решения задачи в работе были использованы методы теории электрических



1 — магнитопровод; 2 — обмотка переменного тока; 3 — короткозамкнутая спиральная пружина; 4, 5 — оси крепления пружины

1 — magnetic conductor; 2 — AC winding; 3 — short-circuited coil spring; 4, 5 — axes of spring attachment

Рисунок 1. ЭМВП-двигатель с короткозамкнутой спиральной пружиной

Figure 1. EMVT-motor with a short-circuited spiral spring

цепей, уравнения механики и электродинамики, методы математического анализа и эксперимента вибрационной техники.

Решение задачи

Для определения выходной характеристики представляется расчетная схема участок спирального электропроводящего элемента в виде плоскопараллельной пластины с прорезями со скосом (рисунок 2), что справедливо при общепринятых допущениях.

Электромагнитные процессы в электромагнитных ЭМВП описываются уравнениями Максвелла для медленно движущихся изотропных и проводящих сред. В системе координат, жестко связанной с электропроводящей, для комплексных амплитуд они будут следующими [8]:

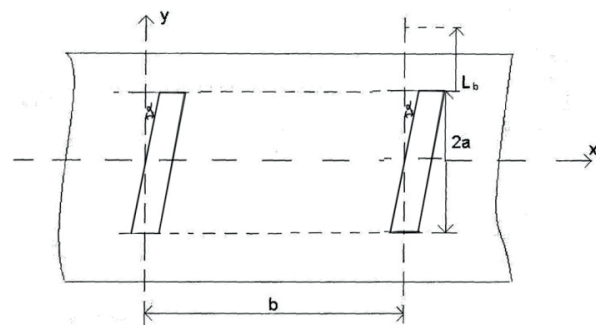


Рисунок 2. Схема расчета участка спирального элемента со скосом прорезей

Figure 2. Calculation diagram of helical element section with slot bevel

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\delta} + \vec{\delta}_{\text{ст}}; \quad \text{rot } \vec{E} = -j\omega\vec{B};$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}; \quad \vec{\delta} = \sigma\vec{E}, \quad (1)$$

где $\vec{\delta}_{\text{ст}}$ — плотность стороннего тока.

Решение этих уравнений с учетом всех конструктивных особенностей преобразователя не представляется возможным. Поэтому при решении принимаются допущения, мало искажающие реальную картину электромагнитных процессов: толщина рабочего зазора значительно меньше среднего радиуса и магнитное поле плоскопараллельно; индукция первичного магнитного поля в воздушном зазоре задана основной пространственной гармоникой; вне индуктора поле равно нулю; плотность вихревых токов по толщине пружины постоянна; магнитная проницаемость материала пружины равна μ_0 , а магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности; ширина прорези со скосом мала по сравнению с расстоянием между прорезями.

Для определения параметров ЭМВП двигателя необходимо найти распределение магнитного поля в зазоре, а также плотности вихревых токов в пружине. Согласно принятым допущениям, напряженность магнитного поля имеет одну составляющую по оси z , а плотности токов будут иметь две составляющие:

$$\vec{\delta}_x = \frac{\partial \vec{H}z}{\partial y}; \quad \vec{\delta}_y = \frac{\partial \vec{H}z}{\partial x}. \quad (2)$$

Здесь и далее индекс z у напряженности магнитного поля для краткости опускается.

Магнитное поле определяется в виде суммы поля индуктора (известное поле) H_0 и поля индуцированных вихревых токов H . Тогда из (1) с учетом принятых допущений можно получить [6, 13] в активной зоне (система координат $x\theta y$, $0 < x < b$, $-a < y < a$):

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} - j\varepsilon_f \alpha^2 H_a = j\varepsilon_f \alpha^2 \dot{H}_0 e^{-j\alpha x}, \quad (3)$$

где $\alpha = \pi / \tau$; τ — полюсное деление;

$\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$ — магнитное число Рейнольдса;

$\omega = p\Omega / t$; Ω — угловая скорость генерации;

k_d — коэффициент приведения, учитывающий влияние насыщения магнитной системы.

Решение уравнения (3) для электромагнитной силы, действующей на активную зону спиральной пружины,

$$F_x = \int_x \int_y \int_z f_{xcp} dx dy dz = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \alpha \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f} 2bl_{cp} \Delta, \quad (4)$$

где Δ — толщина пружины;

l_{cp} — средний периметр рабочего спирального тела.

С учетом того, что $\alpha = \pi / 2a$, получим окончательно для интегральной электромагнитной силы:

$$F_z = \frac{\pi}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}. \quad (5)$$

Момент на валу ЭМВП

$$M_z = \frac{\pi}{2} \frac{\mu_0 H_{1m}^2}{k_d} \Delta l_{cp} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} R. \quad (6)$$

Возможно функционирование исходного ЭМВП как датчика угловых ускорений. Из основного уравнения динамики [7], контролируемое угловое ускорение датчика:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} \frac{\mu_0 H_{1m}^2}{k_d} \frac{\Delta l_{cp}}{mR} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f} = \varepsilon_{баз} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}, \quad (7)$$

где m — масса тонкостенной спиральной пружины;

$\varepsilon_{баз}$ — базовое контролируемое ускорение.

Используя значения для МЧР или для критической скорости, можно найти нужные параметры, изменив которые можно получить требуемую выходную характеристику. Например, для того чтобы сместить максимум сигнала в область более высоких скоростей, нужно увеличить числитель (число пар полюсов или зазор) или уменьшить знаменатель (радиус, толщину или электропро-

водность материала спиральной пружины).

На рисунке 3 представлена выходная характеристика ЭМВП-датчика без прорезей с немагнитным рабочим телом ($\nu = \infty$) $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{баз}}}$.

При проектировании различных электромеханических устройств возникают различные требования к их выходным характеристикам — для одних существенно линейность зависимости крутизны характеристики и чувствительности от скорости, для других желательно иметь максимальное значение чувствительности, для третьих важно малое изменение их в определенном диапазоне скоростей. Эти вопросы могут быстро решаться путем анализа значения МЧР: если $\varepsilon \ll 1$, то зависимость выхода от скорости практически линейна; если

$\varepsilon_f = 1$, то выходные характеристики близки к максимуму и т.д.

В результате решения математической модели преобразователя со спиральным чувствительным элементом [3] и учетом влияния скоса прорезей, получено выражение в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{баз}} (\varepsilon_i^* + k_c \Delta \varepsilon_i^*), \quad (8)$$

где $\varepsilon_i^* = \frac{2\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}$ — относительное угловое ускорение без краевого эффекта и скоса [3];

$\Delta \varepsilon_i^*$ — дополнительное ускорение в о.е. в случае наличия прорезей и скоса;

k_c — коэффициент учета скоса прорезей [8];

$\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$ — магнитное число Рейнольдса [4].

На рисунке 4 представлены выходные характеристики с прорезями со скосом в о. е.

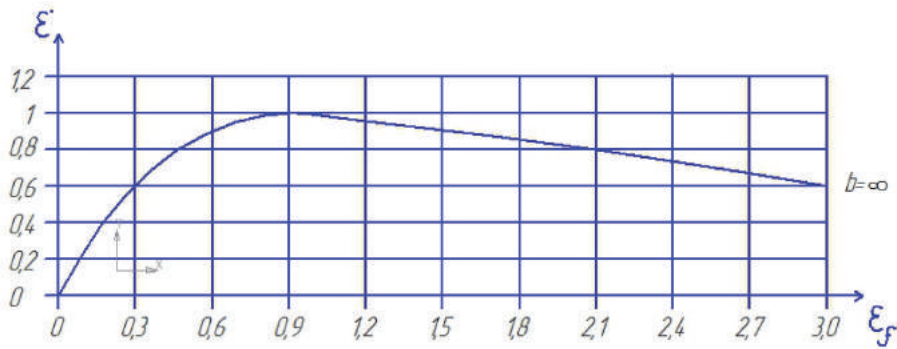


Рисунок 3. Выходная характеристика ЭМВП-датчика без прорезей (о. е.)

Figure 3. Output characteristic of EMVT-sensor without slots (r. u.)

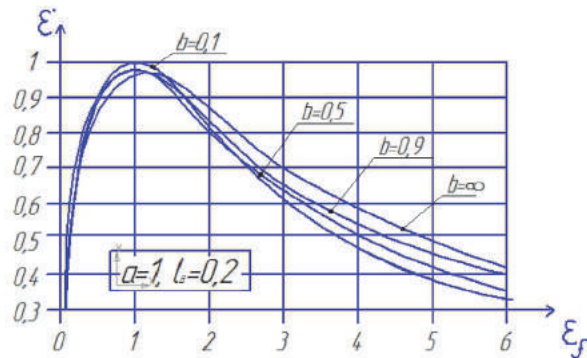


Рисунок 4. ЭМВП-датчика с прорезями со скосом

Figure 4. EMVT-sensor with slits with bevel

Из анализа кривых рисунка 4 видно, что выполнение ЭМВП-датчика с прорезями на спиральной пружине приводит к повышению крутизны преобразовательной характеристики и чувствительности, и с увеличением числа прорезей эти характеристики возрастают со смещением в сторону малых частот. Особенно эффективно применение прорезей со скосом в маломощных подобных преобразователях.

Выходная характеристика ЭМВП-датчика:

$$E = 4,44 f k_{об} W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m} = \frac{2,22 \omega}{\pi} k_{об} W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m}, \quad (9)$$

где ω — угловая скорость ЭМВП.

Чувствительность ЭМВП:

$$\beta = \frac{dE}{d\omega} = \frac{2,22}{\pi} k_{об} W_2 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m}, \quad (10)$$

где введя базовую чувствительность вида (рисунок 5):

$$\beta^{баз} = \frac{2,22}{\pi} k_{об} W_2 s H_{1m},$$

$$\beta^* = \beta / \beta^{баз} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2}}}.$$

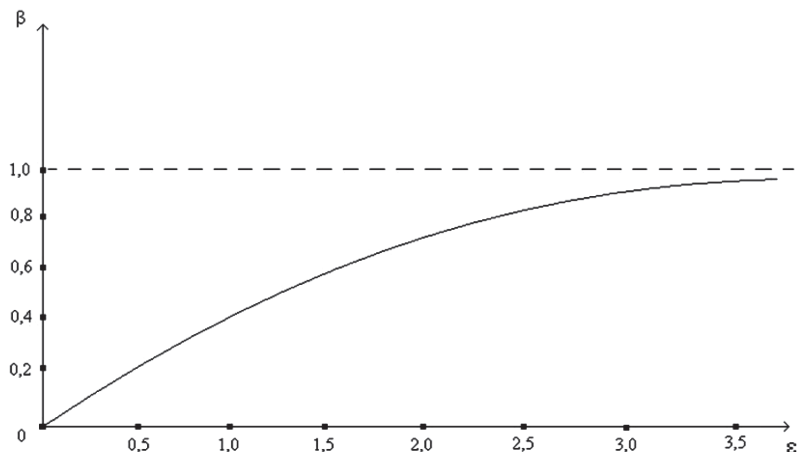


Рисунок 5. Зависимость чувствительности ЭМВП-датчика от МЧР в о. е.

Figure 5. Dependence of EMVT-sensor sensitivity on MRN in r. u.

Такой ЭМВП найдет широкое применение для высокоточных измерений оборотов и угловых ускорений контролируемых объектов различного функционального назначения.

Экспериментальные исследования

Для демонстрации работы физической модели авторами разработан стенд (рисунок 7) [14–16, 22]. Сила электродинамического взаимодействия между витками спиральной пружины ЭМВП определяется по воздействию переменного магнитного поля от обмотки переменного тока и токами в КЗВ (витка спиральной пружины) [6, 8].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований конструкций ЭМВП приведены на рисунке 9 для БрОЦ4-3 ($E = 1,15 \times 10^{11}$ Н/м², $\sigma = 1,5 \times 10^8$ Н/м², $\rho = 8800$ кг/м³) и для БрБ2 ($E = 1,35 \times 10^{11}$ Н/м²; $\sigma = 1,5 \times 10^8$ Н/м², $\rho = 8230$ кг/м³). Геометрические размеры: $R_1 = 1,5 \times 10^{-3}$ м; $h = 3,11 \times 10^{-5}$ м; $b = 3,11 \times 10^{-4}$ м; $L = 28,5 \times 10^{-3}$ м; $R_2 = 1,95 \times 10^{-3}$ м; $w = 3$; $c = 0,15 \times 10^{-3}$ м. Собственные частоты колебаний для БрОЦ4-3 — 31,4 Гц, для БрБ2 — 35,2 Гц.

Все утверждения были проверены на экспериментальной модели и стендах (рисунки 6–11).



1 — электромагнитная пушка; 2 — источник переменного тока

1 — electromagnetic gun; 2 — AC source

Рисунок 6. Испытательный стенд

Figure 6. Test bench



1 — экспериментальная физическая модель с короткозамкнутыми насадками (медь, алюминий, латунь, бронза); 2 — регулируемый источник переменного тока ($U = 0 \div 220$ В); 3 — осциллограф (Gwinstek GOS-620); 4 — стрелочный амперметр; 5 — стрелочный вольтметр; 6 — мультитестер; 7 — измерительный штангенциркуль

1 — experimental physical model with short-circuited nozzles (copper, aluminum, brass, bronze); 2 — adjustable alternative current source ($U = 0 \div 220$ В); 3 — oscilloscope (Gwinstek GOS-620); 4 — switch ammeter; 5 — switch voltmeter; 6 — multitester; 7 — measuring caliper

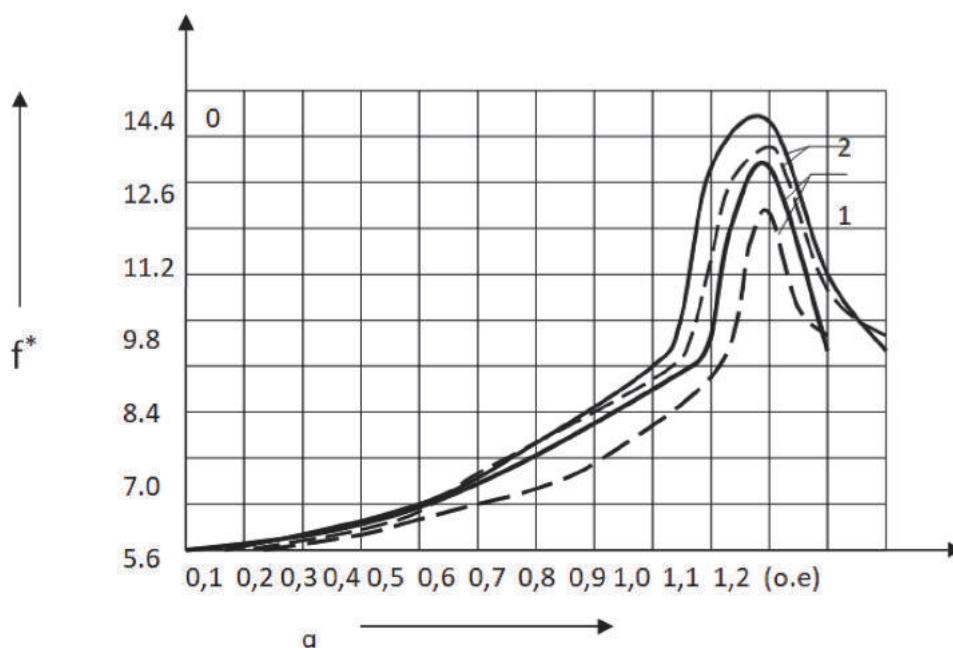
Рисунок 7. Опытно-испытательный стенд для исследования электродинамической силы межоборотного взаимодействия в вибропреобразователе (электромагнитной пушке)

Figure 7. Experimental test bench for investigation of electrodynamic force of interturn interaction in vibration transducer (electromagnetic gun)



Рисунок 8. Стенд для исследования физической модели

Figure 8. Physical model test stand



1 — — экспериментальная кривая; 2 - - - — теоретическая кривая

1 — — experimental curve; 2 - - - — theoretic curve

Рисунок 9. Результаты экспериментов

Figure 9. Experiments results

Экспериментальная проверка полученных соотношений на опытных образцах позволяет сделать вывод, что рассчитанные значения выходной характери-

стики совпадают с опытными в пределах точности эксперимента (не более 14 %) по сравнению с физической моделью и теоретически полученными.

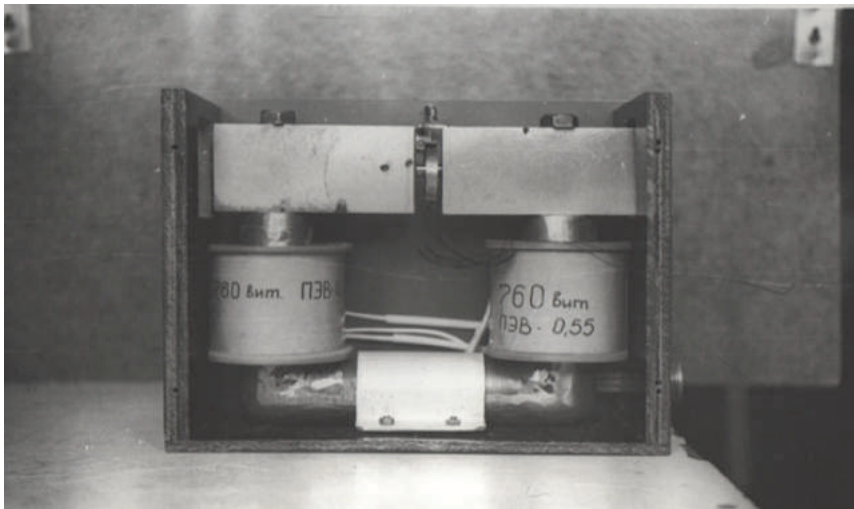


Рисунок 10. Экспериментальная модель ЭМВП-двигателя

Figure 10. Experimental model of the EMVT-engine

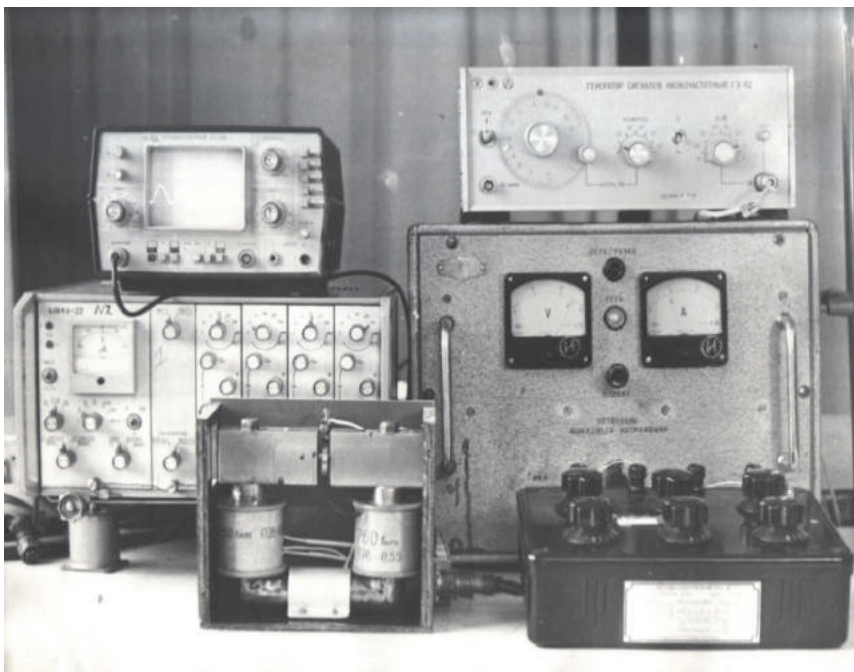


Рисунок 11. Общий вид экспериментальной установки для ЭМВП

Figure 11. General view of the experimental unit for EMVT

Выводы

1. Выполнение в ЭМВП на спирали прорезей на диамантных насадках КЗВ со скосом приводит к повышению крутизны (до 1,2–1,3 раза) механической характеристики, и с увеличением числа прорезей эти характеристики возрастают со смещением в сторону малых частот. Особенно эффективно применение прорезей под углом в маломощных ЭМВП.

2. Впервые для исследования электромеханического преобразователя со спиральным вторичным элементом использованы физическая модель в виде электромагнитной пушки и основные уравнения механики и электродинамики во взаимосвязи для составления математической модели двигателя и соответственно аналитического их решения.

3. Решением математической модели получены аналитические выражения для расчета механических характеристик соответственно для ЭМВП с экспериментальным подтверждением для различных физических моделей, что составляет не более 16 % и вполне пригодны для инженерных расчетов.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований исходного преобразователя по качественным и количественным оценкам позволяют утверждать, что они найдут специальное применение в энергетике, электромашиностроении, медицине и т.д.

5. Приведена оригинальная конструкция ЭМВП-датчика со спиральным

вторичным элементом со скосом прорезей, обладающая повышенной чувствительностью и крутизной преобразовательной характеристики, расширенными функциональными возможностями и быстродействием, улучшенными метрологическими характеристиками.

6. Выведены аналитические соотношения для анализа и проектирования ЭМВП с учетом и без учета краевых эффектов при наличии продольных прорезей со скосом в чувствительном элементе в зависимости от МЧР, использованы так же результаты работы, полученные авторами в ранних работах [17–22].

Список источников

1. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Хайруллин Т.И. Магнитоэлектрический преобразователь-электродвигатель // Машиностроитель. 1992. № 9. С. 14.

2. Хайруллин И.Х. Исмагилов, Ф.Р., Янгиров И.Ф., Хайруллин Т.И. Устройство для возбуждения крутильных колебаний // Машиностроитель. 1993. № 7, 8. С. 19.

3. Янгиров И.Ф., Ахметова Е.О. Математическая модель спирального преобразователя с учетом основных электромеханических параметров // Научные технологии в машиностроении: Матер. Всерос. науч.-практ. конф., 17-18 мая 2013 г., г. Ишимбай. 2013. С. 59–61.

4. Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом // Электротехника. 2008. № 5. С. 14–18.

5. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Тахогенератор-акселерометр с улучшенными метрологическими характеристиками // Электричество. 2011. № 9. С. 63а–66. EDN: OCBLRJ.

6. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Сагтаров Р.Р. Электромагнитные демпферы с продольными прорезями полого ротора // Электротехника. 2000. № 8. С. 27–29. EDN: GKFUGR.

7. Пат. 2003110 РФ, МПК G01P 15/105. Акселерометр / И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров. 04906100; Заявлено 01.30.1991; Опубл. 15.11.1993.

8. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 192 с.

9. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968. 556 с.

10. Базаров Н.Х. Автоматика вибростроения. Ташкент: Узбекистан, 1976. 119 с.

11. Базаров Н.Х. Теоретические аспекты создания автоматизированных виброэлектроприводов // Автоматизированный электропривод: сб. ст. / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 542 с.

12. Белый И.В., Пешков П.М., Новаковская М.М. Влияние геометрических параметров плоского спирального индуктора на распределение давления и температуры в обрабатываемой заготовке // Изв. вузов. Электромеханика. 1985. № 1. С. 97–102.

13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Под общ. ред. И.Г. Арамоновича. М.: Наука, 1984. — 831 с.

14. Азовцев Ю.А., Баркова Н.А., Гаузе А.А. Вибрационная диагностика роторных машин и целлюлозно-бумажных комбинатов / СПбГУРП. 2014. 127 с.

15. Васильева Р.В. Вибростенды для тарировки виброметров и акселерометров в широком диапазоне частот // Серия: Передовой научно-технический и производственный опыт / Акад. наук СССР. Филиал Всесоюз. ин-та науч. и техн. информации. Приборы для измерения колебаний, вибраций, деформаций, перемещений, линейных и угловых размеров, скоростей, ускорений, времени, веса; Тема 31; № П-58-14/2. М.: Машгиз, 1958. 22 с.

16. Васильева Р.В., Цеханский К.Р., Шейнман Е.М., Фридлянд В.И. Аппаратура для исследования вибрации подшипников турбоагрегатов // Серия: К Всесоюзному совещанию работни-

ков промышленности по вопросам развития комплексной механизации и автоматизации производственных процессов и увеличения выпуска приборов и средств автоматизации/ М-во тяжелого машиностроения. Центр. науч.-исслед. ин-т технологии и машиностроения. М.: Машгиз, 1956. 12 с.

17. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015617007. Программа для расчета электромеханического вибрационного преобразователя с короткозамкнутым спиральным элементом / И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов. 2015614143, Заявл. 05.05.2015; Опубл. 20.07.2015.

18. Янгиров И.Ф. Преобразовательная характеристика преобразователя линейного ускорения // Приборы и системы управления. 2003. № 10. С. 47–51.

19. Yangirov I.F. Oscillation Eigenfrequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring // *Elektrotehnika*. 2011. No. 11. P. 58–61.

20. Yangirov I.F. Determining the Vibrational Eigenfrequency of the Spiral in Electomechanical Converters // *Russian Electrical Engineering*. 2002. No. 73. P. 83–88.

21. Янгиров И.Ф., Лобанов А.В., Халиков А.Р. Высоковольтный двухспиральный магнитокумулятивный генератор сильного магнитного поля // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. Т. 19. № 1. С. 106–116. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-106-116. EDN: OEMQAR.

22. Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А., Федосов Е.М. Физическая модель для экспериментального исследования электромеханического вибрационного преобразователя со спиральным замкнутым вторичным элементом // *Автоматизация. Современные технологии*. 2023. Т. 77, № 1. С. 3–8. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-1-3-8. EDN: YBBBOM.

References

1. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Khairullin T.I. Magnitoelektricheskii preobrazovatel'-elektrodvigatel' [Magnetolectric Converter-Electric Motor]. *Mashinostroitel' — Mechanical Engineer*, 1992, No. 9, pp. 14. [in Russian].

2. Khairullin I.Kh. Ismagilov, F.R., Yangirov I.F., Khairullin T.I. Ustroistvo dlya vzbuzhdeniya krutil'nykh kolebanii [Device for Excitation of Torsional Vibrations]. *Mashinostroitel' — Mechanical Engineer*, 1993, No. 7, 8, pp. 19. [in Russian].

3. Yangirov I.F., Akhmetova E.O. Matematicheskaya model' spiral'nogo preobrazovatelya s

uchetom osnovnykh elektromekhanicheskikh parametrov [Mathematical Model of a Spiral Converter Taking into Account the Main Electromechanical Parameters]. *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii»*, 17-18 maya 2013 g., g. Ishimbai [All-Russian Scientific and Practical Conference «Knowledge-Intensive Technologies in Mechanical Engineering», May 17-18, 2013, Ishimbay]. 2013, pp. 59–61. [in Russian].

4. Yangirov I.F. Vibratsionnyi elektrodvigatel' so spiral'nym vtorichnym elementom [Vibration Electric Motor with a Spiral Secondary Element]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2008, No. 5, pp. 14–18. [in Russian].

5. Ismagilov F.R., Yangirov I.F. Takhogenerator-akselerometr s uluchshennymi metrologicheskimi kharakteristikami [Tachogenerator-Accelerometer with Improved Metrological Characteristics]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2011, No. 9, pp. 63a–66. EDN: OCBLRJ. [in Russian].

6. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Sattarov R.R. Elektromagnitnye dempferi s prodol'nymi prorezyami pologo rotora [Electromagnetic Dampers with Longitudinal Slots of a Hollow Rotor]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2000, No. 8, pp. 27–29. EDN: GKFUGR. [in Russian].

7. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Yangirov I.F. Akselerometr [Accelerometer]. Patent RF, No. 2003110, 15.11.1993. [in Russian].

8. Vol'dek A.I. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Induction Magnetohydrodynamic Machines with Liquid Metal Working Fluid]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 192 p. [in Russian].

9. Babakov I.M. *Teoriya kolebanii* [Oscillation Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 556 p. [in Russian].

10. Bazarov N.Kh. *Avtomatika vibromashin* [Automatic Vibration Machines]. Tashkent, Uzbekistan, 1976. 119 p. [in Russian].

11. Bazarov N.Kh. Teoreticheskie aspekty sozdaniya avtomatizirovannykh vibroelektroprivodov [Theoretical Aspects of Creating Automated Vibroelectric Drives]. *Sbornik statei «Avtomatizirovannyi elektroprivod»* [Collection of Articles «Automated Electric Drive»]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 542 p. [in Russian].

12. Belyi I.V., Peshkov P.M., Novakovskaya M.M. Vliyanie geometricheskikh parametrov ploskogo spiral'nogo induktora na raspredelenie davleniya i temperatury v obrabatyvaemoi zagotovke [Influence of Geometric Parameters of a Flat Spiral Inductor on the Distribution of Pressure

and Temperature in the Workpiece]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika — Izv. of Universities. Electromechanics*, 1985, No. 1, pp. 97–102. [in Russian].

13. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opre-deleniya, teoremy, formuly* [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers. Definitions, Theorems, Formulas]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 831 p. [in Russian].

14. Azovtsev Yu.A., Barkova N.A., Gauze A.A. *Vibratsionnaya diagnostika rotornykh mashin i tsellyulozno-bumazhnykh kombinatov* [Vibration Diagnostics of Rotary Machines and Pulp and Paper Mills]. SPbGURP. 2014. 127 p. [in Russian].

15. Vasil'eva R.V. *Vibrostendy dlya tarirovki vibrometrov i akselerometrov v shirokom diapazone chastot* [Vibration Stands for Calibration of Vibrometers and Accelerometers in a Wide Frequency Range]. *Seriya: Peredovoi nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi opyt. Akad. nauk SSSR. Filial Vsesoyuz. in-ta nauch. i tekhn. informatsii. Pribory dlya izmereniya kolebanii, vibratsii, deformatsii, peremeshchenii, lineinykh i uglovykh razmerov, skorostei, uskorenii, vremeni, vesa; Tema 31; № P-58-14/2* [Series: Advanced Scientific, Technical and Production Experience. Acad. Sciences of the USSR. Vsesoyuz Branch. Institute of Science and Tech. Information. Instruments for Measuring Oscillations, Vibrations, Deformations, Movements, Linear and Angular Dimensions, Speeds, Accelerations, Time, Weight; Topic 31; No. P-58-14/2]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 22 p. [in Russian].

16. Vasil'eva R.V., Tsekhanskii K.R., Sheinman E.M., Fridlyand V.I. *Apparatura dlya issledovaniya vibratsii podshpnikov turboagregatov* [Equipment for Studying the Vibration of Bearings of Turbine Units]. *Seriya: K Vsesoyuznomu soveshchaniyu rabotnikov promyshlennosti po voprosam razvitiya kompleksnoi mekhanizatsii i avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov i uvelicheniya vypuska priborov i sredstv avtomatizatsii. M-vo tyazhelogo mashinostroeniya. Tsentr. nauch.-issled. in-t tekhnologii i mashinostroeniya* [Series: To the All-Union Meeting of Industrial Workers on the Development of Complex Mechanization and Automation of Production Processes and Increasing the Production of Instruments and Automation Equipment. Ministry of Heavy Engineering. Center.

Scientific Research Institute of Technology and Mechanical Engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 12 p. [in Russian].

17. Yangirov I.F., Maksudov D.V. *Programma dlya rascheta elektromekhanicheskogo vibratsionnogo preobrazovatelya s korotkozamknutym spiral'nym elementom* [Program for Calculating an Electromechanical Vibration Transducer with a Short-Circuited Spiral Element]. Certificate of Registration of a Computer Program No. 2015617007, 20.07.2015. [in Russian].

18. Yangirov I.F. *Preobrazovatel'naya kharakteristika preobrazovatelya lineinogo uskoreniya* [Transforming Characteristic of the Transformer of Linear Acceleration]. *Pribory i sistemy upravleniya — Instruments and Control Systems*, 2003, No. 10, pp. 47–51. [in Russian].

19. Yangirov I.F. *Oscillation Eigenfrequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring* [Oscillation Eigenfrequency Determination of Electromechanical Transducers Spiral Spring]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2011, No. 11, pp. 58–61. [in Russian].

20. Yangirov I.F. *Determining the Vibrational Eigenfrequency of the Spiral in Electomechanical Converters*. *Russian Electrical Engineering*, 2002, No. 73, pp. 83–88.

21. Yangirov I.F., Lobanov A.V., Khalikov A.R. *Vysokovol'tnyi dvukhsiral'nyi magnitokumulyativnyi generator sil'nogo magnitnogo polya* [Double-Spiral Magnetic-Cumulative Source of Super Strong Magnetic Fields]. *Elektrotekhnicheskii i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, Vol. 19, No. 1, pp. 106–116. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-106-116. EDN: OEMQAR. [in Russian].

22. Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safiullin R.A., Fedosov E.M. *Fizicheskaya model' dlya eksperimental'nogo issledovaniya elektromekhanicheskogo vibratsionnogo preobrazovatelya so spiral'nym zamknutym vtorichnym elementom* [Physical Model for Experimental Research of an Electromechanical Vibration Transducer with a Spiral Closed Secondary Element]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii — Automation. Modern Technologies*, 2023, Vol. 77, No. 1, pp. 3–8. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-1-3-8. EDN: YBBBOM. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 06.09.2023; одобрена после рецензирования 13.09.2023; принята к публикации 20.09.2023.

The article was submitted 06.09.2023; approved after reviewing 13.09.2023; accepted for publication 20.09.2023.

Научная статья

УДК 621.313.12

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-133-144

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫХ АГРЕГАТОВ С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ НА ОБЪЕКТАХ ДОБЫЧИ НЕФТИ



Азат Венерович Зайниев

Azat V. Zayniev

*аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*



Венер Фанусович Шайдуллин

Vener F. Shaydullin

*аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*



Марат Ильгизович Хакимьянов

Marat I. Khakimyanov

*доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
электротехники и электрооборудования предприятий,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*

Актуальность

Одной из наилучших доступных технологий утилизации попутного нефтяного газа и выработки электрической энергии является применение на нефтегазодобывающих предприятиях газопоршневых агрегатов.

При этом ограниченные средства на ремонт оборудования и неблагоприятная внешняя конъюнктура часто вынуждают промышленные предприятия переходить на стратегию ремонта по техническому состоянию.

Вид организации ремонта по техническому состоянию основного энергетического и электротехнического оборудования может применяться, если у субъекта электроэнергетики имеются средства технического диагностирования и автоматизированная система контроля за техническим состоянием основного оборудования, представляющая программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий процесс удаленного наблюдения и контроля за состоянием оборудования и (или) объекта (действующее оборудование), его диагностирование и прогнозирование изменения технического состояния на основе собранных

Ключевые слова

синхронный генератор,
газопоршневой агрегат,
вибродиагностика,
метод частичных разрядов,
спектродиагностика

данных (исторические данные о состоянии оборудования) и операционных данных, получаемых от систем сбора данных, установленных на оборудовании. При этом, при организации ремонта по техническому состоянию оборудования перечень и объем ремонтных мероприятий должны определяться по результатам выполненного контроля и диагностирования его технического состояния.

Таким образом, диагностика и оценка технического состояния, аварийная остановка которых может вызвать остановку фонда нефтедобывающих скважин, является важной задачей, решение которой способствует сокращению эксплуатационных затрат, повышению надежности, снижению количества аварийных ситуаций, сокращению расходов и потерь рабочего времени, связанных с внеплановыми ремонтами оборудования и технологическими неполадками.

Цель исследования

Целью исследования является анализ применяемых современных методов диагностирования газопоршневых агрегатов, а также перспективных технологий в области диагностирования.

Методы исследования

Аналитический обзор научной литературы.

Результаты

В статье произведен анализ методов технического диагностирования газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами переменного тока с учетом их достоинств и недостатков. Рассмотрены перспективные направления развития диагностических систем электрических машин.

Для цитирования: Зайниев А.В., Шайдуллин В.Ф., Хакимьянов М.И. Анализ современных методов диагностирования газопоршневых агрегатов с синхронными генераторами на объектах добычи нефти // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 133-144. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-133-144>.

Original article

ANALYSIS OF MODERN METHODS FOR DIAGNOSIS OF GAS PISTON UNITS WITH SYNCHRONOUS GENERATORS AT OIL PRODUCTION FACILITIES

Relevance

One of the best available technologies for the utilization of associated petroleum gas and the generation of electrical energy is the use of gas piston units at oil and gas production enterprises.

At the same time, limited funds for equipment repairs and unfavorable external conditions often force industrial enterprises to switch to a repair strategy based on technical condition.

The type of organization of repairs based on the technical condition of the main power and electrical equipment can be used if the electric power industry entity has technical diagnostic tools and an automated system for monitoring the technical condition of the main equipment, which is a hardware and software complex that ensures the process of remote monitoring and control of the condition of the equipment and (or) object (operating equipment), its diagnosis and prediction of changes in technical condition based on collected data (historical data on the condition of the equipment) and operational data received from data collection systems installed on the equipment. At the same time, when organizing repairs based on the technical condition of equipment, the list and scope of repair

Keywords

synchronous generator, gas piston unit, vibration diagnostics, partial discharge method, spectrodiagnostics

measures should be determined based on the results of the performed monitoring and diagnosis of its technical condition.

Thus, diagnostics and assessment of the technical condition, the emergency shutdown of which can cause the shutdown of the oil-producing well stock, is an important task, the solution of which helps to reduce operating costs, increase reliability, reduce the number of emergencies, reduce costs and losses of working time associated with unscheduled repairs of equipment and technological problems.

Aim of research

The aim of the study is to analyze the current methods for diagnosing gas piston units, as well as promising technologies in the field of diagnostics.

Methods

Analytical review of scientific literature.

Results

The article analyzes methods for technical diagnostics of gas piston units with synchronous alternating current generators, taking into account their advantages and disadvantages. Promising directions for the development of diagnostic systems of electrical machines are considered.

For citation: Zainiev A.V., Shaidullin V.F., Khakim'yanov M.I. Analiz sovremennykh metodov diagnostirovaniya gazoporshnevnykh agregatov s sinkhronnymi generatorami na ob'ektakh dobychi nefti [Analysis of Modern Methods for Diagnosis of Gas Piston Units with Synchronous Generators at Oil Production Facilities]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 133-144 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-133-144>.

Введение

В процессе добычи углеводородного сырья выделяется попутный нефтяной газ (ПНГ), который сам по себе является ценным топливом. Ранее выделяющийся при добыче попутный газ просто сжигался, что являлось нерациональным и вредным для окружающей среды. Однако

в современных условиях нефтедобывающие компании стремятся использовать попутный газ для генерации электроэнергии, для чего устанавливают на промыслах генераторные установки с газопоршневыми двигателями — газопоршневые агрегаты (ГПА) (рисунок 1) [1, 2].

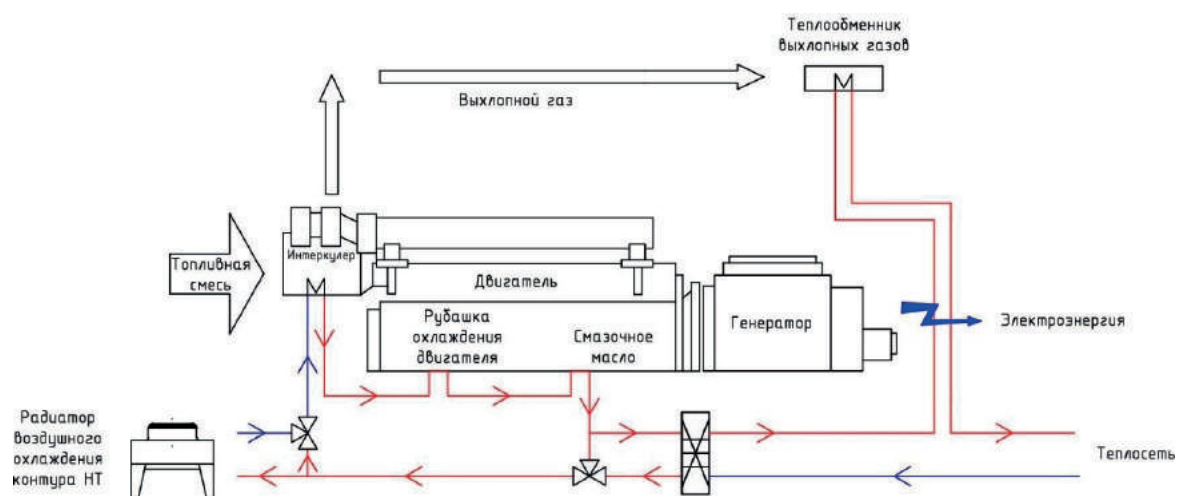


Рисунок 1. Схема ГПА [3]

Figure 1. Diagram of a gas piston unit [3]

Такие установки являются достаточно сложными устройствами, имеющими в своем составе как двигатель внутреннего сгорания, так и электрическую машину. Основной проблемой при эксплуатации таких установок является сложность обеспечения высокой надежности и длительных сроков безаварийной работы. Сложность диагностирования состояния и оценки остаточного ресурса таких установок заключается в том, что нельзя использовать только методы диагностики электрических машин, или только методы диагностики для газопоршневых двигателей. Для таких установок необходимо использовать комплекс методов, позволяющих контролировать состояние как ГПА, так и синхронного генератора.

Прогресс в методах проектирования и технологии производства электрических машин выражается в повышении их надежности, однако полностью избежать отказов не удастся, так как газопоршневые агрегаты с синхронными генераторами переменного тока подвержены множеству неблагоприятных воздействий, среди которых можно выделить тепловые и механические нагрузки.

Современные ГПА, как отечественного, так и импортного производства, имеют в своем составе цифровые системы защиты и управления, повышающие надежность защит, плавность и точность регулирования.

Усложнение состава ГПА и комплексных средств автоматизации объектов нефтедобычи, как и любой сложной технической системы, приводит, как правило, к увеличению интенсивности отказов. Вследствие этого увеличиваются простои фондов скважин, снижается доля утилизации ПНГ, вызванные ремонтом оборудования и связанные с ними убытки существенно возрастают. Снизить их можно внедряя новые эффективные методы, модели, алгоритмы и средства технического диагностирования.

Применяемые в настоящее время методы диагностирования электрических генераторов могут быть отнесены к следующим группам:

- тепловые методы;
- вибрационные методы;
- методы контроля состояния изоляции.

Среди методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания следует отметить трибодиагностику.

Тепловые методы диагностики

В основе тепловых методов диагностики лежит контроль состояния оборудования по температуре нагрева его элементов и тепловому (инфракрасному) излучению.

Контроль и измерение температуры осуществляются с применением контактных и бесконтактных методов. Контактное измерение температуры производится с помощью жидкостных и манометрических термометров, термопар, термометров сопротивления, термоиндикаторов. Бесконтактные методы теплового контроля основаны на регистрации инфракрасного излучения, испускаемого телами, температура которых выше абсолютного нуля [4].

Регистрировать инфракрасное излучение можно с помощью пирометров, измеряющих локальную температуру, и тепловизоров, обеспечивающих получение термограмм объекта исследования.

Преимуществом тепловизионного обследования с помощью тепловизора является то, что съемка оборудования проводится дистанционно, в эксплуатационных условиях, без демонтажа или какой-либо предварительной подготовки [5].

К недостаткам метода можно отнести высокую стоимость приборов и ограничения по нижнему пределу рабочей температуры [6]. В работе [7] отмечается, что использование данного метода в ряде случаев может ограничить высокая инер-

ционность тепловых процессов. Нужно отметить, что тепловизор не всегда применим в цехах с высокой температурой вследствие паразитных составляющих, вызванных горячим металлом.

Вибродиагностика

При использовании метода вибродиагностики степень развития дефекта определяют, сравнивая измеренные параметры вибрации с нормативными значениями для определенного механизма. Механизм признается дефектным, если уровень его вибрации превышает нормативное значение. Если уровень вибрации превышает допустимые нормы, то персоналу необходимо принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации агрегата, узла или механизма. Оценка общего уровня вибрации, как правило, осуществляется по среднеквадратичному значению (СКЗ) виброскорости. Пересчет виброскорости должен производиться с учетом сложения всех гармонических составляющих [8].

Диагностика по спектрам вибросигналов позволяет выявить большое количество дефектов оборудования. Во многих случаях методом можно диагностировать дефекты агрегатов с середины второго этапа развития, когда уровень энергии резонансных колебаний заметен в общей картине частотного распределения всей мощности вибросигнала.

Вид сигнала на временном интервале $0...T$ после вибропреобразователя можно представить в виде выражения [9]:

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^T S(\omega) e^{i\omega t} dt, \quad (1)$$

а спектр сигнала как:

$$S(\omega) = \int_0^T S(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (2)$$

где ω — угловая частота, рад/с;

t — время, с.

Модуль функции $|S(\omega)|$ характеризует распределение интенсивности гармони-

ческих составляющих сигнала $S(t)$ по частотам, а величина $|S(\omega)d\omega|$ соответствует амплитуде синусоидального колебания с частотой ω , содержащегося в сигнале $S(t)$.

При обработке выходного сигнала вибропреобразователя с помощью анализатора спектра с необходимой шириной полосы пропускания на выходе получают амплитудный спектр.

Разложение сложного сигнала в ряд Фурье позволяет получить составляющие спектра, представляющие собой при узкополосном анализе гармонические составляющие сложного сигнала. Зная частоты, на которых проявляются неисправности кинематических пар механизмов, по амплитуде составляющих спектра можно оценить их состояние.

Эффективность мониторинга зависит от количества компонент вибрации, доступных для измерения и анализа. Чтобы увеличить их число, в машинах с вращающимися узлами производится узкополосный спектральный анализ вибрации, наиболее эффективный для анализа периодических компонент сигнала [10].

Спектральный анализ вибрации электрических машин на низких и средних частотах, измеряемый в разных направлениях, дает возможность идентифицировать практически все дефекты электромагнитной системы электрических машин, кроме старения изоляции, так как до момента пробоя изоляции электромагнитное поле и вибрация машины не изменяются [4, 10]. На рисунке 2 изображен спектр вибрационного сигнала при дисбалансе ротора.

Системы вибродиагностики должны быть максимально специализированными для конкретных машин и типов оборудования [6]. К достоинствам вибрационных методов можно отнести возможность определения точечных дефектов подшипников (дефекты внешней и

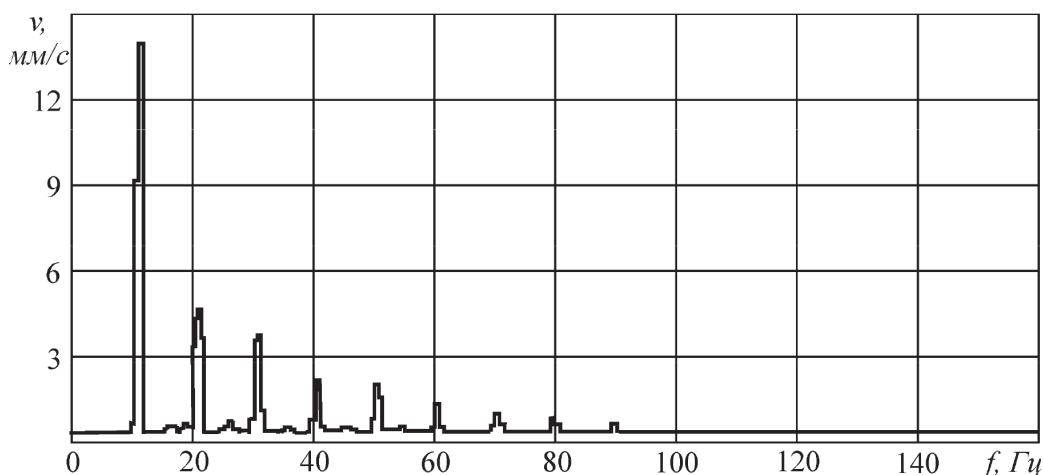


Рисунок 2. Гармонические составляющие вибрационного сигнала при дисбалансе ротора [11]

Figure 2. Harmonic components of the vibration signal when the rotor is unbalanced [11]

внутренней обойм, сепаратора и тел качения), ослабление крепления опор, дефекты электромагнитной системы и другие. К недостаткам реализации вибрационного метода относятся необходимость установки датчиков непосредственно на объект диагностирования и жесткие требования к креплению датчиков [11, 12]. К тому же бывает затруднительным отстроиться от вибраций, вызванных соседним оборудованием.

Метод регистрации частичных разрядов

Метод регистрации частичных разрядов (ЧР) позволяет контролировать текущее состояние электрооборудования на месте его установки под рабочим напряжением в процессе нормальной эксплуатации. Частичный разряд — это электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами. Как правило, частичные разряды являются следствием локальной концентрации электрических напряжений в изоляции или на ее поверхности; такие разряды появляются в виде импульсов с длительностью меньше 1 мкс. Однако в газообразных диэлектри-

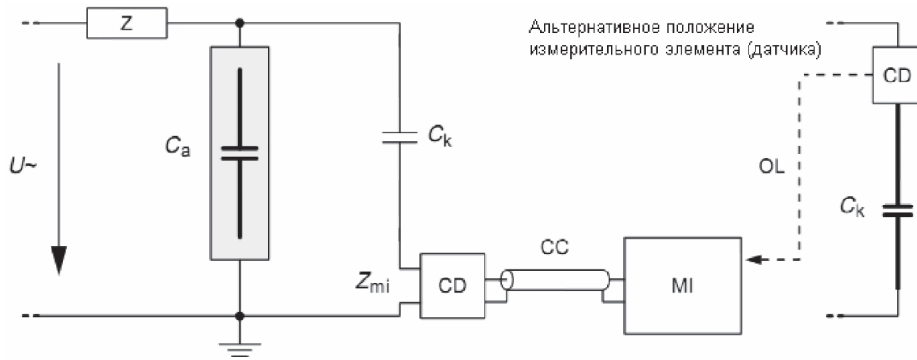
ках могут возникать и более продолжительные разряды, так называемые безымпulsive разряды [13].

Этот метод позволяет выявлять дефекты изоляции на самых ранних стадиях их возникновения, отслеживать их развитие, оценивать текущее состояние изоляции и возможность дальнейшей эксплуатации оборудования. Серьезные дефекты изоляции обычно обнаруживаются на стадии приемо-сдаточных высоковольтных испытаний и испытаний на месте монтажа.

Если оборудование прошло эти испытания, то обнаруженные (или не проявившиеся) при их проведении дефекты изоляции (которые практически всегда имеются), не приводят к полному пробое изоляции в нормальных рабочих условиях.

Применяются две основные схемы измерения частичных разрядов: испытательная схема с измерительным элементом, включенным в цепь заземления конденсатора связи (рисунок 3), и испытательная схема с измерительным элементом, включенным в цепь заземления испытуемого объекта (рисунок 4) [14].

Однократное измерение сигналов ЧР не позволяет дать надежную оценку степени опасности дефекта и прогнози-

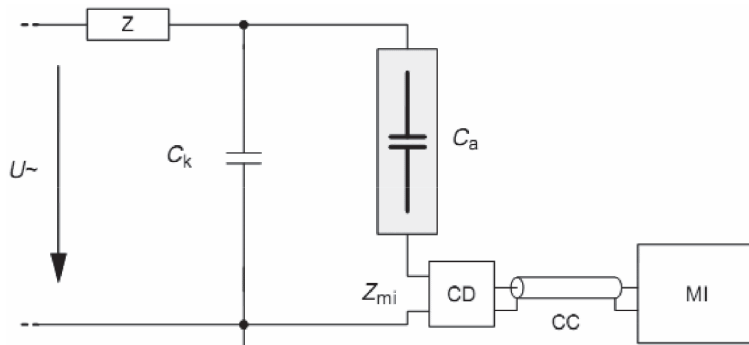


U_{\sim} — источник высокого напряжения; Z_{mi} — входной импеданс измерительной системы; CC — соединительный кабель; OL — оптический канал; C_a — испытуемый объект; C_k — конденсатор связи; CD — измерительный элемент; MI — измерительный прибор; Z — фильтр

U_{\sim} — high voltage source; Z_{mi} — input impedance of the measuring system; CC — connecting cable; OL — optical channel; C_a — test object; C_k — coupling capacitor; CD — measuring element; MI — measuring instrument; Z — filter

Рисунок 3. Испытательная схема с измерительным элементом, включенным в цепь заземления конденсатора связи

Figure 3. Test circuit with a measuring element connected to the ground circuit of the coupling capacitor



U_{\sim} — источник высокого напряжения; Z_{mi} — входной импеданс измерительной системы; CC — соединительный кабель; OL — оптический канал; C_a — испытуемый объект; C_k — конденсатор связи; CD — измерительный элемент; MI — измерительный прибор; Z — фильтр

U_{\sim} — high voltage source; Z_{mi} — input impedance of the measuring system; CC — connecting cable; OL — optical channel; C_a — test object; C_k — coupling capacitor; CD — measuring element; MI — measuring instrument; Z — filter

Рисунок 4. Испытательная схема с измерительным элементом, включенным в цепь заземления испытуемого объекта

Figure 4. Test circuit with a measuring element connected to the grounding circuit of the tested object

вать время безаварийной работы оборудования. Периодическое измерение характеристик сигналов ЧР позволяет оценить скорость развития дефекта. Скорость изменения характеристик ЧР

резко возрастает в предпробойной стадии, что служит достаточно хорошим указателем на достижение дефектом критической стадии развития. Именно высокая скорость изменения характери-

стик сигналов ЧР служит достаточно надежным указателем на близость полного пробоя [4, 10].

В работе [14] рассматривается вопрос отличия характеристик ЧР при дефектах одного типа при работе оборудования на постоянном и переменном напряжении.

Была отмечена низкая корреляция между характеристиками ЧР при постоянном и переменном напряжении, что говорит о необходимости использования отдельных подходов для работы с обоими видами напряжения. Как правило, амплитуда импульсов ЧР была ниже при постоянном напряжении. Формы импульсов ЧР при постоянном напряжении были более многообразны, чем при переменном.

Трибодиагностика

Этот метод оценки состояния машинного оборудования, дающий достоверные данные о его рабочем состоянии и степени износа, применим к двигателям внутреннего сгорания ГПА.

Трибодиагностика представляет собой оценку технического состояния оборудования по составу и концентрации продуктов износа в рабочем масле с помощью специальных приборов и оборудования (анализаторов масла, атомно-эмиссионных спектрометров, рентгено-флюоресцентных анализаторов и других).

Проведение анализов проб масла с помощью специального оборудования позволяет определить концентрацию отдельных элементов, из которых сделаны детали механизма, подвергающегося трению. Зная концентрации этих элементов, определяют усредненный износ соответствующих деталей и делают вывод о необходимости проведения ремонтных работ [15].

Общее содержание продуктов износа в масле характеризует суммарный износ компонентов данного трибосопряжения.

Скорость образования частиц износа в узле трения и их концентрацию в масле с

учетом параметров и типа маслосистемы связывает дифференциальное уравнение [15], полученное на основе уравнения материального баланса поступающих в масло частиц и удаляемых из него:

$$\frac{dC}{dt} + \frac{v\gamma(C,t)C}{V_0 - qt} = \frac{v_m(t)}{V_0 - qt}, \quad (3)$$

где v_m — массовая скорость образования частиц износа, мг/с;

V_0 — начальный объем масла в маслосистеме, мл;

q — скорость утечек масла из маслосистемы, мл/с;

v — расход масла, мл/с;

C — концентрация частиц износа в масле, мг/мл;

γ — эффективность фильтрации;

t — время, с.

При условии постоянства скорости образования частиц износа и эффективности фильтрации при достаточно большой длительности процесса решение этого уравнения относительно v_m имеет вид:

$$v_m = C_p v \gamma, \quad (4)$$

где C_p — равновесная концентрация частиц износа в масле, мг/мл.

Таким образом, поддающаяся контролю равновесная концентрация частиц износа в масле служит индикатором скорости образования этих частиц в трибосопряжении. Резкое ее увеличение свидетельствует о переходе к катастрофическому изнашиванию.

Недостатком этого метода является определение суммарного износа деталей, изготовленных из одних и тех же конструкционных материалов. В результате имеют место случаи необоснованного съема узла трения или, наоборот, пропуска неисправности.

Перспективные методы диагностирования

Новые перспективные методы диагностирования газогенераторных установок основаны на технологиях интернета вещей, высокоскоростных протоко-

лах передачи информации, использовании нейронных сетей, нечеткой логики и методов искусственного интеллекта. Появление быстродействующих датчиков электрических величин и аналогово-цифровых преобразователей привело к появлению метода спектродиагностики — анализу состояния электрических машин путем измерения спектра активной мощности [16]. Неисправности электротехнического и связанного с ним механического оборудования приводят к появлению дополнительных гармоник в переменном напряжении, анализ спектров которых позволяет идентифицировать дефекты. На рисунке 5 приведен спектр тока электрической машины с эксцентриситетом ротора.

К преимуществам спектральных методов диагностики относятся измерение сигналов с помощью датчиков электрических величин (трансформаторов тока и напряжения), возможность удаленного контроля и диагностики, их непрерыв-

ность. Сложность применения спектральных методов заключается в том, что высокочастотные гармоники могут как генерироваться электрической машиной, так и приходиться от сети. И отделить гармоники сети от гармоник электрической машины достаточно сложно.

На рисунке 6 показан спектр мощности диагностического комплекса роторных машин производства АО «Приборостроительный завод «Вибратор» [18].

Перспективным направлением развития методов диагностики является применение технологии Интернета вещей. Такой подход использован в системе контроля спектральных характеристик вибрации, разработанной в университете Л'Акуила (Италия) [19]. Основными элементами системы являются модули сбора данных вибрации.

Модуль состоит из устройства для сбора данных вибрации и устройства передачи данных. В качестве чувстви-

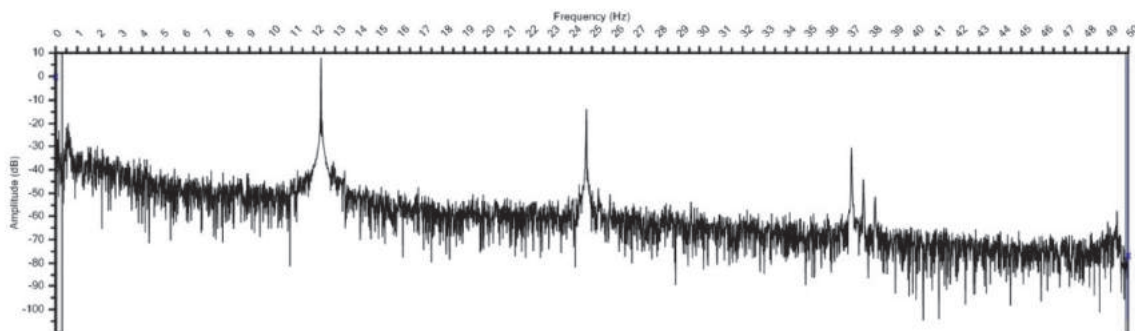


Рисунок 5. Спектр тока электрической машины с эксцентриситетом ротора [17]

Figure 5. Current spectrum of an electric machine with rotor eccentricity [17]

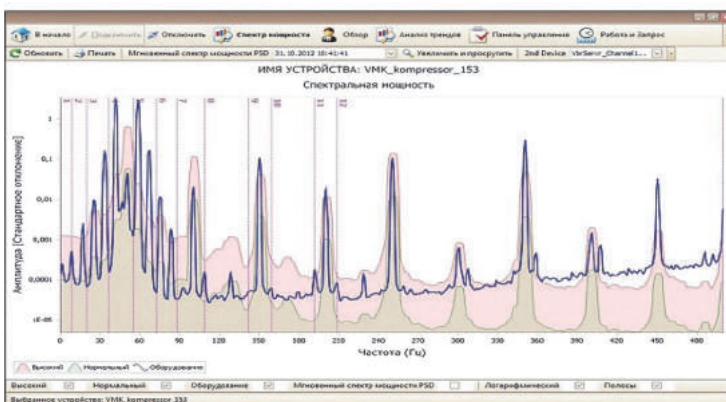


Рисунок 6. Экран диагностического комплекса роторных машин производства АО «Приборостроительный завод «Вибратор» [18]

Figure 6. Screen of the diagnostic complex for rotary machines produced by JSC Instrument-Making Plant Vibrator [18]

тельных элементов используются 3D гироскоп и акселерометр.

Испытания системы показали, что общее время обработки данных одного замера вибрации не превышает 4,5 с. Стоимость одного модуля вибрации не превышает 150 \$.

Группой авторов из Ирана предложен способ диагностики подшипников качения по данным вибрации, в котором используется комбинация генетического алгоритма и нейронной сети для выделения диагностических свойств и метода опорных векторов для определения состояния подшипника [20].

Группой исследователей из Шанхайского университета транспорта предложен метод исследования вибрации, в котором в качестве первичного чувствительного элемента используется нить паучьего шёлка [21]. Использование паучьего шёлка в качестве чувствительного элемента объясняется высокой удельной прочностью и широким диапазоном резонансных частот этого материала.

Список источников

1. ИТС 50-2017 «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Переработка природного и попутного газа» (утв. Приказом Росстандарта от 14.11.2017 № 2423).
2. ИТС 38-2022 «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» (утв. Приказом Росстандарта от 20.12.2022 № 3227).
3. Схема работы газопоршневой установки // 2G-Station: официальный сайт. URL: <https://2g-station.ru/shema-raboty-gpa/> (дата обращения: 03.10.2023).
4. Шабанов В.А., Баширов М.Г., Хлюпин П.А., Лунева Н.Н., Калимгулов А.Р., Мирнова И.С., Юмагузин У.Ф., Юсупов Р.З. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения. Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. 371 с. EDN: UFVHNT.
5. Коробейников А.Б., Сарваров А.С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их разви-

Выводы

1. В настоящее время все чаще наблюдается переход от планово-предупредительного метода технического обслуживания и ремонта электрооборудования на стратегию ремонта по техническому состоянию. Для этого необходимо оснащать оборудование средствами и системами дистанционного технического диагностирования и контроля за техническим состоянием основного оборудования.

2. В работе представлен анализ применяемых и перспективных методов диагностирования ГПА, выделены их достоинства и недостатки. Наиболее перспективными направлениями развития систем диагностирования ГПА являются системы с технологиями интернета вещей, искусственного интеллекта, нечеткой логики, нейронных сетей. Использование методов спектродиагностики в перспективе позволит отказаться от установки дорогостоящих и ненадежных датчиков физических величин (вибрации и температуры), однако в настоящее время уйти от них еще невозможно.

тия // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 1 (26). С. 4–9. EDN: TNHCAN.

6. Садовников М.Е. Надежность и диагностика электрооборудования. Введение в надежность электромеханических и электротехнических систем. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горногеол. акад, 2003. 44 с.

7. Лутай С.Н., Коломиец В.В., Кобылянский Б.Б., Булгакова И.В. Методы и анализ диагностики асинхронных электродвигателей // Электротехнические и компьютерные системы. 2014. № 15 (91). С. 306–310. EDN: SNOURH.

8. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. Ч. 2. 128 с.

9. Басманов В.Г. Современные методы диагностики объектов электроэнергетики: учебное пособие. Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. 98 с.

10. Баширов М.Г., Прахов И.В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. 96 с.

11. Спектральный анализ вибрации // Ассоциация ЕАМ : официальный сайт. URL: <https://eam.su/leksiya-14-spektralnyj-analiz-vibracii.html> (дата обращения: 01.09.2023).

12. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. М.: Стандартинформ, 2010. 48 с.

13. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Национальный стандарт Российской Федерации. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 26.11.2012 № 1183-ст).

14. Rostaghi-Chalaki M., Yousefpour K., Klüss J., Kurum M., Donohoe J. P., Park C. Classification and Comparison of AC and DC Partial Discharges by Pulse Waveform Analysis // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 125. P. 106518. DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106518.

15. Фитч Дж., Тройер Д. Анализ масел. Основы и применение: Пер. с англ.; под ред. Новикова Е.А., Кирюхина М.В. СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. 176 с. ISBN 978-5-91884-064-1.

16. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. Т. 1. № 31. С. 50–52.

17. Семенов Д.Н., Баркова Н.А. Диагностика асинхронных электрических машин по спектрам тока // ЧОУ ДПО «СЕВЗАПУЦЕНТР». URL: <https://vibro-expert.ru/diagnostika-asinxronnix-elektricheskix-mashin-po-spektram-toka.-doklad.html> (дата обращения: 01.09.2023).

18. Система диагностики роторных машин производства АО «Приборостроительный завод «Вибратор» // АО «Приборостроительный завод «Вибратор». URL: https://sibkom.tom.ru/news/index.php?ELEMENT_ID=3545 (дата обращения: 01.09.2023).

19. Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E., Fioravanti A., Prudenzi A., Mari S. An IoT Condition Monitoring System for Resilience Based on Spectral Analysis of Vibration // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT. IEEE, 2020. P. 38–43. doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138177.

20. Jalali S. K., Ghandi H., Motamedi M. Intelligent Condition Monitoring of Ball Bearings Faults by Combination of Genetic Algorithm and Support Vector Machines // Journal of Nondestructive Evaluation. 2020. Vol. 39. P. 1–12.

21. Liu Z., He Q., Peng Z. Vision-Based Vibration Measurement by Sensing Motion of Spider Silk // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 49. P. 126–131. DOI:10.1016/j.promfg.2020.07.007.

References

1. ITS 50-2017 «*Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Pererabotka prirodnogo i poputnogo gaza*» (utv. Priказом Rosstandarta ot 14.11.2017 № 2423) [ITS 50-2017 «Information and Technical Handbook on the Best Available Technologies. Processing of Natural and Associated Gas» (Approved by the Order of Rosstandart Dated 14.11.2017 No. 2423)]. [in Russian].

2. ITS 38-2022 «*Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Szhiganiye topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii*» (utv. Priказом Rosstandarta ot 20.12.2022 № 3227). [ITS 38-2022 «Information and Technical Handbook on the Best Available Technologies. Fuel Combustion at Large Installations for the Purpose of Energy Production» (Approved by the Order of Rosstandart Dated 20.12.2022 No. 3227)]. [in Russian].

3. Skhema raboty gazoporshnevoi ustanovki [Scheme of Operation of a Gas Piston Installation]. 2G-Station: ofitsial'nyi sait [2G-Station Company: Official Website]. URL: <https://2g-station.ru/shema-raboty-gpa/> (accessed 03.10.2023). [in Russian].

4. Shabanov V.A., Bashirov M.G., Khlyupin P.A., Luneva N.N., Kalimgulov A.R., Mironova I.S., Yumaguzin U.F., Yusupov R.Z. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya sistem elektrosnabzheniya* [Diagnostics of the Technical Condition of Electrical Equipment of Power Supply Systems: a Textbook]. Ufa, Neftegazovoe delo Publ., 2012. 371 p. EDN: UFVHHT. [in Russian].

5. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analiz sushchestvuyushchikh metodov diagnostirovaniya elektrodvigateli i perspektivy ikh razvitiya [Analysis of Existing Methods for Diagnostics of Electric Motors and Perspectives of Their Development]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2015, No. 1 (26), pp. 4–9. EDN: TNHCAN. [in Russian].

6. Sadovnikov M.E. Nadezhnost' i diagnostika elektrooborudovaniya. *Vvedenie v nadezhnost' elektromekhanicheskikh i elektrotekhnicheskikh system* [Reliability and Diagnostics of Electrical Equipment. Introduction to the Reliability of Electromechanical and Electrical Systems]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skoi gos. gornogeol. akad., 2003. 44 p. [in Russian].

7. Lutai S.N., Kolomiets V.V., Kobylyanskii B.B., Bulgakova I.V. Metody i analiz diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateli [Methods and Analysis of Diagnostics of Asynchronous Electric Motors]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i*

kompleksy — Electrotechnical Systems and Complexes, 2014, No. 15 (91), pp. 306–310. EDN: SNOURH. [in Russian].

8. Gavrilin A.N., Moizes B.B. *Diagnostika tekhnologicheskikh sistem* [Diagnostics of Technological Systems]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, Ch. 2. 128 p. [in Russian].

9. Basmanov V.G. *Sovremennye metody diagnostiki ob'ektov elektroenergetiki* [Modern Methods for Diagnosing Electric Power Facilities]. Kirov, FGBOU VPO «VyatGU», 2013. 98 p. [in Russian].

10. Bashirov M.G., Prakhov I.V. *Otsenka povrezhdennosti nasosnykh agregatov po znacheniyam parametrov garmonik tokov i napryazhenii elektroprivoda* [Assessment of Damage to Pumping Units Based on the Values of Harmonic Parameters of Electric Drive Currents and Voltages]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2013. 96 p. [in Russian].

11. Spektral'nyi analiz vibratsii [Spectral Analysis of Vibration]. *Assotsiatsiya EAM: ofitsial'nyi sait* [EAM Association: Official Website]. URL: <https://eam.su/lekciya-14-spektralnyj-analiz-vibracii.html> (accessed 01.09.2023). [in Russian].

12. *GOST R ISO 13373-1-2009. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Vibratsionnyi kontrol' sostoyaniya mashin. Chast' 1. Obshchie metody* [State Standard R ISO 13373-1-2009. Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Vibration Monitoring of the Condition of Machines. Part 1. General Methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 48 p. [in Russian].

13. *GOST R 55191-2012 (MEK 60270:2000). Metody ispytaniy vysokim napryazheniem. Izmereniya chastichnykh razryadov (utv. i vveden v deystvie Prikazom Rosstandarta ot 26.11.2012 № 1183-st)* [State Standard R 55191-2012 (MEK 60270:2000). High Voltage Test Methods. Measurements of Partial Discharges (Approved and Introduced by the Order of Rosstandart Dated 26.11.2012 N 1183-st)]. [in Russian].

14. Rostaghi-Chalaki M., Yousefpour K., Klüss J., Kurum M., Donohoe J. P., Park C. Classification and Comparison of AC and DC Partial Discharges by Pulse Waveform Analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy*

Systems, 2021, Vol. 125, pp. 106518. DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106518.

15. Fitch Dzh., Troier D. *Analiz masel. Osnovy i primeneniye: Per. s angl.*; pod red. Novikova E.A., Kiryukhina M.V. [Oil Analysis. Fundamentals and Application: Trans. from English; edited by Novikov E.A., Kiryukhin M.V.]. Saint-Petersburg, TsOP «Professiya», 2014. 176 p. ISBN 978-5-91884-064-1. [in Russian].

16. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelyei. Metod spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka [Diagnostics of the Condition of Electric Motors. Method of Spectral Analysis of Consumed Current]. *Novosti elektrotekhniki — News of Electrical Engineering*, 2005, Vol. 1, No. 31, pp. 50–52. [in Russian].

17. Semenov D.N., Barkova N.A. Diagnostika asinkhronnykh elektricheskikh mashin po spektram toka [Diagnostics of asynchronous electrical machines using current spectra]. *ChOU DPO «SEVZAPUCHTsENTR»*. URL: <https://vibro-expert.ru/diagnostika-asinxronnix-elektricheskix-mashin-po-spektram-toka.-doklad.html> (accessed 01.09.2023). [in Russian].

18. Sistema diagnostiki rotornykh mashin proizvodstva AO «Priborostroitel'nyi zavod «Vibrator» [Diagnostic System for Rotary Machines Produced by JSC Instrument-Making Plant Vibrator]. *JSC Instrument-Making Plant Vibrator*. URL: https://sibkom.tom.ru/news/index.php?ELEMENT_ID=3545 (accessed 01.09.2023). [in Russian].

19. Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E., Fioravanti A., Prudenzi A., Mari S. An IoT Condition Monitoring System for Resilience Based on Spectral Analysis of Vibration. *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*. IEEE, 2020, pp. 38–43. doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138177.

20. Jalali S. K., Ghandi H., Motamedi M. Intelligent Condition Monitoring of Ball Bearings Faults by Combination of Genetic Algorithm and Support Vector Machines. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, Vol. 39, pp. 1–12.

21. Liu Z., He Q., Peng Z. Vision-Based Vibration Measurement by Sensing Motion of Spider Silk. *Procedia Manufacturing*, 2020, Vol. 49, pp. 126–131. DOI:10.1016/j.promfg.2020.07.007.

Статья поступила в редакцию 03.10.2023; одобрена после рецензирования 10.10.2023; принята к публикации 12.10.2023.

The article was submitted 03.10.2023; approved after reviewing 10.10.2023; accepted for publication 12.10.2023.

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-145-152

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПОСРЕДСТВОМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATLAB SIMULINK

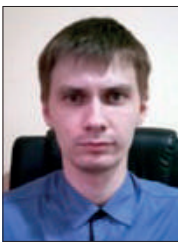


Рустам Нуриманович Хамитов

Rustam N. Khamitov

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

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



Павел Витальевич Зыкин

Pavel V. Zykin

аспирант кафедры «Электроэнергетика»,

Тюменский индустриальный университет,

Тюмень, Россия

Актуальность

Процесс осуществления технологических процессов обработки детали резанием постоянно усложняется. Это связано с тем, что в результате чаще всего требуется получить деталь сложнопрофильной формы, а ее поверхности должны соответствовать высокому качеству точности с минимальной погрешностью. Процесс точения сложных деталей реализуется в условиях применения недетерминированных показателей резания. Для того чтобы управлять и оказывать влияние на их изменения целесообразно применить специализированную систему управления шероховатостью.

Цель исследования

Разработать систему управления шероховатостью на основе нечеткой логики при помощи программного пакета MATLAB SIMULINK.

Методы исследования

Для разработки системы управления применены методы компьютерного автоматизированного моделирования. В частности, использовался программный пакет MATLAB SIMULINK.

Результаты

В рамках выполненного исследования посредством MATLAB SIMULINK синтезирована система управления показателями шероховатости при обработке детали резанием на токарном станке с числовым программным управлением (ЧПУ). Смоделированный процесс работы системы показал эффективность ее применения,

Ключевые слова

система управления шероховатостью, функции принадлежности, шероховатость, погрешность измерений

которая выражается в точном получении требуемых параметров шероховатости при обработке детали. Требуемые значения достигаются за счет регулирования привода продольной подачи и скорости движения режущего инструмента.

Для цитирования: Хамитов Р. Н., Зыкин П. В. Синтез системы управления шероховатостью на основе нечеткой логики посредством программного пакета MATLAB SIMULINK // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 145-152. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-145-152>.

Original article

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

Relevance

The process of processing a part by cutting is constantly complicated. This is due to the fact that as a result, it is most often necessary to obtain a part of difficult profile shape, and its surfaces must correspond to a high quality of accuracy with a minimum error. The process of turning complex parts is implemented under the conditions of using undetected cutting indicators. In order to control and influence their changes, it is advisable to use a specialized roughness control system.

Aim of research

The main aims of the research develop a fuzzy logic roughness management system using the MATLAB SIMULINK software package.

Research methods

To achieve computer-automated modeling, control system development methods were used. In particular, the MATLAB SIMULINK software package was used.

Results

As part of the study, MATLAB SIMULINK synthesized a system for controlling roughness when machining a part with a CNC lathe. The simulated process of the system has shown the effectiveness of its application, which is expressed in the accurate receipt of the required roughness parameters during part processing. The required values are achieved by adjusting the longitudinal feed drive and the speed of the cutting tool.

Keywords

roughness control system, belonging functions, roughness, measurement error

For citation: : Khamitov R. N., Zykin P. V. Sintez sistemy upravleniya sherokhovatost'yu na osnove nechetkoi logiki posredstvom programmnoho paketa MATLAB SIMULINK [Synthesis of Fuzzy Logic Roughness Control System by MATLAB SIMULINK Software Package]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 145-152 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-145-152>.

Введение

Реализация технологических процессов обработки деталей резанием постоянно усложняется, так как чаще всего в результате необходимо получить деталь сложнопрофильной формы, поверхности которой должны соответствовать высокому качеству точности [1].

Обработка подобных деталей выполняется в условиях использования недетерминированных показателей резания, таких как шероховатость, сила резания, скорость резания, управлять и регулировать которые без применения системы автоматического управления (САУ) не представляется возможным. Несоответ-

ствии значений показателей резания в ходе реализации технологического процесса влечет за собой увеличение величины погрешности точения, что в конечном итоге отразится на качестве обработки детали в виде отклонения полученной шероховатости от требуемого значения [2]. Возникает описываемая ситуация по причине того, что при скорости резания 30–35 м/мин начинает развиваться процесс наростообразования. Для наглядности он представлен в виде графика на рисунке 1.

Анализируя график, можно заметить, что при скорости главного движения резания более 30 м/мин из-за возрастания температуры в зоне резания процесс наростообразования прекращается, следовательно, величина шероховатости уменьшается [3]. Для стабилизации показателей до требуемых величин необходимо регулирование таких параметров резания, как подача режущего инструмента и скорость движения режущего инструмента. Наиболее эффективный способ регулирования — это применение в процессе обработки автоматизированной системы управления шероховатостью [4].

Синтез системы управления шероховатостью на основе нечеткой логики

Процесс проектирования системы управления состоит из нескольких взаимосвязанных этапов. На начальном этапе работы важно правильно подобрать комбинацию термов функции принадлежности, на основе которой будет функционировать система управления [5]. Для решения поставленной задачи наиболее эффективно использовать функции принадлежности из трех термов [6]: Z (норма) — имеет гауссовскую форму, N — (отрицательные значения) и P — (положительные значения), данные термы имеют сигмоидальную форму.

При настройке функции Гаусса задаются следующие параметры. Центр нечеткого множества равен нулю, а среднеквадратичное отклонение равно 0,3. Необходимое уравнение представлено в виде зависимости (1) [7]:

$$\text{gaussmf}(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{\sigma}}. \quad (1)$$

Параметры сигмоидальных функций заданы следующие: крутизна функции равна $\pm 2,5$, а координата пересечения сигмоидальных функций равна 0.

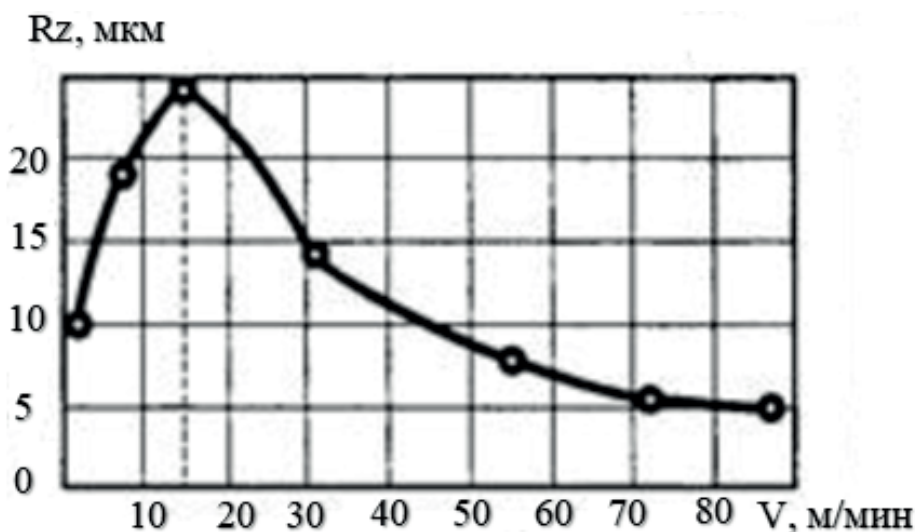


Рисунок 1. График наростообразования на резце в процессе обработки детали резанием

Figure 1. Graph of buildup on the cutter during part cutting

Таким образом, графики функции принадлежности входа и выхода имеют вид, который представлен на рисунке 2.

На основании функции принадлежности получена поверхность отклика на основе трех термов. Результат представлен на рисунке 3.

Таким образом, принципиальная схема самой модели и проведенные в ней настройки представлены на рисунке 4.

Принцип действия системы управления заключается в следующем: исходная величина шероховатости R_a , задаваемая

элементом «Constant1», элементом «Расчет подачи», пересчитывается в величину подачи S , формируя величину входного сигнала для системы управления. После чего свои функции выполняет регулятор на нечеткой логике «Fuzzy Logic Controller», который имеет два входа. На первый подается величина рассогласования, на второй — его производная. Величина производной вычисляется посредством блока «Transfer Function1», который выполняет операцию

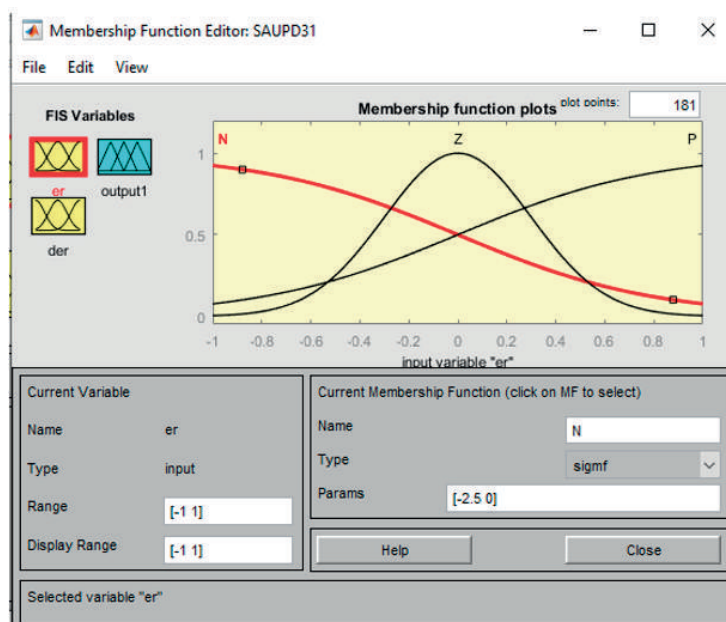


Рисунок 2. Функции принадлежности, состоящие из трех термов: Z — гауссовой формы, N и P — сигмоидальные

Figure 2. Belonging functions consisting of three terms: Z — Gaussian form, N and P — sigmoidal

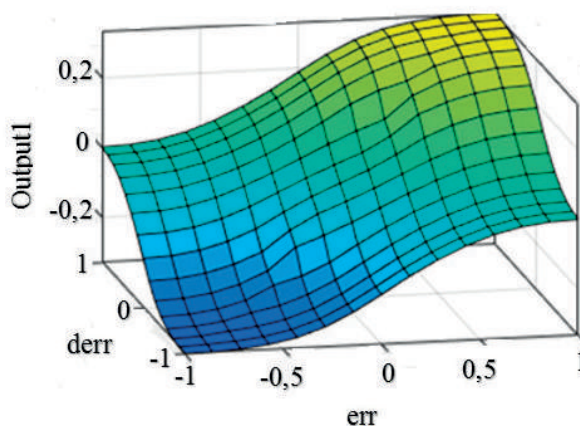


Рисунок 3. Поверхность отклика для функций принадлежности, состоящих из трех термов

Figure 3. Response surface for three-term belonging functions

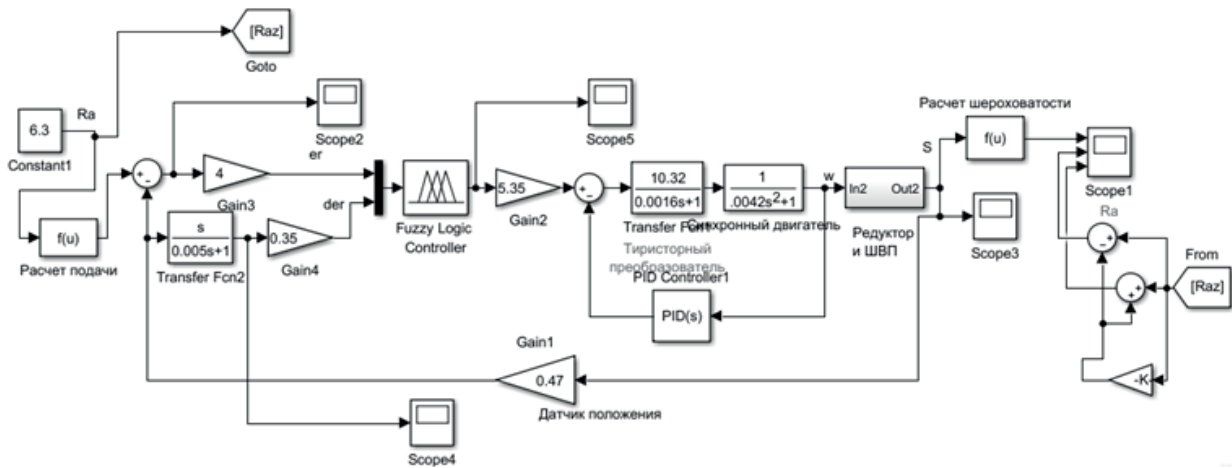


Рисунок 4. Принципиальная схема модели системы управления шероховатости с настройками для функций принадлежности, состоящих из трех термов

Figure 4. Schematic diagram of roughness control system model with settings for belonging functions consisting of three terms

дифференцирования с передаточной функцией [8]:

$$W_{рД}(p) = \frac{p}{T_{\phi}p + 1}, \quad (2)$$

где T_{ϕ} — постоянная времени фильтра равная $T_{\phi} = 0,005$ с.

В системе управления предусмотрены масштабирующие усилители «Gain2» и «Gain4», осуществляющие нормализацию сигналов по формулам (3), (4) [2]:

$$k_{err} = \frac{1}{err_{max}}; \text{ и } k_{derr} = \frac{1}{derr_{max}}, \quad (3)$$

где err_{max} и $derr_{max}$ — соответственно максимальные значения сигнала рассогласования и его производной [9].

Наличие усилителей позволяет системе управления в процессе работы нормализовать величины сигналов на входах нечеткого регулятора до значения ± 1 .

Элемент «Gain2» выполняет функцию денормализации сигнала при помощи математической зависимости:

$$k_{вых} = \max |u_{вых}|. \quad (4)$$

Сигнал на выходе нечеткого регулятора после процесса денормализации передается на многокомпонентную модель объекта управления, которая включает в себя элементы «Синхронный двигатель» и «Тиристорный преобразо-

ватель», а также последовательно включенные элементы системы «ШВП» и «Редуктор». Стоит отметить, что блоки «Синхронный двигатель» и «Тиристорный преобразователь» охвачены обратной связью через PID регулятор», образуя внешний контур регулирования скорости электродвигателя.

Для регулирования показателей скорости электродвигателя использовалась соответствующая передаточная функция:

$$W_{\omega}(p) = \frac{1}{T_{\omega 1}^2 \cdot p^2 + 1}, \quad (5)$$

где $T_{\omega 1}$ — электромеханическая постоянная времени. В процессе расчета величину электромеханической постоянной примем равной 0,0649 с.

Силовой преобразователь представлен в качестве управляющего устройства двигателем и выполняет свои функции посредством передаточной функции:

$$W_{cn}(p) = \frac{k_{cn}}{T_{cn} \cdot p + 1}, \quad (6)$$

где k_{cn} — коэффициент синхронного привода ($k_{cn} = 10,32$);

T_{cn} — электромеханическая постоянная синхронного привода ($T_{cn} = 0.0016$).

Далее выполняется регулирование скорости движения режущего инстру-

мента, которое осуществляется посредством передаточной функции:

$$W_{\text{РучШВП}}(p) = W_{\text{мн}}(p) \cdot W_{\text{вн}}(p) = \frac{K_{\text{мн}}}{T_{\text{мн}} \cdot p + 1} \cdot \frac{K_{\text{вн}}}{T_{\text{вн}} \cdot p + 1}, \quad (7)$$

где $K_{\text{мн}}$ — коэффициент механической передачи ($K_{\text{мн}} = 5$);

$K_{\text{вн}}$ — коэффициент винтовой пары ($K_{\text{вн}} = 0,1$);

$T_{\text{мн}}$ — постоянная времени механической передачи ($T_{\text{мн}} = 4 \cdot 10^{-4}$);

$T_{\text{вн}}$ — постоянная времени винтовой пары ($T_{\text{вн}} = 3 \cdot 10^{-4}$).

Имея математическое описание функционирования системы управления шероховатости, ее структурную схему, алгоритм функционирования каждого отдельного элемента САУ важно оце-

нить корректность и эффективность ее функционирования. Результат функционирования системы управления представлен в виде графика переходного процесса, который показан на рисунке 5.

Оценивая представленный на рисунке 5 график, можно заметить, что спроектированная система управления имеет время переходного процесса, равное 0,11 с.

На рисунке 6 представлены кривые для трех величин заданной шероховатости $Ra_{\text{зад}} = 5-8$ мкм, причем предварительная настройка коэффициентов $k_{\text{стг}} = 4$, $k_{\text{детг}} = 0,35$, $k_{\text{вых}} = 5,35$ обеспечила точную отработку системой управления величины шероховатости $Ra = 6,3$ и $Ra = 8$. График переходного процесса представлен на рисунке 6.

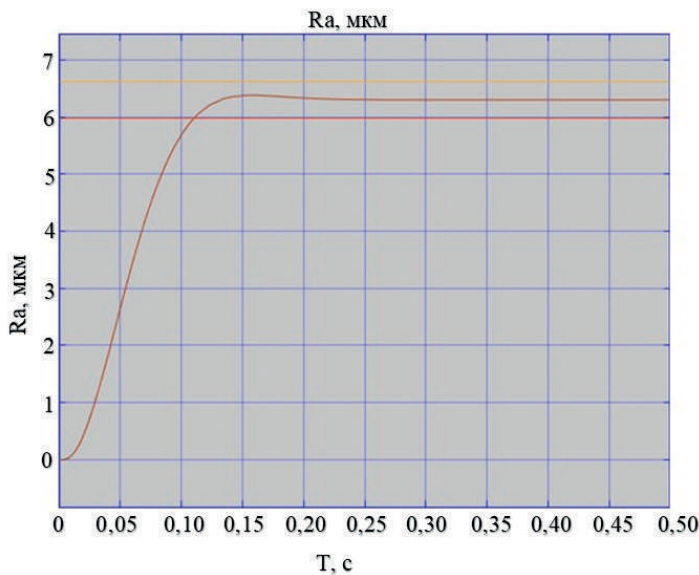


Рисунок 5. График переходного процесса при $Ra_{\text{зад}} = 6,3$ мкм

Figure 5. Transient plot at $Ra_{\text{зад}} = 6.3 \mu\text{m}$

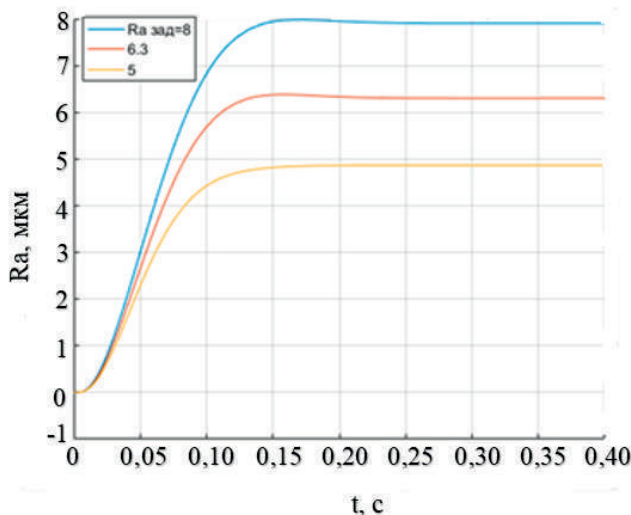


Рисунок 6. Переходный процесс при разных значениях $Ra_{\text{зад}}$ при настройках, обеспечивающих отсутствие перерегулирования

Figure 6. Transient at different values of $Ra_{\text{зад}}$ at settings ensuring no overregulation

Стоит отметить, что при $R_a = 5$ в работе системы управления возникает статическая ошибка. Ее величина составляет:

$$\frac{(5 - 4,877)}{5} \cdot 100 = 2,7 \%$$

Значение данной статической ошибки показывает, что система управления функционирует корректно.

Выводы

В рамках выполненного исследования посредством MATLAB SIMULINK син-

Список источников

1. Гаврилова С.В. Улучшение динамических характеристик электротехнического многодвигательного судоподъемного комплекса «СЛИП»: дис. ...канд. техн. наук. Ульяновск, 2019. 138 с.
2. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems with Disturbance Observer // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 138. P. 107971. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.
3. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 137. P. 107778. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.
4. Li D., Deng X., Li C., Zhang X., Fang E. Study on the Space Vector Modulation Strategy of Matrix Converter under Abnormal Input Condition // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. No. 61(6). P. 4595–4605. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.020>.
5. Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С. Разработка нечеткой системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на основе совместно используемых функций принадлежности // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2021. Т. 17, № 3-4. С. 82–91. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-82-91. EDN:BHNAEE.
6. Enayati M., Derakhshan G., Hakimi S.M. Optimal Energy Scheduling of Storage-Based Residential Energy Hub Considering Smart Participation of Demand Side // *Journal of Energy*

тезирована система управления показателями шероховатости при обработке детали резанием на токарном станке с числовым программным управлением. Смоделированный процесс работы системы показал эффективность ее применения, которая выражается в точном получении требуемых параметров шероховатости при обработке детали. Требуемые значения достигаются за счет регулирования привода продольной подачи и скорости движения режущего инструмента.

Storage. 2022. Vol. 49. P. 104062. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104062>.

7. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdula-teef J., Hasan A., Mohamad A. An Analysis of Photovoltaic/Supercapacitor Energy System for Improving Self-Consumption and Self-Sufficiency // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 680–695. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.021>.

8. Li J., Ma J., Sun L., Liu X., Liao H., He D. Mechanistic Insight into the Biofilm Formation and Process Performance of a Passive Aeration Ditch (PAD) for Decentralized Wastewater Treatment // *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2022. Vol. 16 (7). P. 86. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1494-3>.

9. Брюханов В.Н., Косов М.Г. и др. Теория автоматического управления / Под ред. М.Ю. Соломенцева. М.: Высшая школа, 2018. 268 с.

References

1. Gavrilova S.V. *Uluchshenie dinamicheskikh kharakteristik elektrotekhnicheskogo mnogodvigatel'nogo sudopod'emnogo kompleksa «SLIP»: dis. ...kand. tekhn. nauk* [Improvement of Dynamic Characteristics of the Electrical Multi-Engine Ship Lifting System «SLIP». Kand. Tech. Diss.]. Ul'yanovsk, 2019. 138 p. [in Russian].
2. Ansari J., Reza Abbasi A., Bahmani Firouzi B. Decentralized LMI-Based Event-Triggered Integral Sliding Mode LFC of Power Systems with Disturbance Observer. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, Vol. 138, pp. 107971. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.107971>.
3. Agha Kashkooli M.R., Jovanović M.G. Parameter Independent Control of Doubly-Fed Reluctance Wind Generators without a Rotor Position Sensor. *International Journal of Electrical*

Power and Energy Systems, 2022, Vol. 137, pp. 107778. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107778>.

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

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

6. Enayati M., Derakhshan G., Hakimi S.M. Optimal Energy Scheduling of Storage-Based

Residential Energy Hub Considering Smart Participation of Demand Side. *Journal of Energy Storage*, 2022, Vol. 49, pp. 104062. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104062>.

7. Hassan Q., Jaszczur M., Abdulateef A.M., Abdula-teef J., Hasan A., Mohamad A. An Analysis of Photovoltaic/Supercapacitor Energy System for Improving Self-Consumption and Self-Sufficiency. *Energy Reports*, 2022, Vol. 8, pp. 680–695. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.021>.

8. Li J., Ma J., Sun L., Liu X., Liao H., He D. Mechanistic Insight into the Biofilm Formation and Process Performance of a Passive Aeration Ditch (PAD) for Decentralized Wastewater Treatment. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2022, Vol. 16 (7), pp. 86. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1494-3>.

9. Bryukhanov V.N., Kosov M.G. e.a. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2018. 268 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023; принята к публикации 09.10.2023.

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023; accepted for publication 09.10.2023.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19, № 3. С. 153–166. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2023. Vol. 19. No. 3. P. 153–166. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 621.865.8

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-153-166

УПРАВЛЕНИЕ ПЛАВАНИЕМ КОМПОЗИТНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МИКРОРОБОТА



Рузил Ахнафович Сафиуллин

Ruzil A. Safiullin

кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры «Технические дисциплины»,

Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Нефтекамске),

Нефтекамск, Россия

Актуальность

В настоящее время подводная робототехника является одной из важнейших областей развития робототехнических комплексов. Их основа и управление строятся на электромеханической базе. Создание и исследование электромеханических систем являются одним из перспективных направлений развития электромеханики и электротехники. Снаряженные широким спектром датчиков необитаемые подводные аппараты широко используются для решения таких задач, как исследование рельефа морского дна, мониторинг и обслуживание нефтегазопроводов и кабельных линий, сбор биологических и геологических проб жидкостей, освоение морских нефтяных и газовых месторождений, проведение подводных аварийно-спасательных работ. Увеличивающаяся известность такого рода аппаратов объясняется тем, что применение пилотируемых аппаратов может быть весьма опасно для жизни самих пилотов и несет большие расходы при их эксплуатации.

Проводимые различными инженерными группами исследования в области моделирования и управления подводными роботами в конечном итоге направлены на достижение полной автоматизации процессов. Достижение данной цели представляется исключительно сложной задачей, так как требует знания и понимания большого объема теоретических и практических проблем, подлежащих всесторонним исследованиям.

Цель исследования

Провести теоретические расчеты по исследованию электромеханических и механических параметров управления подводным роботом и сопоставить их с экспериментальными данными.

Методы исследования

В работе использовалась теория электромеханического преобразования энергии и управления электротехническими средствами, методы математического и физического моделирования.

Ключевые слова

микроробот, плавание, композит, управление, МЭМС

Результаты

Представлены результаты построения алгоритма и математическая модель устройства электромеханического композитного робота. Для описания ее силовой характеристики была использована система уравнений механики и электродинамики. Путем решения данной системы уравнений проведен теоретический анализ работы его двигателя. С помощью мехатронного подхода изучаются его плавание, координация работы его функциональных модулей. Результаты данной статьи будут полезны для инженеров, занимающихся проектированием и эксплуатацией роботов, с использованием робототехнических систем в областях биотехнологий и биомеханики.

Для цитирования: Сафиуллин Р. А. Управление плаванием композитного электромеханического микроробота // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. №3. Т. 19. С. 153-166. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-153-166>.

Original article

SWIMMING CONTROL OF A COMPOSITE ELECTROMECHANICAL MICROROBOT

Relevance

Currently, underwater robotics is one of the most important areas of development of robotic complexes. Their foundation and control are based on an electromechanical basis. The creation and research of electromechanical systems are one of the promising areas of development of electromechanics and electrical engineering. Equipped with a wide range of sensors, unmanned underwater vehicles are widely used to solve tasks such as studying the seabed relief, monitoring and servicing oil and gas pipelines and cable lines, collecting biological and geological samples of liquids, developing offshore oil and gas fields, conducting underwater rescue operations. The increasing popularity of such devices is explained by the fact that the use of manned vehicles can be very dangerous for the life of the pilots themselves and incur high costs during their operation.

Research conducted by various engineering groups in the field of modeling and control of underwater robots is ultimately aimed at achieving full automation of processes. Achieving this aim seems to be an extremely difficult task, since it requires knowledge and understanding of a large volume of theoretical and practical problems that are subject to comprehensive research.

Aim of research

To carry out theoretical calculations on the study of electromechanical and mechanical parameters of underwater robot control and compare them with experimental data.

Research methods

The theory of electromechanical energy conversion and control of electrical equipment, methods of mathematical and physical modeling were used in the work.

Results

The results of constructing an algorithm and a mathematical model of the device of an electromechanical composite robot are presented. A system of equations of mechanics and electrodynamics was used to describe its power characteristics. By solving this system of equations, a theoretical analysis of the operation of its engine was carried out. With the help of the mechatronic

Keywords

microrobot, swimming, composite, management, MEMS

approach, its swimming and coordination of its functional modules are studied. The results of this article will be useful for engineers involved in the design and operation of robots using robotic systems in the fields of biotechnology and biomechanics.

For citation: Safiullin R. A. Upravlenie plavaniem kompozitnogo elektromekhanicheskogo mikrorobota [Swimming Control of a Composite Electromechanical Microrobot]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 153-166 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-153-166>.

Введение

В наши дни все сложные высокотехнологичные и высокопроизводительные технологические процессы оснащаются миниатюрными электромеханическими компонентами, устройствами и машинами. При проектировании и создании таких электрических устройств начали активно использоваться микроэлектромеханические системы (МЭМС). Например, они широко применяются в робототехнике, управляющих элементах устройств, космической области, биомедицине, дозиметрии, измерительных приборах, технологиях развлечения, машиностроении, сельском хозяйстве и в быту как новые электронные аппараты и устройства, значительно облегчающие жизнедеятельность людей [1].

Технологии МЭМС являются инновационными электрическими микроустройствами, которые дали существенный толчок в развитии научно-технического прогресса и технологического производства. Теоретические и экспериментальные исследования ученых и экспериментаторов, расширяющие области МЭМС технологий, претворяются в жизнь в виде новых электрических и электронных устройств, намного опережающие развитие других отраслей промышленности.

В структурной основе МЭМС содержится большое количество микроэлектронных и микромеханических компонентов, а также множество микроустройств самых разнообразных конструкций и назначения. Они произ-

водятся сходными методами с использованием модифицированных групповых технологических приемов микроэлектроники с применением современных высокотехнологичных процессов производства [2, 3]. Основными компонентами МЭМС, отличающими их от других схожих электронных устройств, являются два признака: размер, а также наличие движущихся частей и предназначенность для механических действий в различных средах.

Способы движения микроботов и реализующие эти способы электромеханические системы определяются их назначением, средой, в которой происходят эти движения, требованиями к выполнению поставленной задачи и условиями движения в данных средах [4, 5].

Кроме их достоинств, при изготовлении и эксплуатации МЭМС встречаются масса особенностей и проблем, обуславливаемых малыми размерами, например проблема сухого трения или выхода из строя из-за сил поверхностного натяжения в различных средах. Поэтому задача проектирования и создания электромеханических аппаратов является актуальным и трудоёмким процессом.

Задача исследования

Согласно поставленной задаче, рассмотрим более подробно некоторые из данных электронных устройств. Наиболее известной составной частью большинства МЭМС является микроактюатор — устройство, которое преобразовывает энергию в управляемое движе-

ние в различных средах. Например, в медицине — это лечение кровеносных сосудов от тромбов, в агрессивной пищеварительной среде — для обследования стенок желудка; в машиностроении — для автоматизации технологических процессов; в нефтегазовом деле — для дефектоскопии сварных швов и т.д. Их размеры варьируются от нескольких квадратных микрометров до одного квадратного сантиметра, т.е. являются миниатюрными. Сферы применения микроактюаторов чрезвычайно широки, разнообразны и постоянно растут [1–5].

В основе твёрдых микроэлектромеханических преобразователей энергии при активации (движении, плавании, деформации, приведении в действие) используются электростатические, магнитные, пьезоэлектрические, гидравлические и тепловые эффекты. В практической деятельности наиболее перспективными методами считаются пьезоэлектрический и гидравлический, хотя и другие имеют важное практическое значение [5]. Электростатическая активация применяется примерно в одной трети актюаторов и, вероятно, это наиболее общий и хорошо разработанный метод. Главные недостатки метода — износ и слипание деталей, т.к. рабочими средами, в которых осуществляется движение, могут быть воздух, вода, вязкие жидкости и т.д. Разрешением данной проблемы является создание композитных электромеханических устройств [6–10]. Магнитные актюаторы обычно требуют больше электроэнергии. На микроскопическом уровне при использовании электростатических методов активации получаемый выходной сигнал на относительную единицу размерности лучше, чем при использовании магнитных методов, т.е. при одном и том же размере электростатическое устройство выдаёт более мощный выходной сигнал [1, 4].

На сегодняшний день существует довольно много специальных программных средств и программного обеспечения, которые позволяют моделировать устройства МЭМС и управлять ими [11, 12]. Проектирование и создание автономных или управляемых дистанционно микророботов любых типов является одной из актуальных задач микроробототехники во многих областях науки и техники.

Решение проблемы

Одной из решаемых задач при разработке микророботов является создание систем управления на основе микропроцессорной техники с применением различных алгоритмов и программного обеспечения. В мехатронике в супервизорном режиме управления движением микроробота система управления строится в микропроцессорном исполнении с отображением на мониторе среды для выполнения ситуационных задач. В большинстве микророботов основу микроактивации составляет сила, которая могла бы производить их механическое перемещение в различных средах и поверхностях. В данном устройстве — это сила сжатия и растяжения индуктивной спирали при протекании по нему переменного электрического тока. Следовательно, разные принципы получения активации могут быть оценены согласно их работоспособности, т.е. возможности использования механической энергии [12–15].

Математическая модель

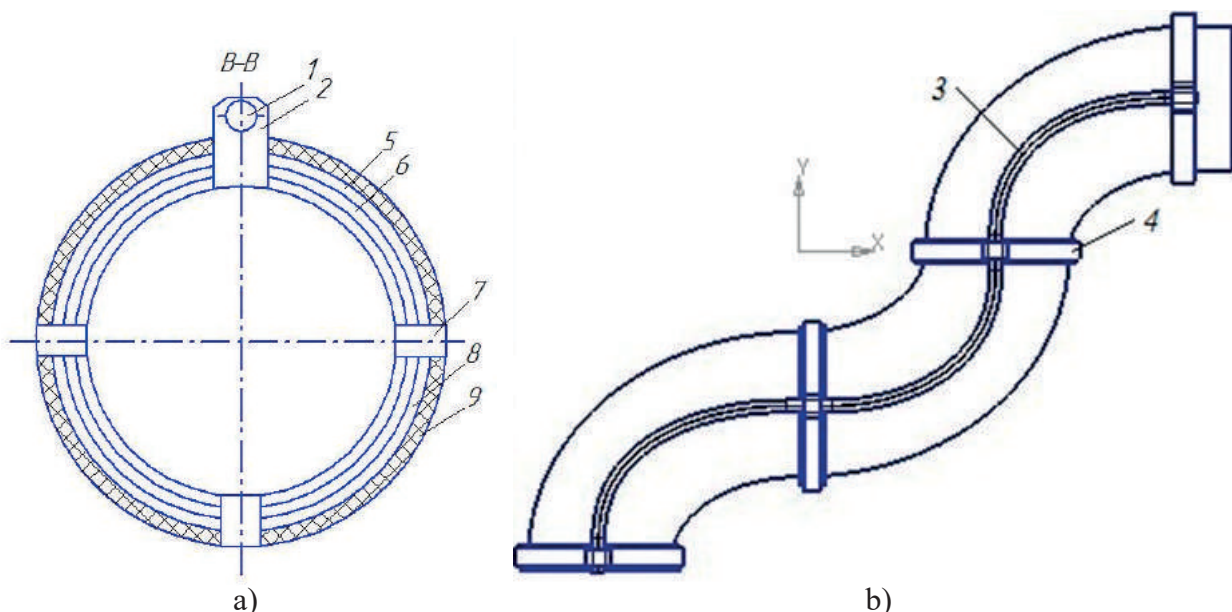
В настоящее время ведется проектирование и разработка шагового двигателя для микроробота как составной части МЭМС, конструкции которой представлены на рисунках 1 и 2 [15, 16]. На рисунке 1, *a* представлена фронтальная, а на рисунке 1, *b* — горизонтальная

проекции электромеханической системы микроробота (ЭММР).

На рисунке 1 представлена основа ЭММР — электромеханическая система на основе многослойного композита с упругими спиральями. На данную систему подается переменный ток из блока управления 2 через электрический ввод на спиральные пружины, находящиеся внутри многослойного армированного композита 9. За счет электродинамических усилий между витками спирали происходит изменение формы спирали и возникают механические усилия, которые передаются эластичной оболочке 9 и соответственно происходит сжатие или растяжение упругой оболочки. Фазированная подача переменного тока через шину управления 3 на спиральные пружины, находящиеся в электромеханических системах звеньев 4, позволяет ему засасывать окружающую жидкую среду через свою горловину и

выпускать ее через концевую часть. Жидкими средами могут быть вода, морская вода, трансформаторное масло и т.д. Плавание ЭММР в жидкой среде регулируется блоком управления 2 с помощью непроницаемых для жидкости воздушных секций 5 и балластной жидкости 8, отделенных перегородками отсеков 7. Данный процесс приводит к пневматическому реактивному движению ЭММР в жидкой среде. На рисунке 2 представлен трехмерный вид ЭММР при прямолинейном плавании. Микроробот может быть исполнен в закрытой конструкции, где его концы закрываются диафрагмами.

Движение ЭММР в жидкой среде осуществляется под управлением микропроцессорной системы 2, которая координирует взаимодействием нескольких программируемых микроконтроллеров, показанных на рисунке 3.



1 — видеокамера; 2 — блок управления; 3 — шина управления; 4 — звено;
5 — непроницаемая для жидкости воздушная секция; 6 — электромеханическая система;
7 — перегородки отсеков; 8 — балластная жидкость; 9 — композитная оболочка

1 — video camera; 2 — control unit; 3 — control bus; 4 — link; 5 — liquid impermeable air section; 6 — electromechanical system; 7 — compartment partitions; 8 — ballast fluid; 9 — composite shell

Рисунок 1. Электромеханическая система ЭММР

Figure 1. Electromechanical EMR system

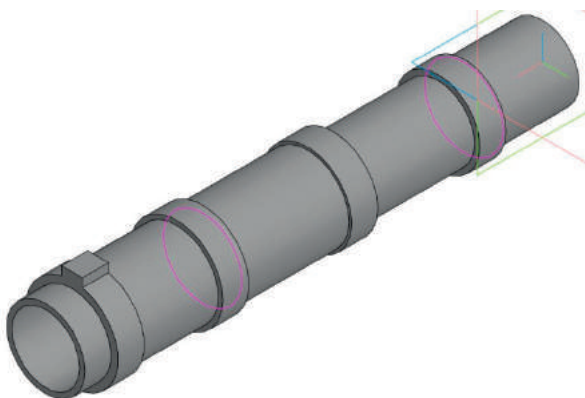


Рисунок 2. Трехмерный вид ЭММР

Figure 2. Three-dimensional view of EMMR

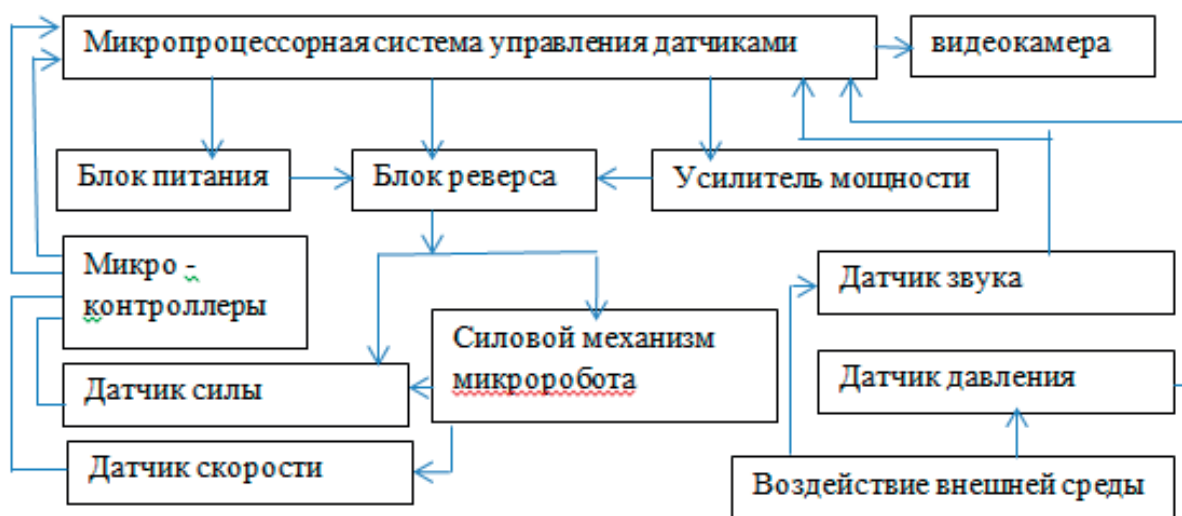


Рисунок 3. Функциональная система управления ЭММР

Figure 3. Functional EMMR control system

Программируемые микроконтроллеры описываются следующей функцией:

$$F_i(p_i, t) = q_i(p_i, t), \quad (1)$$

где $F_i(p_i, t)$, $q_i(p_i, t)$, $i = 1 \dots n$ — функции управляющих воздействий и выбора действий от координат перемещения и времени.

Согласно рисунку 4, функция адаптации управляет рабочим циклом в схеме блоком «адаптация параметров» с помощью обмена информацией с микроконтроллерами. Блок «условий» посылает сигнал на блок «адаптация параметров» и осуществляет его проверку — различие состояний регистров в моменты времени t и $t - \Delta t$. При положительном ответе «да» включаются функция адап-

тации и блок «адаптация параметров». Основная задача ЭММР — динамическая адаптация к сложившимся условиям в жидкой среде, например обнаружение водных препятствий и их обгибание датчиками на пути плавания к цели и подача сигналов об их обнаружении. За управляемое положение микроробота принимаются координаты (d_x, d_y, d_z) относительно неподвижной системы координат [12, 14].

Координация работы управляемого объекта с работой других звеньев осуществляется через управляющий микроконтроллер, который проводит расчет управляющих воздействий и выдает эти воздействия на микроконтроллер изменения траектории плавания на пути к цели. Например, для микроконтроллера,

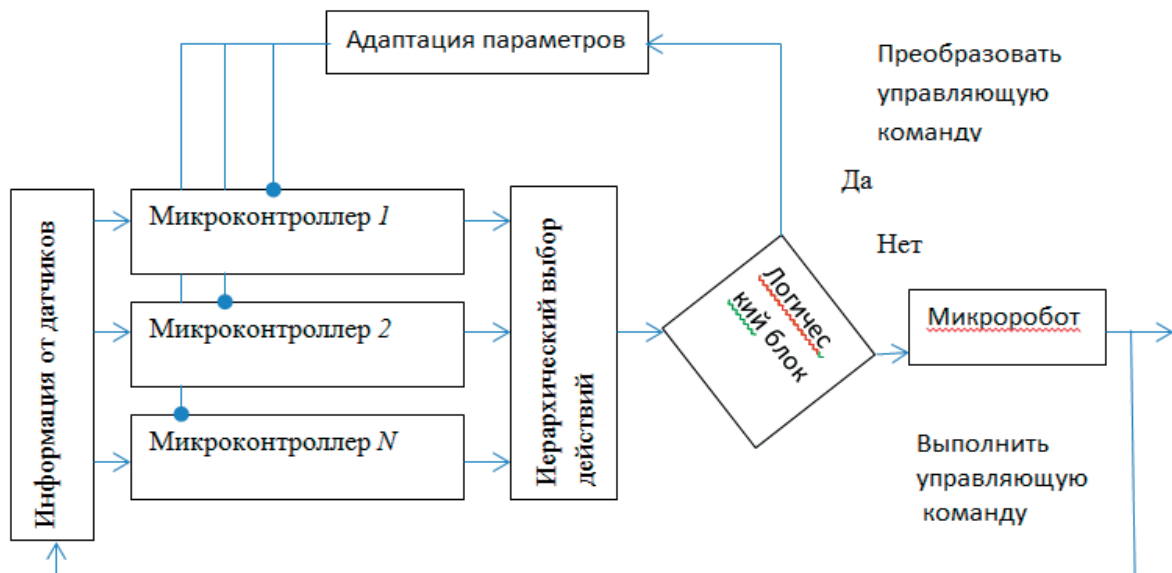


Рисунок 4. Схема системы управления ЭММР при обходе водного препятствия

Figure 4. Diagram of the EMMR control system when bypassing a water obstacle

ведущего ЭММР по маршруту, можно использовать классическую схему линейной стабилизации:

$$\begin{cases} \delta_x = x_0 - x_Q, \\ \delta_y = y_0 - y_Q, \\ \delta_z = z_0 - z_Q, \end{cases} \quad (2)$$

где (x_0, y_0, z_0) — начальное положение робота, а (x_Q, y_Q, z_Q) — координаты конечной цели. Плавание осуществляется в направлении цели с помощью компаса и звукового сонара, излучающего звуковые сигналы в жидкой среде различной частоты.

Кроме прямолинейного плавания, создание изгибных движений формализовано заданием уравнений по времени, определяющих форму его поверхности. Например, они описывают волнообразное плавание композитного микроробота в жидкой среде к продуктовым нефтегазопроводам, осуществляют обход подводных препятствий, мелководья или зон запрещенного плавания. При этом его скорость центра масс и скорость движения определяются параметрами пространственной бегущей волны.

Если выталкивающая сила Архимеда равна весу микроробота ($F_A = P$), то он плавает в любом объеме жидкости.

Глубина погружения плавающего микроробота зависит от соотношения плотностей композитных материалов и жидкости. Если учесть, что $P = mg = \rho_K g V_K$ и $F_A = \rho_{ж} g V_1$, то он будет плавать в жидкой среде, если $\rho_K V_K = \rho_{ж} V_1$ (здесь $\rho_K V_K$ — плотность и объем микроробота из композитного материала, $\rho_{ж} V_1$ — плотность жидкости и объем погруженной части микроробота).

Описание способа плавания композитного ЭММР осуществляется на основе математической модели. Моделируемые параметры длин волн и относительных сдвигов фаз выбираются таким образом, чтобы формирование поверхностных областей контакта с жидкой средой обеспечивало бы качение поверхностных звеньев вдоль его оси симметрии. При необходимости формирования волнообразных движений в неизменном направлении бегущие волны изгибной деформации будут в двух перпендикулярных плоскостях перемещаться в одну и ту же сторону вдоль его композитной многозвенной поверхности.

Пневморективное движение и манипуляция многозвенного композитного

ЭММР происходят путем задания в каждый момент времени межзвенного относительного угла $\varphi[i]$, где $i \in (1, N - 1)$ в каждом приводе звена. Они вычисляются как разность двух абсолютных углов поворота спиралей электро-механической системы соседних звеньев $\varphi[i] = \theta[i + 1] - \theta[i]$, $i = (1, N)$ для каждой степени подвижности. Для задания абсолютного угла поворота спиралей (их сжатия или растяжения) используется формула [12]:

$$\varphi[i] = \theta_0 \sin \left[\frac{2\pi}{N_s} (i - vt) + \Delta \right], \quad (3)$$

где $v = \frac{N_w}{T}$;

θ_0 — амплитудный угол;

N_w — количество звеньев, участвующих в волне;

T — период колебаний волны;

Δ — сдвиг фаз ортогональных волн;

i — номер звена, являются параметрами формируемой волны деформаций.

При этом можно определить скорость центра масс ЭММР [12]:

а) для прямолинейного плавания:

$$V = \frac{N_w}{T} \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_w} \cos(\theta_i)}{N_w} - 1 \right], \quad (4)$$

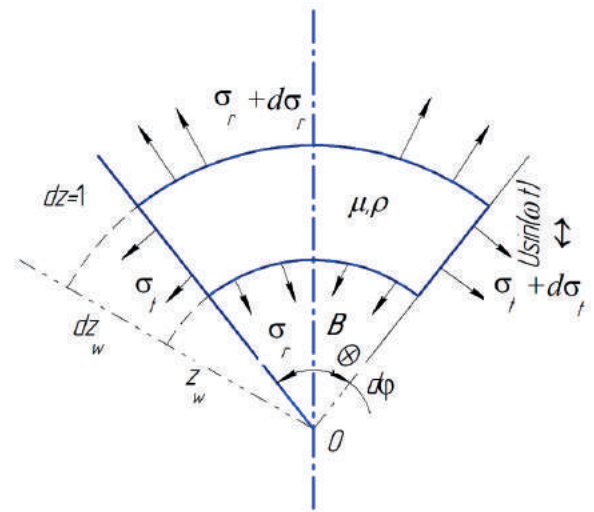
б) для бокового плавания:

$$V = \frac{N_w}{T} \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_w} \cos(\theta_i)}{N_w} \right)^2 - 2 \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_w} \cos(\theta_i)}{N_w} \right) \cdot \cos(\theta_0) + 1}. \quad (5)$$

Начальное тестирование плавания и его скорости осуществляется параметрами его плавания в горизонтальной плоскости, его скорость оценивается через расстояние, которое он должен проплыть за заданный промежуток времени, или наоборот.

В дальнейшем проведен теоретический анализ работы двигателя ЭММР со спиральным вторичным упругим элементом [6, 9, 16], получены выражения для расчета электромеханических характеристик, которые подтверждены экспериментально на действующих экспериментальных макетах.

Силы, действующие на витки спирали, показаны на рисунке 5. Для управления плаванием микроробота (рисунок 1) используем уравнения механики и электродинамики с учётом граничных условий. В упрощенной задаче используем модель ЭММР исходя из частных случаев работы датчика и двигателя [9, 15, 16].



r, z — радиальная и вертикальная координаты; $dz = 1$ — ширина материала спирали (принимается бесконечно малой относительно толщины); σ_r, σ_t — радиальное и тангенциальное напряжения; $d\sigma_r, d\sigma_t$ — приращения радиальной и тангенциальной напряжений; B — модуль вектора магнитной индукции; $d\varphi$ — малый угол; U — амплитуда напряжения; μ, ρ — коэффициент Пуассона и удельное электростатическое сопротивление материала; ω, t — циклическая частота и время

r, z — radial and vertical coordinates; $dz = 1$ — width of the spiral material (assumed to be infinitely small relative to thickness); σ_r, σ_t — radial and tangential stresses; $d\sigma_r, d\sigma_t$ — increments of radial and tangential stresses; B — modulus of the magnetic induction vector; $d\varphi$ — small angle; U — voltage amplitude; μ, ρ — the Poisson's ratio and the specific electrostatic resistance of the material; ω, t — the cyclic frequency and time

Рисунок 5. Представительный элемент ЭММР

Figure 5. Representative element of EMMR

Основные уравнения

Система уравнений, описывающая растяжение и сжатие электромеханического вибрационного преобразователя (ЭМВП), пригодна и для описания ЭММР [9, 15, 16, 17].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \cdot \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w = \rho \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2} + 2\vartheta\gamma \cdot \frac{\partial s_w}{\partial t} + \omega_0^2 s_w = \\ = -2\pi A_{\text{BX}} \sin \omega t \cdot s_w(1) + \\ + \left\{ \frac{i^2}{2} (Q + P) + B_0 il \right\} \cdot s_w, \\ e_w = B_0 l_w \frac{\partial s_w}{\partial t} + iR + \frac{di}{dr} P \cdot s_w + i \frac{\partial s_w}{\partial t} Z, \\ s_w|_{r_w=r_0} = 0; s_w=N|_{r_w=R_0} = 1, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $Q = \sum_{w=1}^N \frac{dL_{0w}}{dr_{0w}} + 2 \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^N \frac{dM_{0w,n}}{dr_{0w}}$;
 $P = \sum_{w=1}^N K_{Lw} + 2 \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^N K_{Mw,n}$;
 $Z = \sum_{w=1}^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2 \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt}$;

s_w — радиальное перемещение w -го витка спирали;

E — модуль упругости первого рода;

μ — коэффициент Пуассона;

ϑ, γ — коэффициенты трения и демпфирования;

ω_0 — частота собственных колебаний;

ω — частота вынужденных колебаний;

$q = \frac{\omega}{\omega_0}$ — относительная частота;

r_w — радиус w -го витка;

l_w — длина участка витка;

B_0 — индукция магнитного поля;

$s_w(1)$ — форма колебаний спирали;

R — активное сопротивление спирали;

$e(t)$ — подводимое напряжение;

L_{0w}, M_{0w} — индуктивность и взаимная индуктивность спирали в статическом состоянии;

K_{Lw}, K_{Mw} — некоторые конструктивные постоянные.

Система уравнений ЭМВП вибродвигателя ЭММР из системы (6) можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \cdot \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w = \rho \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2}, \\ \ddot{X} + 2\vartheta\gamma \dot{X} + \omega_0^2 X = \\ + \left\{ \frac{i^2}{2} (Q + P) + B_0 il \right\} \cdot s_w(1), \\ e_w(t) = iR + \frac{di}{dr} P + \frac{di}{dr} P \cdot s_w + i \frac{\partial s_w}{\partial t} Z, \\ s_w|_{r_w=r_0} = 0; s_w=N|_{r_w=R_0} = 1. \end{array} \right. \quad (7)$$

Далее определяется суммарное результирующее усилие для определения тягового анализа вибродвигателя ЭММР в виде:

$$F_s = q^2 s^2(1) \frac{4Im^2[Q+P]}{\sqrt{(1-4q^2)^2 + 16D^2q^2}} \cos(2\omega t + \varphi_3). \quad (8)$$

С точки зрения требований к системам управления и робототехнике представляет интерес исследование механических характеристик ЭММР — двигателя, подключаемого к источнику переменного электрического тока.

Усилия, возникающие в ЭММР, определяются по формуле [6, 16]:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m^2 \sum_{w=1}^N s_w(1) \frac{4q^2}{\sqrt{(1-4q^2)^2 + 16D^2q^2}} \cdot (Q+P). \quad (9)$$

Форма колебания упругой формы выражается в виде уравнения механической бегущей волны [16]:

$$\sum_{w=1}^N s_w(1) = R \sin(2\omega t - kr + \varphi), \quad (10)$$

$$\sum_{w=1}^N s_w = \frac{\sqrt{2}}{2} R,$$

где R — величина возмущения в данной точке пространства;

k — волновой вектор.

Результаты вычислений

Для практических расчетов, подставляя уравнение (10) в выражение (9), определим общую формулу для расчета механической характеристики композитного ЭММР:

$$F_S = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sum_{w=1}^N s_w(1) \frac{4I_m^2}{\sqrt{(1-4q^2)^2 + 16D^2q^2}} \cdot (Q+P) \times \cos(2\omega t + \varphi_0) - \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (11)$$

Для инженерных расчетов усилие двигателя ЭММР можно определить исходя из следующих соотношений

$$F_m = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m^2 s_w(1) \frac{4I_m^2}{\sqrt{(1-4q^2)^2 + 16D^2q^2}} \cdot (Q+P), \quad (12)$$

где F_m — определяет электромагнитную силу взаимодействия витков спирали, приводящую к механическому усилию ее сжатия и растяжения.

Для круглого сечения спирали при низкой частоте A_w имеет вид [6, 16]:

$$A_w = \mu_0 \sum_{n=1}^N \ln \left(\frac{8r_{0w}}{d_n} - 0,75 \right) + 2\pi \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^N [Y], \quad (13)$$

где $Y = \left[\frac{10^{-7} K_{wn}}{\sqrt{\beta_{0w,n}}} \left(2K_{w,n} - \frac{2-K_{w,n}^2}{1-K_{w,n}} E - \frac{K_{w,n}^2 \beta_{0w,n}}{1-K_{w,n}^2} E \right) \right]$.

Для прямоугольного сечения при низкой частоте имеет вид:

$$A_w = \mu_0 \sum_{n=1}^N \left(\frac{8r_{0w}}{a+b} + 0,5 \right) + 2\pi \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^N [Y]. \quad (14)$$

Здесь $K_{w,n} = \frac{2\sqrt{r_{0w} r_{0n}}}{r_{0w} + r_{0n}}$ — модуль лежандровых интегралов;

K, E — полные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно [18, 19];

$\beta_{0w,n} = \frac{r_{0w}}{r_{0n}}$ — отношение радиусов предполагаемых витков.

Интерес представляет конструкция низкочастотного механического двигателя ЭММР, когда короткозамкнутая лепестковая плоская электропроводящая пружина находится под воздействием переменного магнитного поля $B = B_0 \sin(\omega t)$ [6, 16]. Для приведения спирали к круговой модели в этом случае исходя из закона Био-Савара-Лапласа используется формула:

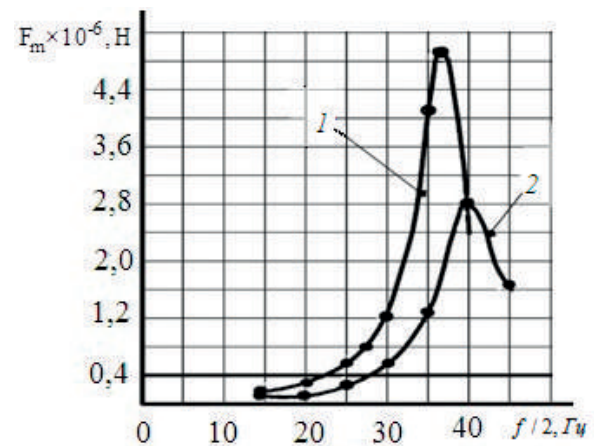
$$I_m = \frac{\mu_0 B_0}{2\sqrt{r_{0w}^2 + \omega^2 (L_{0w} + 2M_{0w,n})^2}}, \quad (15)$$

а выходная характеристика ЭММР — плавания микроробота в горизонтальной плоскости определяется из соотношения [6, 15]:

$$F_S = \frac{\sqrt{2}}{8} s_w(1) \times \frac{\mu_0 B_0}{\sum_{w=1}^N r_{0w}^2 + \omega^2 W^2} \cdot \frac{4q^2}{\sqrt{(1-4q^2)^2 + 16D^2q^2}} \cdot A_w, \quad (16)$$

где $W = \left(\sum_{w=1}^N L_{0w} + 2 \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^N M_{0w,n} \right)$.

Анализ полученных выражений (11)–(16) проводился численным методом с использованием ЭВМ. На рисунке 6 показана зависимость отношений равного усилия спирального короткозамкнутого ЭММР от относительной частоты внешнего возмущающего тока (магнитного поля) [17, 20].



F_m — механическая сила; f — частота тока; 1 — на постоянных магнитах; 2 — на переменном электромагните

F_m — mechanical force; f — current frequency; 1 — on permanent magnets; 2 — on an alternating electromagnet

Рисунок 6. Механическая характеристика ЭММР

Figure 6. Mechanical characteristics of EMMR

Кроме рассмотренного режима работы ЭММР — микроробота с короткозамкнутым элементом, представляет интерес неустановившийся режим ее работы. Так, уравнение электрического равновесия подвижной системы в общем виде представляется выражением:

$$iR_w + \frac{di}{dt}W + i \frac{d}{dt}W = 0.$$

Соответственно, решение этого уравнения имеет вид $i = I_{m0}e^{-\frac{t}{T}}$, где постоянная времени плоского лепесткового элемента (период затухающего колебания) вычисляется по формуле:

$$T = \frac{\sum_{w=1}^N r_w}{W} = \frac{\sum_{w=1}^N r_{w0}}{W_0},$$

что определяет передаточную функцию генератора [6, 16].

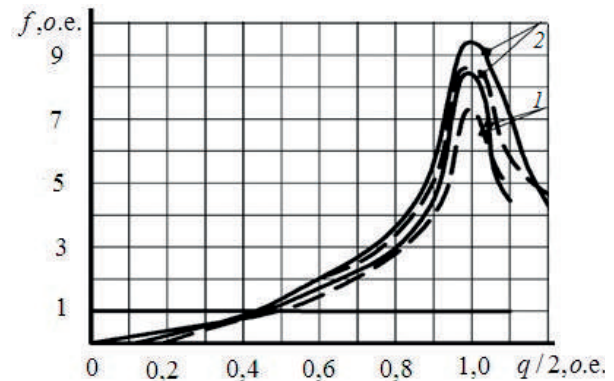
Таким образом, получены аналитические соотношения ЭММР с разомкнутым и короткозамкнутым подвижным элементом, как в установившемся, так и в переходном режимах работы микроробота для микророботизированных систем.

Экспериментальные исследования

При протекании внешнего переменного электрического поля по электромеханической системе ЭММР возникают силы, которые изгибают упругий элемент спирали с наклеенным на него тензорезистором типа 2ФКПА с сопротивлением 50 Ом и базой 5 мм (рисунок 7). Электромагнитный сигнал с выхода далее усиливается аппаратурой для тензометрических измерений типа 4АНЧ-22 и фиксируется осциллографом С1-118. Величина деформации определяется камертонно-тарировочным устройством КТУ — 2Ц и 4АНЧ-122 в комплекте с магазином сопротивления Р33. На рисунке 7 показаны статистические данные проведенных экспериментов.

Полученные графические данные исследований ЭММР показали, что рас-

считанные значения механических характеристик совпадают с экспериментальными данными в пределах 6–7 % точности эксперимента (рисунок 7) [17].



f — безразмерная механическая сила;
 q — относительная частота;
 1 — экспериментальные данные;
 2 — теоретические кривые

f — dimensionless mechanical force;
 q — relative frequency; 1 — experimental data; 2 — theoretical curves

Рисунок 7. Механическая характеристика ЭММР (в о.е.)

Figure 7. Mechanical characteristics of EMMR (in r.u.)

Выводы

В связи с интенсивным развитием нанотехнологий и нанохимии создаются новые инновационные материалы с заранее заданными физическими свойствами. Под воздействием внешних температурных, электрических и магнитных полей они могут деформироваться, т.е. изгибаться, растягиваться, сжиматься и раскручиваться. На сегодняшний день микроробототехника является одним из новых направлений разработки средств современной техники в различных отраслях промышленности.

В работе предложена новая конструкция электромеханического микроробота, для которой была создана математическая модель. Экспериментальные данные подтвердили полученные теорети-

ческие положения. Проектирование и создание автоматических и роботизированных систем диагностики различного технологического оборудования невозможны без микророботов, дополненных электронными устройствами МЭМС, как

одних из средств автоматизации в будущем. Поэтому исследования в данной области являются актуальными и совершенно необходимыми как во всех отраслях промышленности, так и в повседневной жизнедеятельности людей.

Список источников

1. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Фомин Л.Ф., Чашухин В.Г. Механика миниатюрных роботов / Ин-т проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М.: Наука, 2010. 271 с. ISBN 978-5-02-036969-6.
2. Spearing S.M. Materials Issues in Microelectromechanical Systems (MEMS) // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 48. No. 1. P. 179–196. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00294-3.
3. Mishra M.K., Dubey V., Mishra P.M., Khan I. MEMS Technology: A Review // *Journal of Engineering Research and Reports*. 2019. Vol. 4 (1). P. 1–24. doi: 10.9734/jerr/2019/v4i116891.
4. Judy J.W. Microelectromechanical Systems (MEMS): Fabrication, Design and Applications // *Smart Materials and Structures*. 2021. Vol. 10. No. 6. P. 1115–1123. doi: 10.1088/0964-1726/10/6/301.
5. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В. Методика инженерного расчёта электропружинного привода // *Электротехнические комплексы и системы: матер. Всеросс. науч.-практ. конф., посвящённой 110-летию А.М. Бамдаса*. Уфа: РИК УГАТУ, 2015. С. 278–284. EDN: UXHMST.
6. Сафиуллин Р.А. Численный расчёт характеристик композитного электромеханического датчика вибраций // *Техника и технология: новые перспективы развития*. М.: Спутник+, 2016. С. 5–11. EDN: XSCVTB.
7. Сафиуллин Р.А., Галеев Р.Ф., Мухаметзянов И.А. Инженерный расчёт характеристик электромеханического преобразователя с композитным вторичным элементом // *Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: матер. IX Междунар. науч.-техн. конф.* Благовещенск: РИО АмГУ, 2019. С. 71–76. EDN: LIMNNQ.
8. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Сафиуллин Р.А. Многофункциональный спиральный датчик скорости и ускорения // *Технология машиностроения*. 2019. № 6. С. 34–40. EDN: DFSTAT.
9. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for Processing Signals and Data from Electrical Machine // 2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020), National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, March 12–14 2020. Moscow, 2020. P. 1–5. doi: 10.1109/REEPE49198.2020.9059225.
10. Сафиуллин Р.А. Технологии разработки программного обеспечения современных ЭВМ: учебн. пособие. Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. 182 с.
11. Сафиуллин Р.А. К вопросу о математическом и программном обеспечении станков с ЧПУ // *Успехи современной науки и образования*. 2017. Vol. 1 (1). С. 118–125. EDN: XROTTR.
12. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. / Под ред. С.М. Каплунова; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. М.: Наука, 2006. Кн. 1: 383 с.; Кн. 2: 376 с. ISBN 5-02-033952-0.
13. Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: учебн. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2016. 171 с.
14. Поезжаева Е.В. Промышленные роботы: учебн. пособие: в 3 ч. Пермь: Изд-во Перм. ГТУ, 2006. Ч. 1: 64 с.
15. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф., Ишмурастов Ю.Г., Ямалтдинов Р.А. Проектирование дефектоскопа на основе спирального электропривода // *Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. ст.* / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2019. С. 121–128. EDN: SMDDBU.
16. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Ayupova A.R. Spring Drive for Defectoscope // *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019ICOECS)*, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, October 22–25 2019. Ufa, 2019. P. 616–619. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949970.
17. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А., Вавилов В.Е., Максудов Д.В. Специальные электромеханические системы с вибрационными преобразователями. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2021. 470 с.

18. Henner V., Belozerova T., Forinash K. *Mathematical Methods in Physics*. USA: CRC Press, 2019. 852 p. ISBN 978-1568813356.

19. Сафиуллин Р.А. Управление движением электромеханического микроробота // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 6. С. 57–65. doi: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2020-6-57-65>.

20. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. New York: «Dover» Publ, 2020. 1152 p. ISBN: 0486411478.

References

1. Gradetskii V.G., Knyaz'kov M.M., Fomin L.F., Chashchukhin V.G. *Mekhanika miniatyurnykh robotov* [Mechanics of Miniature Robots]. In-t problem mekhaniki im. A.Yu. Ishlinskogo RAN. Moscow, Nauka Publ., 2010. 271 p. ISBN 978-5-02-036969-6. [in Russian].

2. Spearing S.M. Materials Issues in Microelectromechanical Systems (MEMS). *Acta Materialia*, 2020, Vol. 48, No. 1, pp. 179–196. doi: [10.1016/S1359-6454\(99\)00294-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00294-3).

3. Mishra M.K., Dubey V., Mishra P.M., Khan I. MEMS Technology: A Review. *Journal of Engineering Research and Reports*, 2019, Vol. 4(1), pp. 1–24. doi: [10.9734/jerr/2019/v4i116891](https://doi.org/10.9734/jerr/2019/v4i116891).

4. Judy J.W. Microelectromechanical Systems (MEMS): Fabrication, Design and Applications. *Smart Materials and Structures*, 2021, Vol. 10, No. 6, pp. 1115–1123. doi: [10.1088/0964-1726/10/6/301](https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/6/301).

5. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Maksudov D.V. Metodika inzhenernogo rascheta elektropruzhinogo privoda [Method of Engineering Calculation of Electric Spring Drive]. *Materialy vs Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy», posvyashchennoi 110-letiyu A.M. Bamdas, Ufa, Rossia, 17 Oktyabrya 2015*. [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Electrotechnical Complexes and Systems» dedicated to the 110th anniversary of A.M. Bamdas, Ufa, Russia, October, 17, 2015]. Ufa, RIK UGATU, 2015, pp. 278–284. EDN: UXHMST. [in Russian].

6. Safiullin R.A. Chislennyi raschet kharakteristik kompozitnogo elektromekhanicheskogo datchika vibratsii [Numerical Calculation of the Characteristics of a Composite Electromechanical Vibration Sensor] *Tekhnika i tekhnologiya: novye perspektivy razvitiya — Technique and Technology: New Development Prospects*. Moscow, Sputnik+ Publ., 2016, pp. 5–11. EDN: XSCVTB. [in Russian].

7. Safiullin R.A., Galeev R.F., Mukhametzhanov I.A. Inzhenernyi raschet kharakteristik elektromekhanicheskogo preobrazovatelya s kompozitnym vtorichnym elementom [Engineering Calculation of the Characteristics of the Electromechanical Transducer with a Composite Secondary Element]. *Materialy IX mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Energy: Management, Quality and Energy Efficiency»]. Blagoveshchensk, RIO AmGU, 2019, pp. 71–76. EDN: LIMNNQ. [in Russian].

8. Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Maksudov D.V., Safiullin R.A. Mnogofunktsional'nyi spiral'nyi datchik skorosti i uskoreniya [Multi-functional Spiral Speed and Acceleration Sensor]. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Machine Building Technology*, 2019, No. 6, pp. 34–40. EDN: DFSTAT. [in Russian].

9. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for Processing Signals and Data from Electrical Machine. *2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020), National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, March 12–14 2020*. Moscow, 2020, pp. 1–5. doi: [10.1109/REEPE49198.2020.9059225](https://doi.org/10.1109/REEPE49198.2020.9059225).

10. Safiullin R.A. *Tekhnologii razrabotki programmno obespecheniya sovremennykh EVM: uchebnoe posobie* [Technologies of Software Development of Modern Computers: Textbook]. Ufa, RITs BashGU, 2018. 182 p. [in Russian].

11. Safiullin R.A. K voprosu o matematicheskom i programmnom obespechenii stankov s ChPU [To the Question of Mathematical and Software of CNC Machines]. *Uspekhi sovremennoi nauki i obrazovaniya — Successes of Modern Science and Education*, 2017, Vol. 1 (1), pp. 118–125. EDN: XROTTR. [in Russian].

12. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. *Teoreticheskie osnovy robototekhniki: v 2 kn.* [The Theoretical Foundations of Robotics: in 2 Book; Institute of Engineering named after A.A. Blagonravov RAS. Moscow, Nauka Publ., 2006. Book 1: 383 p.; Book 2: 376 p. ISBN 5-02-033952-0.

13. Gurtov V.A., Belyaev M.A., Baksheva A.G. *Mikroelektromekhanicheskie sistemy: uchebnoe posobie* [Microelectromechanical systems: Textbook]. Petrozavodsk, Iz-vo PetrGU, 2016. 171 p. [in Russian].

14. Poezhaeva E.V. *Promyshlennye roboty: ucheb. posobie: v 3 ch.* [Industrial Robots: Textbook: in 3 Parts]. Perm', Izd-vo Perm GTU, 2006. Part 1: 64 p. [in Russian].

15. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Ishmurotov Yu.G., Yamaltdinov R.A. Proektirovanie defektoskopa na osnove spiral'nogo elektroprivoda [Designing a Flaw Detector Based on a Spiral Electric Drive]. *Sbornik nauchno-tekhn. statei «Aktual'nye problemy elektroenergetiki», Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva* [Collection of Scientific and Technical Articles «Actual Problems of the Electric Power Industry», Nizhny Novgorod STU named for R.E. Alekseev]. Nizhnii Novgorod, 2019, pp. 121–128. EDN: SMDBBU. [in Russian].
16. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Ayupova A.R. Spring Drive for Defectoscope. *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019ICOECS), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, October 22-25 2019*. Ufa, 2019, pp. 616–619. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949970.
17. Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Safiullin R.A., Vavilov V.E., Maksudov D.V. *Spetsial'nye elektromekhanicheskie sistemy s vibratsionnymi preobrazovatelyami* [Special Electromechanical Systems with Vibration Converters]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2021. 470 p. [in Russian].
18. Henner V., Belozeroва T., Forinash K. *Mathematical Methods in Physics*. USA: CRC Press, 2019. 852 p. ISBN 978-1568813356.
19. Safiullin R.A. Upravlenie dvizheniem elektromekhanicheskogo mikrorobota [Motion Control of an Electromechanical Microrobot]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika — Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*, 2020, Vol. 63, No. 6, pp. 57–65. doi: <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2020-6-57-65>. [in Russian].
20. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. New York: «Dover» Publ, 2020. 1152 p. ISBN 0486411478.

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 26.09.2023; принята к публикации 28.09.2023.

The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 26.09.2023; accepted for publication 28.09.2023.

Научная статья

УДК 004.383.3

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-167-178

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА НАВИГАЦИИ И ФОРМИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ТРАЕКТОРИЙ АВТОНОМНОГО ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ МНОГОЧИСЛЕННЫХ ПОМЕХ И ПРЕПЯТСТВИЙ

**Алина Александровна Зайцева****Alina A. Zaitseva**

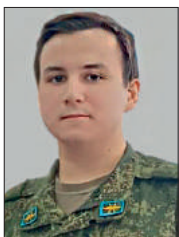
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Дмитрий Константинович Кильмаков****Dmitriy K. Kilmakov**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Евгений Артемович Зайцев****Evgeny A. Zaitsev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Дим Ринатович Култаев****Dim R. Kultaev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Матвей Владимирович Белявцев****Matvey V. Belyavtsev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Актуальность

Рассматривается задача навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при осуществлении мониторинга лесных экосистем.

Актуальность данного исследования состоит в разработке алгоритмов навигации и формировании безопасных траекторий автономного полета БПЛА в условиях многочисленных помех и препятствий.

Цель исследования

Анализ современных средств мониторинга лесных экосистем.

Задачи исследовательского проекта

1. При решении задачи навигации предлагается использовать технологии «машинного зрения». Эти технологии позволяют находить и локализовать на текущем изображении опасные объекты сцены для формирования сигналов управления движением БПЛА по безопасным траекториям.

2. Разработка алгоритма сегментации изображения окружающей обстановки на основе статистического анализа гистограмм яркости областей изображения. Данный алгоритм позволяет осуществить зонирование воздушного пространства по уровню опасности с использованием введенной совокупности текстурных признаков.

3. Оценка эффективности алгоритма сегментации изображения лесного массива на основе вычисления статистических текстурных характеристик. Излагается алгоритм формирования траектории движения низколетящих БПЛА для уклонения от опасности.

Метод исследования

Определение текстурных признаков на основе статистического анализа гистограмм яркости областей изображения.

Результаты

Алгоритм формирования траектории движения низколетящих БПЛА в условиях многочисленных помех и препятствий позволяет оценивать потенциально опасные участки траектории полета с целью разработки рекомендаций по корректировке координат и параметров движения, обеспечивающих требуемый уровень безопасности, включая автоматическое маневрирование для уклонения от опасности.

В ходе данного исследовательского проекта был разработан алгоритм навигации, вследствие этого представленные в работе результаты моделирования подтверждают высокую эффективность предложенного алгоритма сегментирования изображений лесных массивов, полученных от фотокамер или лазерно-локационным методом с целью формирования траектории движения низколетящих БПЛА в задачах мониторинга лесных экосистем.

Ключевые слова

управление полетом, траектория, безопасность, сегментация, изображение, текстурные характеристики

Для цитирования: Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Зайцев Е. А., Култаев Д. Р., Белявцев М. В. Разработка алгоритма навигации и формирование безопасных траекторий автономного полета беспилотного летательного аппарата в условиях многочисленных помех и препятствий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 167–178. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-167-178>.

Original article

DEVELOPMENT OF NAVIGATION ALGORITHM AND FORMATION OF SAFE TRAJECTORIES OF AUTONOMOUS FLIGHT OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE UNDER CONDITIONS OF NUMEROUS INTERFERENCES AND OBSTACLES

Relevance

The problem of navigation of unmanned aerial vehicles (UAV) in monitoring forest ecosystems is considered.

The relevance of this study lies in the development of navigation algorithms and the formation of safe trajectories for autonomous flight of UAVs in the face of numerous interference and obstacles.

Aim of research

Analysis of modern means of forest ecosystem monitoring.

The objectives of the research project are:

1. When solving the navigation problem, it is proposed to use «machine vision» technologies. These technologies make it possible to find and localize dangerous scene objects on the current image in order to generate signals for controlling the movement of the UAV along safe trajectories.

2. Development of an algorithm for segmenting the image of the environment based on a statistical analysis of the histograms of the brightness of image areas. This algorithm makes it possible to perform airspace zoning according to the hazard level using the introduced set of textural features.

3. Evaluation of the efficiency of the forest image segmentation algorithm based on the calculation of statistical texture characteristics. An algorithm for forming the trajectory of low-flying UAVs to avoid danger is presented.

Research method

Determination of texture features based on statistical analysis of histograms of brightness of image areas.

Results

The algorithm for forming the trajectory of low-flying UAVs in conditions of numerous interference and obstacles makes it possible to evaluate potentially dangerous sections of the flight trajectory in order to develop recommendations for adjusting coordinates and movement parameters that ensure the required level of safety, including automatic maneuvering to avoid danger.

During this research project, a navigation algorithm was developed, as a result of which the modeling results presented in the work confirm the high efficiency of the proposed algorithm for segmenting images of forest areas obtained from cameras or laser-location methods in order to form the trajectory of low-flying UAVs in tasks of monitoring forest ecosystems.

Keywords

flight control, trajectory, safety, segmentation, image, texture characteristics

For citation: Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Zaitsev E. A., Kul'taev D. R., Belyavtsev M. V. Razrabotka algoritma navigatsii i formirovanie bezopasnykh traektorii avtonomnogo poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyakh mnogochislennykh pomekh i prepyatstviy [Development of Navigation Algorithm and Formation of Safe Trajectories of Autonomous Flight of an unmanned aerial vehicle under Conditions of Numerous Interferences and Obstacles]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 167–178 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-167-178>.

Введение

Россия обладает обширными лесными богатствами, требующими постоянных мероприятий по охране и защите. Важную роль в решении этих задач играет мониторинг лесных экосистем,

который является системой наблюдения и оценки состояния лесного фонда [1]. По масштабу охватываемой наблюдением территории различают спутниковый, авиационный и наземный мониторинг.

Спутниковый мониторинг осуществляется с помощью космических средств наблюдения и позволяет обследовать обширные лесные территории. Однако при этом не удается детально исследовать локальные аномалии, связанные с возникновением лесных пожаров, очагов вредителей и болезней леса, а также с незаконной хозяйственной деятельностью. Наземный мониторинг, который отслеживает состояние леса с помощью вышек и наземного транспорта, оснащенных камерами видеонаблюдения и другими видами датчиков, оказывается эффективным на плотнозаселенных территориях, где есть возможность обеспечения бесперебойными энергоносителями. Авиационный мониторинг проводится с использованием летательных аппаратов различных типов, что позволяет объединить преимущества оперативного обследования обширных территорий с детальным анализом выявленных аномалий [2, 3].

Одним из перспективных методов авиационного мониторинга является применение малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с массой менее 20 кг. В ряде работ [1, 4–6] проведен подробный анализ характеристик и возможностей использования БПЛА в интересах решения лесохозяйственных задач. В качестве полезной нагрузки БПЛА снабжаются видеокамерами оптического и инфракрасного диапазонов, фотоаппаратурой, а также сканирующими устройствами различного назначения (радары, лидарами, лазерными сканерами). Наиболее весомые преимущества достигаются при применении БПЛА непосредственно внутри лесного массива. Однако существующие в настоящее время БПЛА самолетного и вертолетного типов (включая мультикоптеры) непригодны для такого способа мониторинга, так как велика вероятность повреждения элементов их конструкции, в первую очередь

винтов, при перемещении в лесу. Поэтому для осуществления мониторинга лесных массивов целесообразно использовать БПЛА специальных конструкций с обтекаемыми формами и скрытыми в корпусе несущими винтами [7, 8].

В связи с этим возникает задача разработки алгоритмов навигации и формирования безопасных траекторий автономного полета БПЛА в условиях многочисленных помех и препятствий. Для решения этой задачи используются технологии «машинного зрения», позволяющие на основе информации, полученной от бортовых сенсорных устройств в видимом, инфракрасном и радиолокационном диапазонах, находить и локализовывать на текущем изображении заданные объекты сцены для определения значений текущих координат этих объектов с целью формирования сигналов управления движением БПЛА [9, 10].

В данной работе предлагается алгоритм формирования траектории движения низколетающих БПЛА в задачах мониторинга лесных экосистем на основе сегментации изображений лесных массивов, полученных от фотокамер или лазерно-локационным методом.

Постановка задачи

Ставится задача формирования гибкой траектории полета с учетом существующей априорной информации о рассматриваемой сцене, включающей тип и характер объектов сцены, их взаимное расположение, геометрические и яркостные характеристики, характеристики текстуры, оптического контраста, позволяющей построить её эталонное изображение, а также с учетом оперативной информации о наблюдаемой в процессе полета сцене, получаемой непосредственно на борту летательного аппарата.

Центральное место в поставленной задаче занимает процедура обработки и

распознавания изображений объектов для выявления потенциально опасных участков траектории полета, оценки степени их опасности и разработки оптимального косвенного управления БПЛА, формируемого путем программирования движения по упреждающей траектории [11, 12].

Для комплексной оценки опасностей, возникающих при движении БПЛА по территории лесного массива, предлагается следующее зонирование окружающего воздушного пространства по уровню опасности:

— «открытые» участки траектории — области пространства между деревьями, не содержащие видимых препятствий;

— «полупроходимые» участки — области пространства, в пределах которых имеются листья и тонкие ветки;

— «непроходимые» участки — области пространства, в пределах которых имеются стволы деревьев и крупные ветки.

Требуется на основе информации, полученной из фотоснимков или от лазерных сканеров, выполнить сегментацию изображения окружающей обстановки на «открытые», «полупроходимые» и «непроходимые» области.

С этой целью предлагается использовать текстурные дескрипторы, полученные путем статистического анализа гистограмм яркости областей изображения. Статистические методы позволяют отнести текстуру области к одному из следующих типов: гладкой, грубой, зернистой и т.д. Целесообразность использования методов сегментации на основе текстурных признаков обусловлена тем, что «открытые», «полупроходимые» и «непроходимые» области обладают резко различающимися текстурными характеристиками. Так, открытые участки представляют собой «светлые гладкие» области, «непроходимые»

участки — «темные гладкие», а «полупроходимые» — «зернистые» области с промежуточным значением яркости.

Метод определения текстурных признаков на основе статистического анализа гистограмм яркости областей изображения

Один из наиболее распространенных подходов, применяемых для описания текстуры, состоит в использовании статистических характеристик, определяемых по гистограмме яркости всего изображения или его области [13]. Пусть z_i — дискретная случайная величина, значениями которой являются уровни яркости изображения. Обозначим через $p(z_i)$, $i = 1, 2, \dots, L$ соответствующую нормированную гистограмму, где L — число возможных значений яркости. Таким образом, число $p(z_i)$ оценивает относительную частоту появления величины яркости z_i на изображении. Характер распределения яркости изображения можно описать с помощью статистических центральных моментов:

$$\mu_n = \sum_{i=1}^L (z_i - m)^n p(z_i),$$

где n — порядок момента;

m — среднее значение яркости области:

$$m = \sum_{i=1}^L z_i p(z_i).$$

Так как гистограмма нормирована, сумма всех ее частот равна 1, поэтому из приведенных формул следует, что $\mu_0 = 1$, $\mu_1 = 0$. При описании текстуры важное значение имеет момент второго порядка:

$$\mu_2 = \sum_{i=1}^L (z_i - m)^2 p(z_i),$$

т.е. дисперсия σ^2 . Она является мерой яркостного контраста, что можно использовать для построения дескрипторов относительной гладкости яркости области:

$$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2}.$$

Мера относительной гладкости равна 0 для областей с постоянной яркостью и близка к 1 для областей с большими отклонениями уровней яркости.

Момент третьего порядка

$$\mu_3 = \sum_{i=1}^L (z_i - m)^3 p(z_i)$$

оказывается полезным для определения асимметрии гистограммы: наблюдается ли на ней смещение влево (при отрицательном значении момента) или вправо (при положительном значении). Это дает ясное представление о перераспределении яркости в сторону светлых или темных значений от среднего.

В разрабатываемом алгоритме навигации БПЛА при сегментации изображения будут использоваться такие текстурные дескрипторы, как мера средней яркости m , мера средней контрастности $\sigma = \sqrt{\mu_2}$, мера относительной гладкости R и асимметрия яркости μ_3 . Все величины вычисляются на основе приведения случайных величин к диапазону $[0, 1]$.

Алгоритм сегментации изображения окружающей обстановки на основе вычисления статистических текстурных характеристик

Предлагаемый алгоритм предусматривает выполнение следующих этапов.

Первый этап. Предварительная обработка изображений. В рамках предварительной обработки изображений требуется произвести следующие операции: преобразование цветного изображения в полутоновое, изменение яркости изображения для усиления контраста или перевода негативного изображения в позитивное, фильтрация с целью ослабления шумовой составляющей и т.д.

Второй этап. Формирование квадратной или прямоугольной пространствен-

ной области (маски) с центром в точке изображения с координатами (x, y) , в рамках которой определяются текстурные характеристики. В процессе обработки центр области перемещается от пикселя к пикселю по всему изображению. Полученный результат размещается в центре текущего обрабатываемого участка. Размер участка выбирается исходя из масштаба изображения, т.е. расстояния от БПЛА до деревьев, между которыми прокладывается текущий маршрут. Желательно использовать области с нечетными размерами, так как в этом случае у маски имеется выраженная центральная точка.

Для обработки граничных пикселей исходное изображение увеличивается с помощью продолжения приграничных значений.

Третий этап. Вычисление для каждого участка текстурных признаков. В результате формируется матрица, число строк которой равно количеству пикселей изображения, а четыре столбца содержат текстурные дескрипторы, вычисленные для каждого участка.

Четвертый этап. Сегментация изображения лесного массива на основе матрицы текстурных дескрипторов. Для сегментации используются алгоритм кластеризации по математическому ожиданию или алгоритм нечеткой кластеризации c -средних (c -means). Количество кластеров выбирается равным трем и соответствует «открытым», «непроходимым» и «полупроходимым» областям. Далее восстанавливается исходное расположение пикселей изображения по горизонтали и вертикали.

Пятый этап. Анализ полученного сегментированного изображения для формирования траектории движения БПЛА. При этом размер ближайшей «открытой» области сравнивается с размером БПЛА. Если БПЛА больше, то к «открытой» области добавляются «полу-

проходимые» участки, и снова оценивается возможность пролета устройства. Если объединенный «открытый + полупроходимый» участок меньше БПЛА, то переходят к анализу соседних «открытых» или «полупроходимых» участков.

Оценка эффективности алгоритма сегментации изображения лесного массива на основе вычисления статистических текстурных характеристик

В качестве исходных данных для апробации предложенного алгоритма выбрано фотоизображение одиночного дерева, так как на нем достаточно просто проследить соответствие между начальным изображением и полученным после кластеризации, а также визуализированные результаты лазерного сканирования древостоя.

Вычисления проводились в среде MATLAB R2010, а с использованием функций пакета Image Processing Toolbox [14].

Размер квадратного участка, в рамках которого вычислялись текстурные признаки, выбран равным 9×9 пикселей. При выводе изображений проводится расширение его динамического диапазона, согласно которому пиксели с минимальным значением признака показываются черными, с максимальным — белыми, а пиксели с промежуточными значениями имеют среднюю яркость.

Текстурные меры для «открытых», «полупроходимых» и «непроходимых» участков изображения одиночного ветвистого дерева, полученные после кластеризации по математическому ожиданию и использования четырех признаков, даны в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, результаты кластеризации по отдельным признакам адекватно отражают картину изменения яркости участков изображения. Так, наибольшую среднюю яркость имеют открытые участки, наименьшую среднюю яркость — ствол дерева, крупные ветки и густая листва, промежуточное значение яркости — тонкие ветки и редкая листва. Наименьшее отклонение от среднего значения в пределах участка наблюдается на открытом пространстве, земле и стволе дерева, а среднее и максимальное значения показывает крона дерева. Аналогичная картина наблюдается при отображении кластеризации по признаку «относительная гладкость». Признак «асимметрия яркости» при описании текстуры имеет смысл учитывать только при большой асимметрии гистограммы яркости в сторону темных или светлых значений от среднего.

Наибольший вклад в результат кластеризации по четырем признакам вносит дескриптор «средняя яркость», остальные характеристики проявляются лишь на отдельных участках. Этот результат соответствует специфике решаемой

Таблица 1. Текстурные меры для «открытых», «полупроходимых» и «непроходимых» областей изображения одиночного ветвистого дерева, полученные методом кластеризации по математическому ожиданию с использованием четырех признаков

Table 1. Texture measures for «open», «semi-passable» and «impassable» areas of the image of a single branched tree, obtained by the method of clustering by mathematical expectation using four features

Область	Средняя яркость	Средняя контрастность	Относительная гладкость	Асимметрия яркости
«Непроходимая»	0,3088	0,0959	0,0131	0,0016
«Полупроходимая»	0,5484	0,1177	0,0169	-0,0003
«Открытая»	0,8083	0,0288	0,0026	-0,0003

задачи. При необходимости увеличить влияние на результат кластеризации признаков «средняя контрастность», «относительная гладкость» и «асимметрия яркости» рекомендуется использовать повышенные весовые коэффициенты.

Проведем сравнение результатов выполненной сегментации с сегментацией фотоизображения ветвистого дерева с использованием алгоритма нечеткой кластеризации *c*-средних (*c-means*). Результаты показаны в таблице 2.

Сравнение результатов сегментации по четырем признакам методами кластеризации по математическому ожиданию и нечеткой кластеризации говорит о примерно одинаковой эффективности рассматриваемых алгоритмов. При этом алгоритм нечеткой кластеризации выполняется медленнее, что особенно заметно на больших изображениях, поскольку помимо матрицы центров искомым кластерам (таблица 2) выдает

также матрицу функций принадлежности значений признака по каждому из кластеров. Полученные функции принадлежности могут использоваться для дальнейшего анализа или корректировки результатов сегментации. Поэтому выбор метода кластеризации зависит от специфики решаемой задачи.

Оценим далее пригодность предложенного алгоритма для сегментации изображения, полученного путем визуализации результатов лазерного сканирования древостоя. Результаты кластеризации по математическому ожиданию с использованием текстурных признаков «средняя яркость», «средняя контрастность», «относительная гладкость», «асимметрия яркости» приведены в таблице 3.

Анализ результатов свидетельствует о том, что лазерно-локационный метод обладает достаточной разрешающей способностью, чтобы использовать его

Таблица 2. Текстуальные меры для «открытых», «полупроходимых» и «непроходимых» областей изображения одиночного ветвистого дерева, полученные методом нечеткой кластеризации с использованием четырех признаков

Table 2. Texture measures for «open», «semi-passable» and «impassable» image areas of a single branched tree, obtained by fuzzy clustering using four features

Область	Средняя яркость	Средняя контрастность	Относительная гладкость	Асимметрия яркости
«Непроходимая»	0,3022	0,0896	0,0116	0,0015
«Полупроходимая»	0,5438	0,1220	0,0173	-0,0002
«Открытая»	0,8126	0,0248	0,0022	-0,0002

Таблица 3. Текстуальные меры для «открытых», «полупроходимых» и «непроходимых» областей изображения лазерного сканирования древостоя, полученные методом кластеризации по математическому ожиданию с использованием четырех признаков

Table 3. Texture measures for «open», «semi-passable» and «impassable» areas of the forest stand laser scanning image, obtained by the method of clustering by mathematical expectation using four features

Область	Средняя яркость	Средняя контрастность	Относительная гладкость	Асимметрия яркости
«Непроходимая»	0,3965	0,0521	0,0033	0,0001
«Полупроходимая»	0,5099	0,1281	0,0175	0,0012
«Открытая»	0,7180	0,1264	0,0175	-0,0014

для выделения участков лесных массивов, пригодных для построения траектории движения БПЛА. При этом лазерные сканеры обладают рядом преимуществ перед фото- или видеокамерами, подробно рассмотренными в работе [15]. В частности, лидары и лазерные сканеры способны работать в ночное время и в любое время года, так как регистрируют собственное, а не отраженное солнечное излучение.

Алгоритм формирования траектории движения низколетящих БПЛА для уклонения от опасности

Предложенный алгоритм сегментации изображения окружающей обстановки позволяет осуществить зонирование воздушного пространства по уровню опасности. Обозначим область пространства, соответствующую «открытым» участкам траектории, через Ω_1 , «полупроходимым» участкам — через Ω_2 и «непроходимым» участкам — через Ω_3 . Рассмотрим алгоритм формирования траектории движения БПЛА, позволяющий двигаться ему вдоль границы области Ω_3 .

Пусть на определенном этапе полета возникла опасность пересечения границы области Ω_3 , и ожидаемая точка $[x_0; y_0] \in \Omega_3$ (рисунок 1). В связи с этим требуется выполнить маневр, связанный с изменением направления движения. Для осуществления такого маневра воспользуемся математическими операциями параллельного переноса и поворота системы координат.

Выполняя повороты по часовой и против часовой стрелки (в зависимости от положения исходной точки относительно области Ω_3 , можно обнаружить две точки, $[x_1; y_1]$ и $[x_2; y_2]$, находящиеся на границе этой области. Сделаем шаг вдоль прямой, соединяющей точки $[x_1; y_1]$ и $[x_2; y_2]$, равный расстоянию

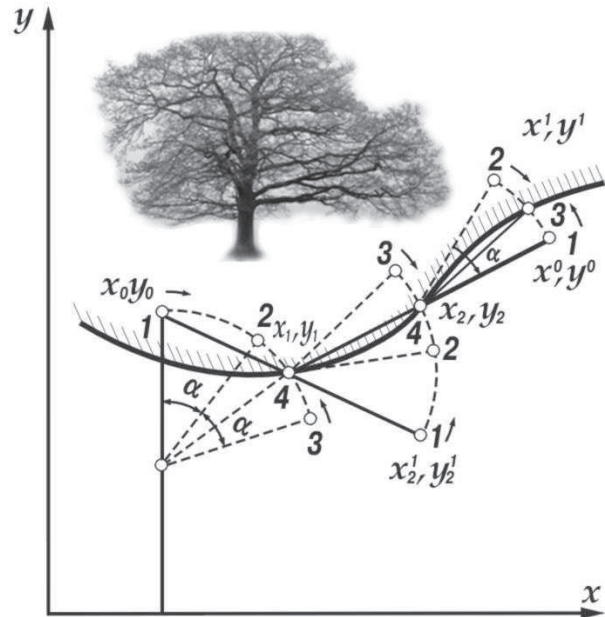


Рисунок 1. Поиск траектории маневра

Figure 1. Finding the maneuver trajectory

между этими точками. Оценим положение полученной точки $[x^0; y^0]$ относительно области Ω_3 .

Рассмотрим два возможных случая.

1. Точка с координатами $[x^0; y^0]$ находится вне области Ω_3 , как это показано на рисунке 1. Для выхода на границу области Ω_3 необходимо выполнить поворот вокруг точки $[x_2; y_2]$ против часовой стрелки. Координаты следующей точки рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} x^1 &= x_2 + (x^0 - x_2)\cos\alpha - (y^0 - y_2)\sin\alpha; \\ y^1 &= y_2 + (x^0 - x_2)\sin\alpha + (y^0 - y_2)\cos\alpha, \end{aligned} \tag{1}$$

где α — угол поворота.

2. Второй случай соответствует положению точки с координатами $[x^0; y^0]$ внутри области Ω_3 . Для выхода на границу необходимо осуществить поворот по часовой стрелке. Формулы для определения положения точки $[x^1; y^1]$ имеют вид:

$$\begin{aligned} x^1 &= x_2 + (x^0 - x_2)\cos\alpha + (y^0 - y_2)\sin\alpha; \\ y^1 &= y_2 - (x^0 - x_2)\sin\alpha + (y^0 - y_2)\cos\alpha. \end{aligned} \tag{2}$$

Дальнейший выход к границе осуществляем путем оценки положения точки $[x^1; y^1]$ относительно областей Ω_1 ,

Ω_2 и Ω_3 . Если точка $[x^1; y^1] \in \Omega_1 \cup \Omega_2$, то определение координат следующей точки $[x^2; y^2]$ осуществляется по формулам (1). Эта процедура продолжается до тех пор, пока первый случай не перейдет во второй случай, или наоборот.

Таким образом, алгоритм движения вдоль границы опасной зоны осуществляется в следующей последовательности.

1. По двум исходным точкам $[x_1; y_1]$ и $[x_2; y_2]$ определяются координаты следующей точки $[x^0; y^0]$.

2. Оценивается положение точки $[x^0; y^0]$ относительно областей Ω_1, Ω_2 и Ω_3 .

3. Если $[x^1; y^1] \in \Omega_1 \cup \Omega_2$, то необходимо уточнить координаты точек, располагающихся ближе к границе области Ω_3 по формулам (1). Это соответствует повороту вектора скорости движения против часовой стрелки. Поворот продолжается до тех пор, пока не произойдет пересечение границы.

4. Если же $[x^0; y^0] \in \Omega_3$, то координаты следующей точки определяются по формулам (2). Это соответствует вращению по часовой стрелке.

Если отслеживаемая область имеет сложную конфигурацию, то процедуру построения границы можно разделить на два этапа: поиск и уточнение границы. В режиме поиска используются большие углы поворота, в режиме уточнения — малые.

Угол α может быть выбран из условия окончания слежения $\alpha h \leq \varepsilon$, где h — величина шага; ε — заданная точность. Если заданы точность и шаг, то можно оценить величину угла α (режим уточнения): $\alpha \leq \varepsilon/h$.

В том случае, когда в режиме поиска после неоднократного осуществления поворотов не достигается искомая граница зоны, в алгоритме предусмотрен механизм адаптации. Механизм адаптации возвращает процесс в исходную точку, уменьшает шаг и повторяет про-

цедуру. Если вновь не происходит пересечения границы после фиксированного числа поворотов, процесс уменьшения шага будет повторяться до тех пор, пока не будет найдена первая точка за границей зоны. Многоэтапная процедура последовательного уменьшения шага в зависимости от числа поворотов характеризует «глубину» адаптации.

Выводы

Представленный в данной работе алгоритм формирования траектории движения низколетящих БПЛА в условиях многочисленных помех и препятствий позволяет оценивать потенциально опасные участки траектории полета с целью разработки рекомендаций по корректировке координат и параметров движения, обеспечивающих требуемый уровень безопасности, включая автоматическое маневрирование для уклонения от опасности.

В основе этого алгоритма лежат технологии «машинного зрения», которые позволяют на основе информации, полученной от бортовых сенсорных устройств, находить и локализовывать на текущем изображении заданные объекты сцены. Основная проблема, которая возникает при использовании этих технологий в бортовых информационно-управляющих системах, заключается в необходимости распознавания опасных ситуаций в реальном масштабе времени. Предложенный в работе алгоритм сегментации изображения окружающей обстановки на основе вычисления статистических текстурных характеристик позволяет отказаться от громоздких вычислений, связанных с анализом цветных и других информационно-емких характеристик изображений. Это позволило создать эффективный механизм распознавания объектов динамически меняющихся сцен и разработать на этой основе алгоритм навигации и формиро-

вания безопасных траекторий автономного полета БПЛА.

Представленные в работе результаты моделирования подтверждают высокую эффективность предложенного алгоритма сегментирования изображений лесных массивов, полученных от фотокамер или лазерно-локационным методом, с целью формирования траектории

движения низколетящих БПЛА в задачах мониторинга лесных экосистем.

Следует отметить, что изложенный подход к формированию безопасных траекторий движения БПЛА может оказаться полезным при управлении полетом в сложных метеорологических условиях, в условиях плотной городской застройки и т.д.

Список источников

1. Коносеви́ч В.В. Разработка научно-методических подходов и технологии использования беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве: Отчет о НИР. Пушкино: ФГУ «Авиалесоохрана», 2010. 105 с.

2. Мониторинг лесных экосистем [Электронный ресурс]. URL: http://wood-prom.ru/analitika/14763_monitoring-lesnykh-ekosistem (дата обращения: 10.09.2023).

3. Мониторинг лесных земель: учеб.-метод. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Агроном. фак.; сост: Л.П. Галеева. Новосибирск: Изд-во НГАУ «Золотой колос», 2016. 147 с.

4. Коршунов Н. Воздушные роботы призваны на защиту и охрану лесов // Авиапанорама. 2015. № 4. С. 14–20.

5. Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4. С. 34–46. doi: 10.15350/2306-2827.2016.4.34. EDN: UZTNDD.

6. Медведев Е.М., Мельников С.Р. Преимущества применения лазерных сканирующих систем наземного и авиационного базирования // Горная промышленность. 2002. № 5. С. 2–4.

7. «Группа Эйр» продемонстрировала беспилотник с кольцевым крылом [Электронный ресурс]. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/34006/> (дата обращения: 10.09.2023).

8. Fleye — самый безопасный летающий дрон [Электронный ресурс]. URL: <http://www.computerra.ru/180490/fleye/> (дата обращения: 10.09.2023).

9. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2003. 280 с.

10. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилот-

ных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2009. 556 с.

11. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами. Казань: РЦ МКО, 2013. 768 с. ISBN 978-5-906158-53-6.

12. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов. Казань: РИЦ «Школа», 2015. 444 с.

13. Гонсалес Р.С., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

14. Гонсалес Р.С., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 615 с.

15. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СОРАН, 2007. 230 с.

References

1. Konosevich V.V. *Razrabotka nauchno-metodicheskikh podkhodov i tekhnologii ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v lesnom khozyaistve: Otchet o NIR* [Development of Scientific and Methodological Approaches and Technology for Using Unmanned Aerial Vehicles in Forestry: Research Report]. Pushkino, FGU «Avialesoohrana», 2010. 105 p. [in Russian].

2. *Monitoring lesnykh ekosistem* [Monitoring of Forest Ecosystems [Electronic Resource]]. URL: http://wood-prom.ru/analitika/14763_monitoring-lesnykh-ekosistem (accessed 10.09.2023). [in Russian].

3. *Monitoring lesnykh zemel': ucheb.-metod. posobie* [Monitoring of Forest Lands: Educational and Methodological Manual]. Novosibirsk, Izd-vo NGAU «Zolotoi kolos», 2016. 147 p. [in Russian].

4. Korshunov N. *Vozdushnye roboty prizvany na zashchitu i okhranu lesov* [Aer Robots Are Called upon to Protect and Protect Forests].

Aviapanorama — *Aviapanorama*, 2015, No. 4, pp. 14–20. [in Russian].

5. Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. Opyt primeneniya kvadroptera dlya monitoringa vozobnovleniya lesa [Quadrocopter Practical Application for Forest Regeneration Monitoring]. *Vestnik Povolzhskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta. SERIYA: LES. Ekologiya. Prirodopol'zovanie — Vestnik of Volga State University of Technology Series «Forest. Ecology. Nature Management»*, 2016, No. 4, pp. 34–46. doi: 10.15350/2306-2827.2016.4.34. EDN: UZTNDD. [in Russian].

6. Medvedev E.M., Mel'nikov S.R. Preimushchestva primeneniya lazernykh skaniruyushchikh sistem nazemnogo i aviatsionnogo bazirovaniya [Advantages of Using Ground-Based and Aircraft-Based Laser Scanning]. *Gornaya promyshlennost' — Mining Industry*, 2002, No. 5, pp. 2–4. [in Russian].

7. «Gruppa Eir» prodemonstrovala bespilotnik s kol'tsevim krylom [Air Group» Demonstrated a Drone with a Ring Wing] [Electronic Resource]. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/34006/> (accessed 10.09.2023). [in Russian].

8. Fleye — samyi bezopasnyi letayushchii dron [Fleye — the Safest Flying Drone] [Electronic Resource]. URL: <http://www.computerra.ru/180490/fleye/> (accessed 10.09.2023). [in Russian].

9. *Upravlenie i navedenie bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologii* [Control and Guidance of Unmanned Maneuverable Aerial Vehicles Based on Modern Information Technologies]. Ed. by M.N. Krasil'shchikov, G.G. Sebryakov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 280 p. [in Russian].

10. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov* [Modern Information Technologies in the Tasks of Navigation and Guidance of Unmanned Maneuverable Aerial Vehicles]. Ed. by M.N. Krasil'shchikov, G.G. Sebryakov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 556 p. [in Russian].

11. Moiseev V.S. *Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami* [Applied Theory of Control of Unmanned Aerial Vehicles]. Kazan, RTs MKO, 2013. 768 p. ISBN 978-5-906158-53-6. [in Russian].

12. Moiseev V.S. *Osnovy teorii effektivnogo primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Fundamentals of the Theory of Effective Use of Unmanned Aerial Vehicles]. Kazan, RITs «Shkola», 2015. 444 p. [in Russian].

13. Gonsales R.S., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital Image Processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 1104 p. [in Russian].

14. Gonsales R.S., Vuds R., Eddins S. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v srede MATLAB* [Digital Image Processing in MATLAB]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 615 p. [in Russian].

15. Medvedev E.M., Danilin I.M., Mel'nikov S.R. *Lazernaya lokatsiya zemli i lesa: uchebnoe posobie* [Laser Location of Land and Forests: Textbook]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Geolidar, Geoskosmos; Krasnoyarsk, Institut lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN, 2007. 230 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 19.09.2023; принята к публикации 26.09.2023.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 19.09.2023; accepted for publication 26.09.2023.

Научная статья

УДК 623.764:656.7

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-179-188

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЕТНОГО ТИПА

**Алина Александровна Зайцева****Alina A. Zaitseva**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Дмитрий Константинович Кильмаков****Dmitriy K. Kilmakov**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Евгений Артемович Зайцев****Evgeny A. Zaitsev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Дим Ринатович Култаев****Dim R. Kultaev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Матвей Владимирович Белявцев****Matvey V. Belyavtsev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

**Иван Петрович Силин****Ivan P. Silin**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Актуальность

Разработка алгоритма управления группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолетного типа.

Цель исследования

Повышение эффективности использования БПЛА за счет управления движением в плотных групповых порядках.

Задачи исследовательского проекта

1. Анализ математических моделей движения БПЛА в группе;
2. Синтез алгоритма координации автономных БПЛА в группе.

Методы исследования

Принципы и методы системного анализа, теорий линейных и нелинейных систем автоматического управления, линейной алгебры, функционального анализа, компьютерного моделирования.

Результаты

Алгоритм управления группой БПЛА самолетного типа отличается тем, что он обеспечивает координацию внутрисистемных взаимодействий между участниками группы за счет перевода вектора переменных состояния в заданную область дискретного пространства за один такт управления.

Ключевые слова

алгоритм, управление полетом, траектория, безопасность, линеаризация, управляющие воздействия, синтез, матрица

Для цитирования: Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Зайцев Е. А., Култаев Д. Р., Белявцев М. В., Силин И. П. Разработка алгоритма управления группой беспилотных летательных аппаратов самолетного типа // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. № 3. Т. 19. С. 179–188. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-179-188>.

Original article

DEVELOPMENT OF A CONTROL ALGORITHM FOR A GROUP OF AIRCRAFT-TYPE UNMANNED AERIAL VEHICLES

Relevance

Development of an algorithm for controlling a group of aircraft-type unmanned aerial vehicles (UAVs).

Aim of research

To improve the efficiency of using UAVs by controlling movement in dense group formations.

The objectives of the research project are:

1. Analysis of mathematical models of UAV movement in a group;
2. Synthesis of an algorithm for coordinating autonomous UAVs in a group.

Research methods

The principles and methods of system analysis, theories of linear and nonlinear automatic control systems, linear algebra, functional analysis, and computer modeling.

Results

The algorithm for controlling a group of aircraft-type UAVs is distinguished by the fact that it ensures coordination of intra-system interactions between group members by transferring a vector of state variables to a given area of discrete space in one control cycle.

Keywords

algorithm, flight control, trajectory, safety, linearization, control actions, synthesis, matrix

For citation: Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Zaitsev E. A., Kul'taev D. R., Belyavtsev M. V., Silin I. P. Razrabotka algoritma upravleniya gruppoy bespilotnykh letatel'nykh apparatov samoletnogo tipa [Development of a Control Algorithm for a Group of Aircraft-Type Unmanned Aerial Vehicles]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 179–188 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-179-188>.

Введение

В последнее время интерес к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) значительно возрос. Это связано с тем, что успехи, достигнутые в разработке БПЛА, создают хорошие предпосылки для широкого круга их применения, в частности для исследования земной поверхности, в том числе зон стихийных бедствий, мест чрезвычайных ситуаций, для обнаружения очагов пожаров, для измерения метеорологических данных, радиационного фона и других факторов, а также для обеспечения телекоммуникаций, мониторинга трубопроводов и линий электропередачи, патрулирования границ. Связано это с тем, что БПЛА гораздо дешевле пилотируемой авиации, более просты в обслуживании, их полет может быть намного продолжительнее, они также могут работать в темноте, в условиях плохой видимости, кроме того, они могут применяться в ситуациях, угрожающих жизни пилота [1].

Дальнейшее развитие функциональных возможностей БПЛА привело к созданию дистанционно управляемых авиационных систем, автономно реализующих свое функциональное предназначение путем формирования и выполнения внутренних динамических алгоритмов функционального поведения при эпизодическом вмешательстве оператора с целью постановки новой задачи для групп БПЛА и контроля за их поведением [2]. Возможности дистанционно управляемых авиационных систем в наибольшей степени соответствуют случаю управления группой БПЛА, когда управляющие воздействия формируются как результат коллективного целенаправленного взаимодействия в интересах решения общей задачи [3]. Под группой БПЛА обычно понимают некоторую совокупность летательных аппаратов, которые подчиняются определенным правилам сбора в группу, способны

выдерживать свое место в строю на прямолинейных и криволинейных участках полета всей группы в целом, реагировать на изменения окружающей среды и взаимодействовать друг с другом для решения единой целевой задачи, поставленной перед группой [4, 5].

Групповое применение летательных аппаратов способствует повышению их эффективности на различных стадиях операции. Причем требования, предъявляемые к построению группы на отдельных этапах, могут быть различными и часто имеют противоречивый характер. Это определяет необходимость гибкого формирования группы средств в операции, которое позволяет выбирать параметры пространственно-временного и комбинаторного взаимного положения элементов, исходя из требований каждого этапа и операции в целом.

С точки зрения пространственно-временного положения элементов в группе последние могут выполнять:

- групповой маневр, при котором номинальные траектории движения всех элементов конгруэнтны;
- индивидуальный маневр, при котором каждый элемент, независимо от других, может менять параметры траектории движения;
- смешанный маневр, при котором возможно изменение параметров движения как всей группой средств, так и отдельными элементами.

Что касается комбинаторного положения, то оно характеризует структуру построения группы элементов различных типов, например целевых элементов (непосредственно решающих задачу) и обеспечивающих элементов. Формирование пространственно-временной модели построения группы должно базироваться на учете ограничений по располагаемой энергетике, маневренным возможностям, взаимной расстановке и т.д.

На систему управления группой БПЛА возлагается задача согласованного управления каждым из них для организации движения строем по заданной траектории, которая обеспечивает наиболее эффективное достижение цели, поставленной перед группой. Система управления полётом БПЛА в строю осуществляет контроль правильности удержания траектории каждым летательным аппаратом с точностью, обеспечивающей безопасность в плотных групповых порядках. На эту же систему возлагается задача межсамолётной навигации и организации взаимодействия БПЛА по информационным каналам с целью определения взаимных координат.

В данном исследовательском проекте рассматривается задача анализа математических моделей движения БПЛА в группе и синтез алгоритма координации автономных БПЛА в группе.

Анализ математических моделей движения БПЛА в группе

Группа БПЛА, движущихся строем, рассматривается как связанная система тел со значительным числом степеней свободы [6, 7]. Причем количество степеней возрастает в скоординированной системе управления для всего набора самолетов. В связи с этим широко используется модель относительного движения группы БПЛА, согласно которой в группе выделяют несущее тело (носитель) и носимые тела. Головной или главный БПЛА действует как носитель, а ведомые летательные аппараты играют роль носимых тел. Любой тип формации — колонна, фронт, ромб, пеленг, клин или смешанная формация — может рассматриваться как совокупность пар: ведущий-ведомый. Следует отметить, что при формировании таких пар используют два принципа. В одном случае привязка ведомого БПЛА осуществляется к идущему впереди. Во вто-

ром все подчиненные БПЛА определяют характер своего движения относительно ведущего беспилотника. Рассмотрим модель, отвечающую за принципы построения ведущего беспилотника.

При использовании такой модели параметры движения формации задаются направлением движения, скоростью и ускорением ведущего беспилотника. Следовательно, в качестве системы координат, в которой должно описываться относительное движение каждого БПЛА группы, необходимо выбрать систему координат траектории ведущего БПЛА.

Следуя [7], опишем вначале абсолютное движение каждого объекта в составе группы из N БПЛА в скоростной системе координат с учетом кинематических уравнений связи в земной системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{dV_i}{dt} &= g(n_{xai} - \sin \theta_i); \\ \frac{d\theta_i}{dt} &= \frac{g}{V_i}(n_{yai} \cos \gamma_{ai} - \cos \theta_i); \\ \frac{d\psi_i}{dt} &= \frac{g}{V_i \cos \theta_i} n_{yai} \sin \gamma_{ai}; \\ \frac{dx_{gi}}{dt} &= V_i \cos \theta_i \cos \psi_i; \\ \frac{dy_{gi}}{dt} &= V_i \sin \theta_i; \\ \frac{dz_{gi}}{dt} &= -V_i \cos \theta_i \sin \psi_i; \\ i &= 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_i — путевые скорости;

θ_i, ψ_i — углы наклона траектории и курса;

γ_{ai} — скоростные углы крена;

n_{xai}, n_{yai} — перегрузки в скоростной системе координат;

x_{gi}, y_{gi}, z_{gi} — координаты движения БПЛА в земной системе координат.

В системе (1) индекс $i = 1$ соответствует ведущему БПЛА, а индексы $i \geq 2$ — ведомым БПЛА. Линеаризация уравнений (1) позволяет получить совокупность линейных уравнений состояния:

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_i &= a_{11}^{(i)} \delta V_i + a_{12}^{(i)} \delta \theta_i + a_{13}^{(i)} \delta \psi_i + a_{14}^{(i)} \delta x_{gi} + a_{15}^{(i)} \delta y_{gi} + a_{16}^{(i)} \delta z_{gi} + \\ &+ b_{11}^{(i)} \delta u_R^{(i)} + b_{12}^{(i)} \delta u_{\vartheta}^{(i)} + b_{13}^{(i)} \delta u_B^{(i)} + b_{14}^{(i)} \delta u_H^{(i)}; \\ \delta \dot{\theta}_i &= a_{21}^{(i)} \delta V_i + a_{22}^{(i)} \delta \theta_i + a_{23}^{(i)} \delta \psi_i + a_{24}^{(i)} \delta x_{gi} + a_{25}^{(i)} \delta y_{gi} + a_{26}^{(i)} \delta z_{gi} + \\ &+ b_{21}^{(i)} \delta u_R^{(i)} + b_{22}^{(i)} \delta u_{\vartheta}^{(i)} + b_{23}^{(i)} \delta u_B^{(i)} + b_{24}^{(i)} \delta u_H^{(i)}; \\ \delta \dot{\psi}_i &= a_{31}^{(i)} \delta V_i + a_{32}^{(i)} \delta \theta_i + a_{33}^{(i)} \delta \psi_i + a_{34}^{(i)} \delta x_{gi} + a_{35}^{(i)} \delta y_{gi} + a_{36}^{(i)} \delta z_{gi} + \\ &+ b_{31}^{(i)} \delta u_R^{(i)} + b_{32}^{(i)} \delta u_{\vartheta}^{(i)} + b_{33}^{(i)} \delta u_B^{(i)} + b_{34}^{(i)} \delta u_H^{(i)}; \\ \delta \dot{x}_{gi} &= a_{41}^{(i)} \delta V_i + a_{42}^{(i)} \delta \theta_i + a_{43}^{(i)} \delta \psi_i + a_{44}^{(i)} \delta x_{gi} + a_{45}^{(i)} \delta y_{gi} + a_{46}^{(i)} \delta z_{gi} + \\ &+ b_{41}^{(i)} \delta u_R^{(i)} + b_{42}^{(i)} \delta u_{\vartheta}^{(i)} + b_{43}^{(i)} \delta u_B^{(i)} + b_{44}^{(i)} \delta u_H^{(i)}; \\ \delta \dot{y}_{gi} &= a_{51}^{(i)} \delta V_i + a_{52}^{(i)} \delta \theta_i + a_{53}^{(i)} \delta \psi_i + a_{54}^{(i)} \delta x_{gi} + a_{55}^{(i)} \delta y_{gi} + a_{56}^{(i)} \delta z_{gi} + \\ &+ b_{51}^{(i)} \delta u_R^{(i)} + b_{52}^{(i)} \delta u_{\vartheta}^{(i)} + b_{53}^{(i)} \delta u_B^{(i)} + b_{54}^{(i)} \delta u_H^{(i)}; \\ \delta \dot{z}_{gi} &= a_{61}^{(i)} \delta V_i + a_{62}^{(i)} \delta \theta_i + a_{63}^{(i)} \delta \psi_i + a_{64}^{(i)} \delta x_{gi} + a_{65}^{(i)} \delta y_{gi} + a_{66}^{(i)} \delta z_{gi} + \\ &+ b_{61}^{(i)} \delta u_R^{(i)} + b_{62}^{(i)} \delta u_{\vartheta}^{(i)} + b_{63}^{(i)} \delta u_B^{(i)} + b_{64}^{(i)} \delta u_H^{(i)}; \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $\delta u_R^{(i)}, \delta u_{\vartheta}^{(i)}, \delta u_B^{(i)}, \delta u_H^{(i)}$ — управляющие воздействия, соответственно, положение рычага управления двигателем, углы отклонения элеронов, рулей высоты и направления.

Уравнения относительного движения ведомых БПЛА в траекторной системе координат ведущего БПЛА можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta x_{gi} &= x_{g1} - x_{gi}; \\ \Delta y_{gi} &= y_{g1} - y_{gi}; \\ \Delta z_{gi} &= z_{g1} - z_{gi}; \\ \Delta V_{xgi} &= \frac{dx_{g1}}{dt} - \frac{dx_{gi}}{dt}; \\ \Delta V_{ygi} &= \frac{dy_{g1}}{dt} - \frac{dy_{gi}}{dt}; \\ \Delta V_{zgi} &= \frac{dz_{g1}}{dt} - \frac{dz_{gi}}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{gi}^{(1)} &= \Delta x_{gi} \cos \theta_1 \cos \psi_1 + \Delta y_{gi} \sin \theta_1 - \Delta z_{gi} \cos \theta_1 \sin \psi_1; \\ y_{gi}^{(1)} &= -\Delta x_{gi} \sin \theta_1 \cos \psi_1 + \Delta y_{gi} \cos \theta_1 + \\ &+ \Delta z_{gi} \sin \theta_1 \sin \psi_1; \\ z_{gi}^{(1)} &= \Delta x_{gi} \sin \psi_1 + \Delta z_{gi} \cos \psi_1; \\ \Delta V_{xgi}^{(1)} &= \Delta V_{xgi} \cos \theta_1 \cos \psi_1 + \Delta V_{ygi} \sin \theta_1 - \\ &- \Delta V_{zgi} \cos \theta_1 \sin \psi_1; \\ \Delta V_{ygi}^{(1)} &= -\Delta V_{xgi} \sin \theta_1 \cos \psi_1 + \Delta V_{ygi} \cos \theta_1 - \\ &- \Delta V_{zgi} \sin \theta_1 \sin \psi_1; \\ \Delta V_{zgi}^{(1)} &= \Delta V_{xgi} \sin \psi_1 + \Delta V_{zgi} \cos \psi_1; \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_{gi}^{(1)}, y_{gi}^{(1)}, z_{gi}^{(1)}$ и $\Delta V_{xgi}^{(1)}, \Delta V_{ygi}^{(1)}, \Delta V_{zgi}^{(1)}$ — соответственно, координаты и относительные скорости ведомых БПЛА относительно ведущего в траекторной системе координат последнего.

В свою очередь, линеаризация уравнений (3) позволяет получить совокупность уравнений наблюдения, которые задают траекторию движения ведомых БПЛА относительно ведущего:

$$\begin{aligned} \delta x_{gi}^{(1)} &= c_{11}^{(i)} \delta \theta_1 + c_{12}^{(i)} \delta \psi_1 + c_{13}^{(i)} \delta x_{g1} + c_{14}^{(i)} \delta y_{g1} + c_{15}^{(i)} \delta z_{g1} - \\ &- c_{13}^{(i)} \delta x_{gi} - c_{14}^{(i)} \delta y_{gi} - c_{15}^{(i)} \delta z_{gi}; \\ \delta y_{gi}^{(1)} &= c_{21}^{(i)} \delta \theta_1 + c_{22}^{(i)} \delta \psi_1 + c_{23}^{(i)} \delta x_{g1} + c_{24}^{(i)} \delta y_{g1} + c_{25}^{(i)} \delta z_{g1} - \\ &- c_{23}^{(i)} \delta x_{gi} - c_{24}^{(i)} \delta y_{gi} - c_{25}^{(i)} \delta z_{gi}; \\ \delta z_{gi}^{(1)} &= c_{32}^{(i)} \delta \psi_1 + c_{33}^{(i)} \delta x_{g1} + c_{35}^{(i)} \delta z_{g1} - c_{33}^{(i)} \delta x_{gi} - c_{35}^{(i)} \delta z_{gi}; \end{aligned} \quad (4)$$

Объединяя уравнения (2), (4) и переходя к разностной форме записи, сформируем модель движения группы БПЛА в следующем виде:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bg(k); \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (5)$$

где $x(k)$ — прямая сумма векторов состояния в записи уравнений (2), размерности $\dim x(k) = n$;

$g(k)$ — вектор воздействий на ведомые БПЛА со стороны ведущего, размерность которого равна $\dim g(k) = m$;

$y(k)$ — вектор обобщенных выходных координат, характеризующих движение всей группы БПЛА с размерностью $\dim x(k) = l$.

Характер поведения группы БПЛА, который требуется для полета беспилотников, определяется желаемым законом изменения вектора выходных координат $y^*(t)$, который формирует соответствующую траекторию движения системы (5) по фазовому многообразию.

Синтез алгоритма координации автономных БПЛА в группе

На систему координированного управления группой БПЛА возлагаются задачи по сборке беспилотников в группу и последующему синхронному управлению каждым из них для организации движения группировки по заданной траектории, которую формирует ведущий БПЛА на основе цели, поставленной перед группой. Реализация такого управления требует формирования командного уровня управления и организации вертикальной (иерархической) координации взаимодействующих автономных подсистем управления БПЛА, связанных друг с другом. В связи с этим система координации управления группировкой БПЛА будет иметь вид двухуровневой иерархической структуры [8]. Нижний уровень образован автономными бортовыми системами управления, предназначенными для стабилизации параметров движения центра масс БПЛА по заданной траектории.

Для управления, решающего задачи каждой отдельной подсистемы по отношению к задаче верхнего уровня иерархической системы, разработано [9] условие существования: для координируемости подсистемы нижнего уровня относительно решаемой задачи в подсистеме верхнего уровня необходимо и достаточно, чтобы для каждой подсистемы нижнего уровня за заданное количество

тактов решения задачи самоуправления с управляющим воздействием, подаваемым в произвольном такте из подсистемы верхнего уровня, имелось такое локальное управляющее воздействие, чтобы обобщенные показатели функционирования относились к заданной области.

Сформулированное условие предусматривает, что автономные подсистемы управления БПЛА, обрабатывая координирующие воздействия, должны обеспечивать движение вектора обобщенных выходных координат системы по заданному многообразию. Указанное требование позволяет выделить в дискретном пространстве состояний системы (5) соответствующее множество $x^*(k)$ значений вектора переменных состояния:

$$Cx^*(k) = y^*(k). \quad (6)$$

Случай, когда $x(k) \in x^*(k)$ означает, что движение каждого БПЛА в группе обеспечивает требуемый закон движения строя летательных аппаратов. Если же $x(k) \notin x^*(k)$, то в силу (6) глобальная цель не достигается, и в группе происходят несогласованные процессы, требующие их координации. Расстояние в дискретном пространстве между фактическими $x(k)$ и желаемыми $x^*(k)$ значениями переменных состояния определяется минимальной длиной вектора [10]:

$$\rho(k) = x^*(k) - x(k). \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что для вектора рассогласования $\rho(k)$ справедлива система уравнений

$$C\rho(k) = Cx^*(k) - Cx(k),$$

или

$$C\rho(k) = y^*(k) - Cx(k). \quad (8)$$

Так как матрица C не является квадратной, то для системы (8) не может быть получено решение в классическом виде $\rho(k) = C^{-1}(y^*(k) - Cx(k))$. В то же время может быть найдено нормальное псевдорешение [11], имеющее наименьшую евклидову длину среди всех векторов

$\rho(k)$, приносящих минимум величине $C\rho(k) - (y^*(k) - Cx(k))$.

Оно определяется с помощью псевдообратной матрицы C^+ следующим образом:

$$\rho(k) = C^+(y^*(k) - Cx(k)).$$

Отметим, что псевдообратной матрицей или обобщенной матрицей Мура-Пенроуза для матрицы A размерности $n \times m$ является матрица A^+ размерности $m \times n$, для которой выполняются следующие условия:

1) A^+ и A^+A — эрмитовы матрицы, для которых справедливы равенства $(AA^+)^T = AA^+$ и $(A^+A)^T = A^+A$;

$$2) AA^+A = A; \tag{9}$$

$$3) A^+AA^+ = A^+.$$

В отношении матрицы C из уравнения (8), имеющей размерность $l \times n$, и ранг равный 1, справедливы следующие утверждения:

1) матрица CC^T обратима;

2) псевдообратная матрица C^+ определяется как

$$C^+ = C^T(CC^T)^{-1}, \tag{10}$$

где C^T — матрица, транспонированная по отношению к матрице C .

Действительно, если $\det CC^T = 0$, то уравнение $CC^T x = 0$ имеет нетривиальное решение x_0 . Применяя к равенству $CC^T x_0 = 0$ известное свойство эквивалентности матричных равенств типа $AQ^T Q = 0$ и $QA^T = 0$, при этом имея в виду $A = I$ и $Q = C^T$, получаем, что $C^T x_0 = 0$. Отсюда в силу исходного ранга матрицы C вытекает, что $x_0 = 0$. Значит $\det CC^T \neq 0$ и матрица CC^T обратима.

Второе утверждение (10) проверяется прямой проверкой условий (9), определяющих псевдообратные матрицы.

Следовательно, наименьшее по модулю решение системы (6) находится следующим образом:

$$\rho(k) = C^T(CC^T)^{-1}(y^*(k) - Cx(k)). \tag{11}$$

Координирующее управление $g(k)$ будем искать, исходя из условия минимизации ожидаемого расстояния между желаемыми и текущими состояниями подсистем нижнего уровня управления, т.е.

$$\rho(k+1) = x^*(k+1) - x(k+1) \rightarrow 0.$$

Действительно, в этом случае:

$$x(k+1) \rightarrow x^*(k+1),$$

$y(k+1) = Cx(k+1) \rightarrow Cx^*(k+1) = y^*(k+1)$, в силу чего в группе БПЛА будет осуществляться движение обобщенной выходной координаты $y(k)$ по желаемому фазовому многообразию $y^*(k)$ размерности 1.

Следовательно, задачу согласованного управления группой БПЛА можно интерпретировать как задачу обеспечения движения вектора обобщенных выходных координат группы по заданной траектории в дискретном пространстве состояний. Заданная траектория должна соответствовать заданному закону изменения желаемой траектории полета, и в каждый дискретный момент подачи управляющих воздействий может корректироваться в зависимости от текущей ситуации.

Полагая, что координирующее управление использует переменные состояния автономных подсистем управления БПЛА, определим ожидаемую величину вектора $\rho(k)$. С учетом уравнения (11) имеем:

$$\rho(k+1) = C^T(CC^T)^{-1}(y^*(k+1) - Cx(k+1)). \tag{12}$$

Подставив в соответствии с (5) выражение для $x(k+1)$, получим:

$$\rho(k+1) = C^T(CC^T)^{-1}(y^*(k+1) - CAx(k) - CBg(k)). \tag{13}$$

Управление, формируемое координатором, определим из условия попадания на желаемую траекторию $y^*(k+1)$ согласованного движения группы БПЛА за один такт координирующего управления. Это требование соответствует

предельному случаю условия существования координирующего управления для подсистем нижнего уровня относительно задачи, решаемой в подсистеме верхнего уровня. Следовательно, ожидаемое рас-согласование между заданными и текущими состояниями автономных подси-стем управления БПЛА $\rho(k + 1)$ должно равняться нулю, т.е.

$$\rho(k+1) = 0. \quad (14)$$

Из последнего выражения, с учетом (13), следует, что координирующее управление $g(k)$ должно удовлетворять следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} C^T(CC^T)^{-1}CBg(k) = \\ = C^T(CC^T)^{-1}(y^*(k+1) - CAx(k)). \end{aligned} \quad (15)$$

Используя обозначения

$$\begin{aligned} H = C^T(CC^T)^{-1}(y^*(k+1) - CAx(k)), \\ P = C^T(CC^T)^{-1}CB, \end{aligned} \quad (16)$$

запишем систему (15) в виде

$$Pg(k) = H. \quad (17)$$

Отметим, что для неквадратной матрицы P система (17) будет разреши-мой при выполнении условия:

$$(I - PP^+)H = 0, \quad (18)$$

где P^+ — матрица, псевдообратная для P .

В этом случае система уравнений (17) имеет следующее решение:

$$g(k) = P^+H. \quad (19)$$

В самом деле, умножая обе части уравнения (17) слева на $(I - PP^+)$, полу-чаем:

$$(I - PP^+)Pg(k) = (I - PP^+)H.$$

Так как в силу свойства $PP^+P = P$ для псевдообратных матриц имеем:

$$(P - PP^+P) = P - P = 0,$$

то $(I - PP^+)H = 0$.

Отсюда вытекает, что $PP^+H = H$, и, следовательно, выражение (19) является решением уравнения (17).

Покажем теперь, что условие (18) выполняется для системы уравнений (15). С этой целью найдем вначале псев-дообратную матрицу для P . При этом

воспользуемся скелетным разложением матрицы P в виде:

$$P = VW, \quad (20)$$

где $V = C^T(CC^T)^{-1}$, $W = CB$ — матрицы размерности соответственно $l \times n$, $n \times m$.

Непосредственной подстановкой в условия, определяющие псевдообратные матрицы, можно показать, что матрица

$$P^+ = W^+V^+ \quad (21)$$

является псевдообратной к матрице P . Здесь матрица W^+ , по аналогии с (10), находится как

$$W^+ = W^T(WW^T)^{-1}. \quad (22)$$

Аналогично для матрицы V , имеющей размерность $l \times n$ и $rank\{V\} = l$, получаем

$$V^+ = (V^TV)^{-1}V^T. \quad (23)$$

Подставим в выражения (22) и (23) формулы для V и W , следующие из (20):

$$\begin{aligned} V^+ &= [(C^T(CC^T)^{-1})^TC^T(CC^T)^{-1}]^{-1}(C^T(CC^T)^{-1})^T = \\ &= [((CC^T)^{-1})^TCC^T(CC^T)^{-1}]^{-1}((CC^T)^{-1})^TC = \\ &= [((CC^T)^{-1})^T]^{-1}((CC^T)^{-1})^TC = C \end{aligned}$$

и $W^+ = (CB)^T(CB(CB)^T)^{-1}$.

Следовательно,

$$P^+ = W^+V^+ = (CB)^T(CB(CB)^T)^{-1}C. \quad (24)$$

Используя выражение для P^+ и фор-мулу (16) для H , получаем

$$\begin{aligned} (I - PP^+)H &= \\ &= (I - C^T(CC^T)^{-1}CB(CB)^T(CB(CB)^T)^{-1}C)C^T(CC^T)^{-1} \times \\ &\quad \times (y^*(k+1) - CAx(k)) = \\ &= (I - C^T(CC^T)^{-1}C)C^T(CC^T)^{-1}(y^*(k+1) - CAx(k)) = \\ &= (C^T(CC^T)^{-1} - C^T(CC^T)^{-1}CC^T(CC^T)^{-1}) \times \\ &\quad \times (y^*(k+1) - CAx(k)) = \\ &= (C^T(CC^T)^{-1} - C^T(CC^T)^{-1})(y^*(k+1) - CAx(k)) = 0. \end{aligned}$$

Следовательно, система (15) имеет решение, вид которого с учетом уравне-ний (19), (16), (24) задается выражением

$$g(k) = -(CB)^T(CB(CB)^T)^{-1}CC^T(CC^T)^{-1} \times \times (CAx(k) - y^*(k+1)),$$

или, поскольку $CC^T(CC^T)^{-1} = I$,

$$g(k) = -(CB)^T(CB(CB)^T)^{-1}(CAx(k) - y^*(k+1)). \quad (25)$$

В системе (5), замкнутой координиру-ющим управлением (25), достигается

полное согласование динамических процессов отдельных подсистем. Это находит свое выражение в обеспечении движения обобщенных выходных координат $y(k)$ системы, определяющих фактический уровень согласования состояний подсистем, по желаемой траектории $y^*(k)$. Действительно, подставляя уравнение (25) в систему (5), имеем

$$x(k+1) = Ax(k) - B(CB)^T (CB(CB)^T)^{-1} CAx(k) + B(CB)^T (CB(CB)^T)^{-1} y^*(k+1).$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} y(k+1) &= Cx(k+1) = \\ &= CAx(k) - CB(CB)^T (CB(CB)^T)^{-1} CAx(k) + \\ &+ CB(CB)^T (CB(CB)^T)^{-1} y^*(k+1) = y^*(k+1). \end{aligned}$$

Таким образом, с помощью предложенного метода синтезируется координирующее управление, обеспечивающее согласованное управление БПЛА в группе с целью достижения заданной траектории движения. Подход к синтезу прямого цифрового управления, лежа-

щий в основе алгоритма функционирования координатора, использует специфику дискретного пространства состояний и предполагает минимизацию ожидаемого расстояния между текущим набором состояний и областью дискретного пространства, заданной особым способом [12, 13].

Выводы

В представленной работе рассмотрена задача повышения эффективности использования БПЛА за счет управления движением в плотных групповых порядках.

Для достижения цели использован алгоритм управления группой БПЛА самолетного типа, который отличается тем, что он обеспечивает координацию внутрисистемных взаимодействий между участниками группы за счет перевода вектора переменных состояния в заданную область дискретного пространства за один такт управления.

Список источников

1. Моисеев В.С. Групповое применение беспилотных летательных аппаратов. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2017. 572 с. ISBN 978-5-906935-01-4.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с. ISBN 978-5-9221-1141-6.
3. Белоглазов Д.А. и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2015. 305 с. ISBN: 978-5-9221-1674-9. EDN: XYICFV.
4. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Оркин С.Д. Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля. М.: Изд-во МАИ, 2015. 271 с.
5. Зенкевич С.Л., Галустьян Н.К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 774–782. doi: 10.17587/mau.17.774-782. EDN: XAGUGT.
6. Терентьев В. М. Задача управления полетом ДПЛА в групповых порядках и способы и

средства ее решения // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 1. С. 10–25.

7. Верба В.С., Меркулов В.И., Миляков Д.А. Проблемы управления большими плотными группами беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16, № 6. С. 3–13. EDN: XSVNYT.

8. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Труды СПИИРАН. 2018. Т. 5(60). С. 39–63. EDN: VJNTNO.

9. Веселов Г.Е., Складаров А.А., Никадо Г.М. Нелинейное управление группой роботов всенаправленного движения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. Т.5, № 199. С. 152–162.

10. Ефремов А.Ю., Легович Ю.С. Стайное управление малыми беспилотными летательными аппаратами в среде с препятствиями // Проблемы управления. 2019. № 3. С. 72–80. doi: 10.25728/ru.2019.3.8. EDN: XCVEWG.

11. Shirani B., Najafi M., Izadi I. Cooperative Load Transportation Using Multiple UAVs // Aersp. Sci. Technol. 2019. Vol. 84. P. 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.10.027>.

12. Ahn H.-S. Preliminary Background // Formation Control. Studies in Systems, Decision and Control. Cham: Springer, 2020. P. 3–26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15187-4_1.

13. Muslimov T., Munasyrov R. Three-Dimensional Consensus-Based Control of Autonomous UAV Swarm Formations // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. Vol. 187. P. 69–80. doi: 10.1007/978-981-15-5580-0_5.

References

1. Moiseev V.S. *Grupповое primeneniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Group Use of Unmanned Aerial Vehicles]. Kazan': Redaktsionno-izdatel'skiy tsentr «Shkola», 2017. 572p. ISBN 978-5-906935-01-4. [in Russian].

2. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov* [Models and Algorithms for Collective Control in Groups of Robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p. ISBN 978-5-9221-1141-6. [in Russian].

3. Beloglazov D.A. e.a. *Grupповое upravleniye podvizhnymi ob'ektami v neopredelennykh sredakh* [Group Control of Moving Objects in Uncertain Environments]. Ed. by V. Kh. Pshikhopov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015. 305 p. ISBN: 978-5-9221-1674-9. EDN: XYICFV. [in Russian]. [in Russian].

4. Evdokimenkov V.N., Krasil'shchikov M.N., Orkin S.D. *Upravleniye smeshannymi gruppami pilotiruemykh i bespilotnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh edinogo informatsionno-upravlyayushchego polya* [Control Mixed Groups of manned and Unmanned Aerial Vehicles in Conditions of a Single Information and Control Field]. Moscow, Izd-vo MAI, 2015. 271p. [in Russian].

5. Zenkevich S.L., Galustyan N.K. Detsentralizovannoe upravleniye gruppoy kvadropteroz [Decentralized Control of a Quadcopter Swarm]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye – Mechatronics, Automation, Control*, 2016, No. 11, pp. 774–782. doi: 10.17587/mau.17.774-782. EDN: XAGUGT. [in Russian].

6. Terent'ev V. M. The Task of the Flight Control RPV Group Orders and Ways and Means for Its

Solution. *Aviakosmicheskoye priborostroeniye*, 2009, No. 1, pp. 10–25. 2009.

7. Verba V.S., Merkulov V.I., Milyakov D.A. Problemy upravleniya bol'shimi plotnymi gruppami bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Problems of Controlling Large Dense Groups of Unmanned Aerial Vehicles]. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy – Information-Measuring and Control Systems*, 2018, Vol. 16, No. 6, pp. 3–13. EDN: XSVNYT. [in Russian].

8. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Gruppovoye upravleniye dvizheniy mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniyem neustoiichivyykh rezhimov [Group Control of the Movement of Mobile Robots in an Uncertain Environment Using Unstable Modes]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2018, Vol. 5 (60), pp. 39–63. EDN: VJNTNO. [in Russian].

9. Veselov G.E., Sklyarov A.A., Nikado G.M. Nelineynoye upravleniye gruppoy robotov vsenapravlennoy dvizheniya [Nonlinear Control of a Group of Robots of Omnidirectional Motion]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki – Izvestia SFU. Technical Science*, 2018, Vol.5, No. 199, pp. 152–162. [in Russian].

10. Efremov A.Yu., Legovich Yu.S. Stainoye upravleniye malymi bespilotnymi letatel'nyimi apparatami v srede s prepyatstviyami [Flocking Control of Small Unmanned Aerial Vehicles in Obstacle Field]. *Problemy upravleniya – Problemy Upravleniya*, 2019, No. 3, pp. 72–80. doi: 10.25728/pu.2019.3.8. EDN: XCVEWG. [in Russian].

11. Shirani B., Najafi M., Izadi I. Cooperative Load Transportation Using Multiple UAVs. *Aerosp. Sci. Technol.*, 2019, Vol. 84, pp. 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.10.027>.

12. Ahn H.-S. Preliminary Background. *Formation Control. Studies in Systems, Decision and Control*. Cham, Springer, 2020, pp. 3–26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15187-4_1.

13. Muslimov T., Munasyrov R. Three-Dimensional Consensus-Based Control of Autonomous UAV Swarm Formations. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings»*. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2021, Vol. 187, pp. 69–80. doi: 10.1007/978-981-15-5580-0_5.

Статья поступила в редакцию 20.09.2023; одобрена после рецензирования 27.09.2023; принята к публикации 30.09.2023.

The article was submitted 20.09.2023; approved after reviewing 27.09.2023; accepted for publication 30.09.2023.

Научная статья

УДК 621.316.11

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-189-205

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ



Владислав Андреевич Рохлов

Vladislav A. Rokhlov

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



Рустам Нуриманович Хамитов

Rustam N. Khamitov

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



Игорь Леонидович Захаров

Igor L. Zakharov

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теоретической и общей электротехники,
Омский государственный технический университет,
Омск, Россия



Сергей Николаевич Жеребцов

Sergey N. Zherebtsov

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



Лидия Сергеевна Ганичева

Lidiya S. Ganicheva

студент 4-го курса, ПИ-191,
Омский государственный технический университет,
Омск, Россия

Актуальность

В условиях растущего спроса на электроэнергию и дорожающих энергоресурсов повышаются требования к эффективности деятельности электросетевых организаций в части снижения уровня потерь электроэнергии в электрических сетях. Решение данной задачи возможно путем оптимизации режимов работы систем электроснабжения.

Ключевые слова

распределительные электрические сети, потери электроэнергии, оптимальное управление, реклоузер, автоматизация

Современные средства автоматизации, применяемые в электросетевом комплексе, позволяют производить расчет, анализ и управление режимами работы электрических сетей в режиме реального времени, опираясь на фактические значения параметров режима, что повышает эффективность управления и адаптивность сети к меняющимся внешним факторам. В работе проведен анализ текущего уровня автоматизации электрических сетей и предложен и обоснован вариант системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети.

Цель исследования

Определить источники информации, необходимой для корректной работы системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети.

Методы исследования

Исследование проводится методом математического имитационного моделирования в ПК MATLAB/SIMULINK.

Результаты

В результате исследования выяснено, что современный уровень автоматизации сетей электроснабжения позволяет реализовать систему оптимального управления конфигурацией распределительной сети без установки дополнительного силового, измерительного и сетевого оборудования. В качестве источников измерительной информации предлагается использовать системы телемеханики ПС 110/10 кВ, системы мониторинга и диагностики силовых трансформаторов 110/10 кВ и автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии.

Практическая значимость полученных результатов проявляется в повышении эффективности процесса передачи электроэнергии по распределительным электрическим сетям среднего напряжения посредством оптимизации режимов их работы в режиме реального времени.

Для цитирования: Рохлов В. А., Хамитов Р. Н., Захаров И. Л., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С. Информационное обеспечение системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 189-205. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-189-205>.

Original article

INFORMATION SUPPORT OF OPTIMAL DISTRIBUTION NETWORK CONFIGURATION MANAGEMENT SYSTEM

Relevance

In the context of growing demand for electricity and expensive energy resources, the requirements for the efficiency of power grid organizations in terms of reducing the level of electricity losses in electric networks are increasing. The solution of this problem is possible by optimizing the operating modes of power supply systems. Modern automation tools used in the power grid complex make it possible to calculate, analyze and control the operating modes of electric networks in real time, relying on the actual values of mode parameters, which increases the control efficiency and adaptability of the network to changing external factors. Analysis of the current level of automation of electric networks was carried out in the work and a variant of the system for optimal control of the configuration of the distribution network was proposed and substantiated.

Aim of research

Determination of the sources of information necessary for correct operation of the system of optimal configuration management of the distribution network.

Keywords

distribution networks, power losses, optimal control, recloser, automation

Research methods

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

Results

As a result of the study, it has been found that the modern level of automation of power supply networks makes it possible to implement an optimal control system for the configuration of the distribution network without installing additional power, measuring and network equipment. It is proposed to use 110/10 kV remote control systems, monitoring and diagnostics systems for 110/10 kV power transformers and automated commercial electricity metering systems as sources of measuring information.

The practical significance of the obtained results is manifested in increasing the efficiency of the power transmission process through medium voltage distribution networks by optimizing the modes of their operation in real time.

For citation: Rokhlov V. A., Khamitov R. N., Zakharov I. L., Zhrebtsov S. N., Ganicheva L. S. Informatsionnoe obespechenie sistemy optimal'nogo upravleniya konfiguratsiei raspredelitel'noi seti [Information Support of Optimal Distribution Network Configuration Management System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 189-205 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-189-205>.

Введение

Согласно «Энергетической стратегии Российской Федерации на период с 2020 года до 2035 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 г. № 1523-р [1], к приоритетным направлениям научно-технического прогресса относится создание инновационных интеллектуальных системообразующих и распределительных электрических сетей нового поколения в Единой энергетической системе России (интеллектуальные сети — Smart Grids), а также развитие силовой электроники и устройств на их основе, прежде всего различного рода сетевых управляемых устройств (гибкие системы передачи переменного тока — FACTS). [2, 3].

Термин «Smart Grids» впервые введен в работе автора Michael T. Burt [2], где перечислены основные функциональные и технологические особенности интеллектуальных систем электроснабжения, среди которых следует отметить интеграцию коммуникационных сетей в энергосистемы, а также разработку и

внедрение цифровых средств управления. Так, например, существуют версии Европейской технологической платформы [3], Министерства энергетики США [4], Американской национальной лаборатории энергетических технологий NETL [5] и т.д. Наиболее полно суть данного термина отражает сформулированное Американским Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) определение «Smart Grid» как «полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системы, имеющей сетевую топологию и включающей в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью информационно-управляющих устройств и систем в режиме реального времени» [6].

На сегодняшний день понятие «Smart Grids» развилось до полноценной концепции инновационного преобразования электроэнергетики и идеологической основы национальных программ разви-

тия энергосистем РФ [7–9]. К числу основных функциональных свойств энергосистем на базе концепции Smart Grid относится оптимизация управления активами за счет перехода к удаленному мониторингу производственных активов в режиме реального времени для оптимизации режимов работы и совершенствования процессов эксплуатации, ремонтов и замены оборудования по его состоянию и, как следствие, обеспечение снижения общесистемных затрат [8, 9].

Постановка задачи

Одним из путей оптимизации режимов работы энергосистем, реализуемых современными средствами автоматизации, является снижение потерь электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям. В работе [10] показано, что самой «проблемной», с точки зрения потерь электроэнергии, частью электрических сетей являются распределительные сети напряжением (6)10 кВ.

Снижение технических потерь электроэнергии в сетях 6–35 кВ возможно путем оптимального выбора мест нормальных разрывов на линиях с несколькими источниками питания [11]. В работе [12] описана методика выбора оптимальных мест нормальных разрывов на воздушных линиях класса напряжения 10 кВ с двумя источниками питания по критерию минимума потерь мощности с учетом схемных и режимных ограничений. Применение описанной методики на реальных объектах возможно благодаря широкому применению реклоузеров в качестве пунктов секционирования.

Реклоузер (автоматический пункт секционирования) состоит из двух основных частей: коммутационный модуль, выполненный на базе вакуумного выключателя, и шкаф управления. Шкаф управления состоит из устройства связи (радиомодема) для дистанционного

управления, аккумуляторной батареи, модуля управления и устройства передачи данных. Модуль управления предназначен для управления коммутационным модулем, измерения токов и напряжений, реализации функций релейной защиты и автоматики и передачи данных [13]. Таким образом, набор функций реклоузеров позволяет реализовать с их помощью централизованное управление конфигурацией сети в режиме реального времени с целью снижения уровня потерь электроэнергии.

Решение проблемы

Для корректной работы предлагаемой системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети необходим следующий набор данных:

1. Мощность, год ввода, вид системы охлаждения, индекс технического состояния силовых трансформаторов питающих подстанций;
2. Марка и сечение проводов и кабелей линий электропередачи (ЛЭП);
3. Номинальные токи измерительных трансформаторов тока в линейных ячейках питающих подстанций;
4. Загрузка силовых трансформаторов питающих подстанций;
5. Нагрузки головных участков рассматриваемых ЛЭП;
6. Напряжения на шинах питающих подстанций;
7. Нагрузки в узлах рассматриваемых ЛЭП;
8. Температура окружающего воздуха.

Параметры проводов и кабелей ЛЭП, силовых трансформаторов и трансформаторов тока в линейных ячейках вносятся в систему на стадии наладки вручную и корректируются в ходе эксплуатации при наличии изменений в сети. Для оценки возможности получения параметров режима работы в режиме реального времени и с целью дальнейшей техниче-

ской реализации в данной работе проведен анализ набора функций и аппаратного состава современных измерительных систем и систем мониторинга, применяемых в электрических сетях. Согласно технической политике крупнейшей на территории Российской Федерации электросетевой организации ПАО «Россети» [14], непрерывный контроль технического состояния электрооборудования выполняется с применением автоматизированных средств, систем мониторинга и диагностики (СМиД).

Назначение СМиД состоит:

1. В предоставлении персоналу, эксплуатирующему энергоустановки, достоверной, своевременной оперативной информации о протекании технологических процессов, состоянии электротехнического оборудования и технических средств;

2. В обеспечении эксплуатационного персонала ретроспективной технологической информацией (регистрация событий, регистрация изменения параметров технологического процесса, регистрация действий оператора) для анализа, оптимизации и планирования работы оборудования и его ремонта;

3. В выявлении начальной стадии развития дефекта и/или предаварийных и аварийных режимов в контролируемом оборудовании;

4. В снижении расходов на проведение ремонтных работ.

Современные СМиД выстраиваются по трехуровневой иерархической архитектуре с децентрализацией функции принятия решений по управлению комплексом взаимосвязанных процессов [15].

Первый уровень выполняет функции по измерению параметров, состояний приводов РПН и включает в себя датчики, выполняющие непосредственное измерение диагностических и информационных параметров, а также выходные

каналы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП), выдающие сигналы, являющиеся первичными данными для устройств второго уровня СМиД.

Второй уровень — уровень контроля и управления технологическим процессом. В этот уровень входит система цифрового распределенного управления на базе промышленных контроллеров и прочих интеллектуальных средств, реализующая функции контроля и визуализации технологических параметров, состояния оборудования, диагностики, аварийной сигнализации, логического управления отдельными технологическими параметрами и процессами.

На третьем уровне происходит отображение и сопровождение технологического процесса при помощи систем диспетчерского управления и сбора данных (от англ. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)).

Структурная схема СМиД силовых трансформаторов показана на рисунке 1.

Применение СМиД силовых трансформаторов существенно повышает наблюдаемость отказов отдельно взятых узлов. Ввиду наличия ненулевой ошибки η , характерной для любых систем диагностики и мониторинга, возникает задача оценки допустимых пределов такой ошибки η , если для контролируемого оборудования заданы параметры: вероятность внезапных отказов Q ; наработка на отказ TQ ; требуемая наработка не менее Tr ; требуемое значение риска пропуска отказа — не более r . Рассмотрим решение этой задачи для экспоненциального закона распределения наработки на отказ:

$$\begin{aligned} Q(t) &= 1 - \text{Exp}\left(\frac{-t}{TQ}\right); \\ r(t) &= 1 - \text{Exp}\left(\frac{-t}{Tr}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

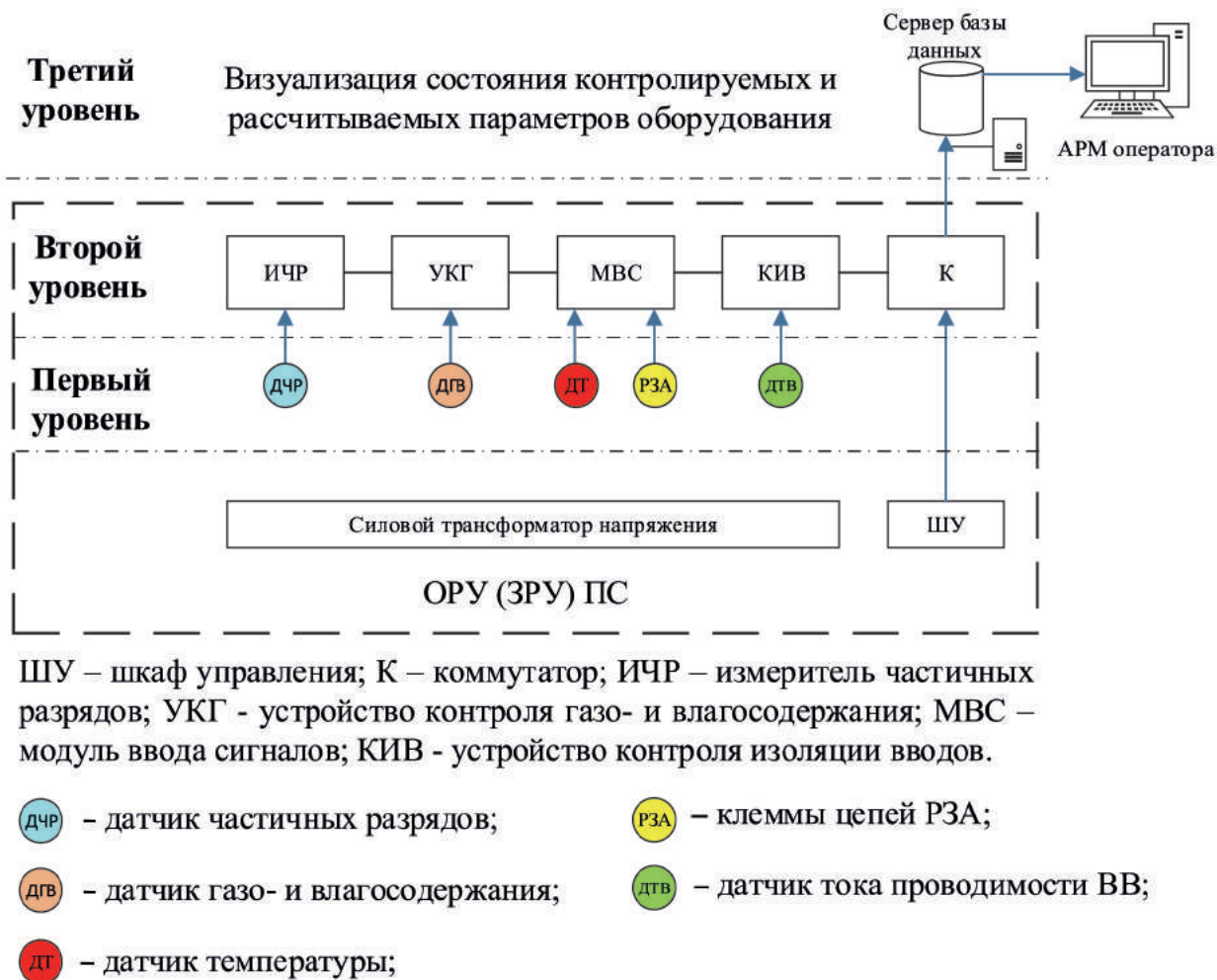


Рисунок 1. Структурная схема СМиД силового трансформатора

Figure 1. Block diagram of the MaDS of a power transformer

После математических преобразований равенств (1) получим уравнение связи между наработками на отказ при определенной Q и требуемой r вероятностях отказа и число отказов n , которое помогает предотвратить СМиД:

$$Tr = TQ \cdot \frac{[\text{Ln}(1 - Q)]}{[\text{Ln}(1 - r)]}; \quad (2)$$

$$n = \frac{Tr}{TQ}.$$

Вероятность ошибочного распознавания СМиД состояния η контролируемого оборудования определяется по формулам:

$$\eta = \frac{TQ}{(Tr + TQ)}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{[\text{Ln}(1 - r)]}{[\text{Ln}(1 - r) + \text{Ln}(1 - Q)]}. \quad (4)$$

При небольших значениях $r \ll Q \ll 1$ допустимая ошибка СМиД может быть рассчитана как отношение $\eta = r/Q$. Номограмма для определения максимальной допустимой ошибки системы мониторинга и диагностики показана на рисунке 2 [16].

Например, для значений за сутки: $Q = 15\%$; $r = 0,5\%$, ошибка η не должна превышать $4,9\%$. Номограмма для определения коэффициента увеличения наработки $kT = Tr/TQ$ между отказами оборудования после внедрения СМиД приведена на рисунке 3 [16].

Внедрение системы мониторинга и диагностирования способствует значительному повышению интервала между производственными неполадками и авариями, который возрастает в 24 раза, что

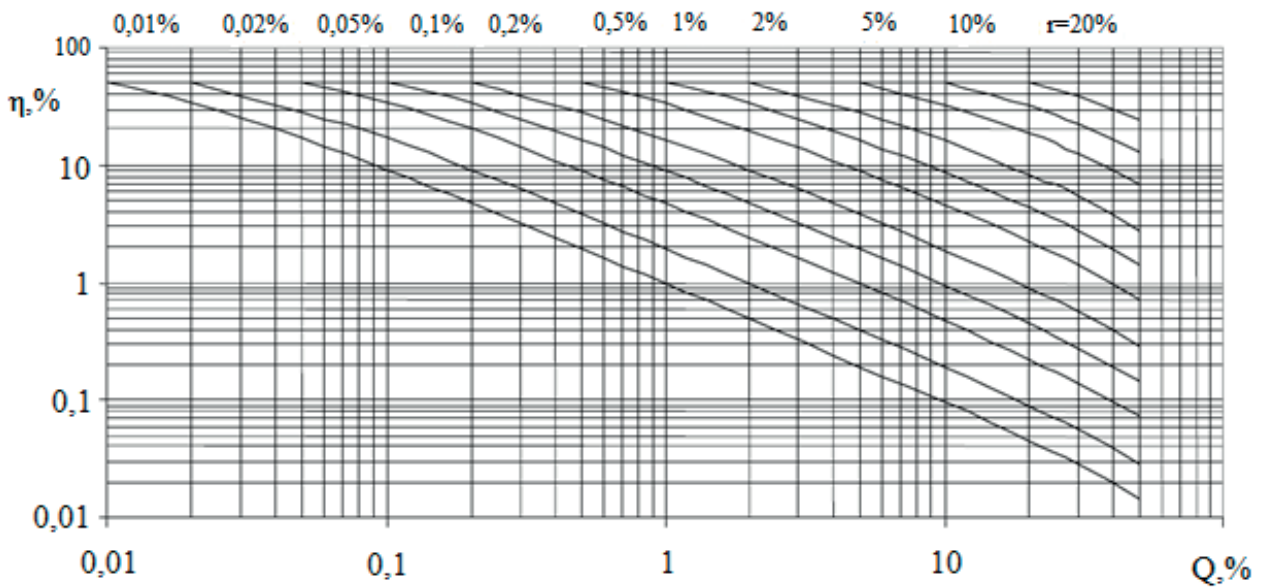


Рисунок 2. Допустимая ошибка η при требуемом риске r и вероятности отказа Q

Figure 2. Permissible error η with the required risk r and probability of failure Q

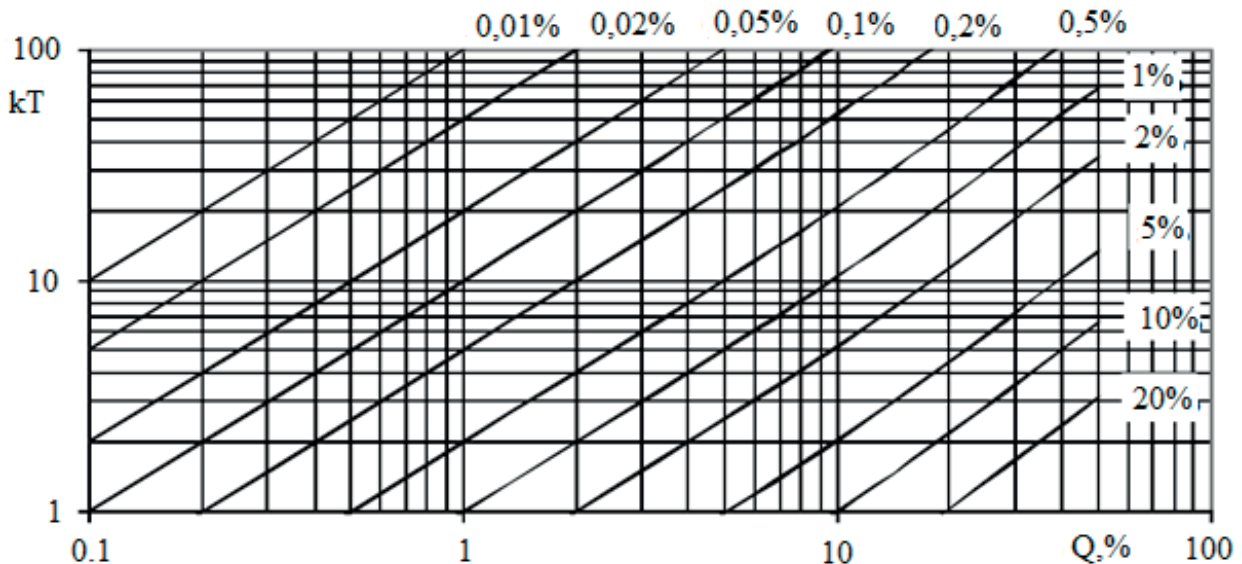


Рисунок 3. Коэффициент увеличения наработки между отказами оборудования kT при внедрении СМиД и обеспечении требуемого риска отказа r

Figure 3. Coefficient of increase in operating time between failures of equipment kT during the implementation of the SMiD and ensuring the required risk of failure r

объясняет существенный (положительный) технико-экономический эффект за счет сокращения затрат на ремонт и снижения потерь внеплановых простоев.

В настоящее время разработано и широко применяется определенное количество систем мониторинга и диагностики силовых трансформаторов, что подтверждает их востребованность и

целесообразность применения таких систем. На рынке автоматизированных систем мониторинга и диагностики представлен ряд систем отечественного производства, в том числе системы: шкаф управления и мониторинга трансформаторного оборудования (ШУМТ) — совместная разработка ВЭИ и ОАО «Энергосетьпроект» (г. Москва) [17], Transformer

Diagnostics Monitor (TDM) — разработка ПВФ «Вибро-Центр» (г. Пермь) [18] и система контроля изоляции силовых трансформаторов (СКИТ), разработанная в СПбГПУ (г. Санкт-Петербург) [19]. Сравнительные характеристики перечисленных СМиД приведены в таблице 1.

Из анализа характеристик видно, что каждая из перечисленных систем имеет функции измерения токов и напряжений по сторонам ВН и НН и возможность интеграции в систему SCADA, что позволяет использовать СМиД в качестве одного из источников данных для системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети.

Согласно [14], объекты электросетевого комплекса (ПС, ТП, РП, РТП, ЛЭП) должны быть оснащены автоматизированными системами управления, контроля, непрерывного контроля, в том числе системами телемеханики (СТМ) [20]. Для целей системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети рассмотрены применяемые системы телемеханики ПС.

Основными целями внедрения СТМ на современных трансформаторных подстанциях являются:

1. Повышение надежности и долговечности работы электросетевого оборудования и сокращение затрат на его ремонт;

2. Уменьшение нагрузки и вероятности ошибочных действий оперативного персонала во всех режимах работы;

3. Выполнение требований к объему передаваемой технологической информации на уровень диспетчерского управления;

4. Унификация используемого программного обеспечения и оборудования;

5. Расширение технических возможностей комплекса.

Архитектура применяемых СТМ ПС предусматривает наличие *трех уровней*.

В состав *первого уровня* входят модули дискретного ввода (телесигнализации), дискретного вывода (телеуправления), модули аналоговых измерений, многофункциональные измерительные преобразователи (МИП) и датчики температуры воздуха. Первый уровень реализует сбор сигналов телесигнализации и телеизмерений с привязкой этих сигналов к единому астрономическому времени и выдачу управляющих сигналов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики систем мониторинга и диагностики силовых трансформаторов

Table 1. Comparative characteristics of power transformer monitoring and diagnostics systems

Контролируемый параметр / система мониторинга	ШУМТ	TDM	СКИТ
Температура верхних слоев масла	+	+	+
Работа системы охлаждения трансформатора	+	+	+
Тангенс угла диэлектрических потерь	+	+	+
Концентрация газов в трансформаторном масле	+	+	+
Содержание влаги в изоляции	+	+	+
Состояние РПН	+	+	+
Токи и напряжения по НН и ВН	+	+	+
Давление во вводах	–	–	–
Частичные разряды в изоляции	–	–	+
Использование математических моделей	+	–	–
Использование режима off-line	–	–	–
Возможность интеграции в SCADA системы (поддержка QPC)	+	+	+

В состав *второго уровня* входят контроллеры и серверы СТМ. Данный уровень реализует функцию обмена информацией с другими уровнями иерархии управления, а также сохранения данных независимо от работоспособности средств верхнего уровня. Второй уровень обеспечивает сбор данных по цифровым каналам связи с МИП, модулей ввода/вывода сигналов, взаимодействие с устройствами смежных систем, раздачу сигналов точного времени, передачу данных оперативно-технологической информации и трансляцию команд телеуправления с уровня диспетчерского центра.

Третий уровень выполняет функции концентрации, визуализации и хранения измерительных данных. В состав верхнего уровня входят диспетчерские щиты, серверы и автоматизированные рабочие места.

Обмен информацией между устройствами первого, второго и третьего уровней в СТМ обеспечивается с использованием протоколов MODBUS, МЭК 60870-5-101/104. Структурная схема СТМ ПС показана на рисунке 4.

К основным функциям СТМ ПС относятся:

— телеизмерение — передача по каналам связи значений непрерывно измеряемых параметров контролируе-

мых процессов (мощности, напряжения, токов и т. п.);

— телесигнализация — передача дискретных сигналов о состоянии контролируемого оборудования (положение выключателей мощности, разъединителей, анцапф трансформаторов, уставок автоматики и т.п.);

— телеуправление — передача по каналам связи команд от диспетчера (оператора) к коммутационным аппаратам (выключателям, разъединителям, контакторам и т.п.) для изменения положения оперативного оборудования;

— телерегулирование — передача управляющих воздействий типа «больше — меньше», «прибавить — убавить» и других от диспетчера к регулятору.

Набор функций систем телемеханики трансформаторных подстанций позволяет использовать их в качестве источников информации о нагрузке головных участков отходящих линий.

Для централизации передачи данных с СМид и СТМ ПС на диспетчерские пункты на подстанциях устанавливается единая централизованная приемопередающая станция, обеспечивающая независимый прием информации от множества каналов связи и дальнейшую ретрансляцию ее на вышестоящий диспетчерский пункт.

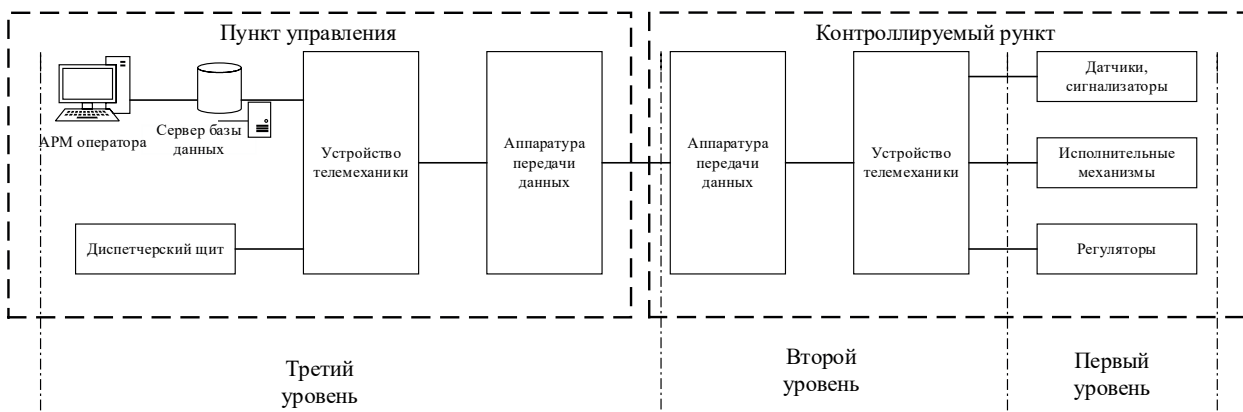


Рисунок 4. Структурная схема СТМ ПС

Figure 4. Block diagram of STM PS

Для организации связи систем автоматизации ПС и диспетчерских пунктов используются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и высокочастотные каналы по проводам ВЛ [21]. В качестве основного канала связи на современных подстанциях используются ВОЛС ввиду ряда преимуществ [22]:

- широкая эффективно передаваемая полоса частот (1–12 ГГц);
- несущественное ослабление сигнала;
- высокая надежность;
- высокая помехоустойчивость;
- информационная безопасность.

Для решения задач по упрощению процесса учета электроэнергии, а также по сокращению потерь в электрических сетях применяются автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ). Этому поспособствовало вступление в силу федеральных законов № 261-ФЗ от 23.11.2009 [23] и № 522-ФЗ от 27.12.2018 [24], а также утверждение концепции ПАО «Россети» «Цифровая трансформация 2030» [25].

СТО 34.01-3.1-002-2016 ПАО «Россети» [26] предписывает, что системы учета электроэнергии должны охватывать все точки коммерческого и технического учета активной и реактивной электроэнергии и мощности для получения полного баланса электроэнергии. Широкое распространение АСКУЭ в электросетевом комплексе подтверждается большим количеством публикаций, описывающих опыт их внедрения: в работе [27] описан опыт внедрения АСКУЭ на объекте ПО «Вологодские электрические сети» филиала ОАО «МРСК Северо-Запад» — «Вологда-энерго», применение АСКУЭ в распределительной сети 0,4 кВ филиалов ОАО «Сетевая компания» Бугульминские и Чистопольские электрические сети описано в работах [28, 29] и т.д.

АСКУЭ также строится по *трехуровневой архитектуре*.

Первый уровень представляет собой комплекс технических средств, осуществляющий сбор информации, в который входят приборы учета и измерительные трансформаторы.

Второй уровень образуют устройства концентрации, обработки и передачи информации от устройств первого уровня на третий и от третьего на первый. К устройствам второго уровня относятся модем-коммутатор, устанавливаемый в ТП, система обеспечения единого времени, оборудование GSM.

Третий уровень реализует функции обработки и хранения информации, полученной от устройств первого уровня. К третьему уровню относятся системное и прикладное программное обеспечение. Среди функций системного программного обеспечения следует отметить:

1. Организацию связи с АРМ оператора и сервером сбора данных;
2. Передачу данных в различные комплексы программно-технических средств для их дальнейшей обработки и хранения;
3. Организацию связи со счетчиками электроэнергии по интерфейсам RS-485, PLC и ZigBee;
4. Организацию связи с территориально удаленными объектами по интерфейсу RF;
5. Ретрансляцию и маршрутизацию данных в сетях PLC и ZigBee;
6. Хранение данных по энергопотреблению;
7. Автоматический сбор и хранение журналов суточных и месячных показаний счетчиков, автоматический сбор профилей мощности счетчиков электроэнергии с заданной при конфигурации дискретностью учета (для розничного рынка — 60 мин) не реже 1 раза в сутки и хранение суточных данных о шестиде-

сятиминутных приращениях электроэнергии.

Прикладное программное обеспечение может представлять собой программу-конфигуратор, реализованную в виде клиент-серверного приложения, ориентированного на обработку и представление больших массивов конфигурации и данных, получаемых с приборов учета энергоресурсов, для пользователей различных категорий с использованием Веб-интерфейса и мобильных платформ.

На практике, во избежание необходимости прокладки дополнительных линий связи обмен информацией между приборами учета и модемом-коммутатором в ТП осуществляется по технологии PLC. Связь между модемом-коммутатором и сервером сбора данных организуется по технологии GSM. Технология GSM обладает рядом преимуществ, в том числе:

- возможностью большого числа одновременных соединений;
- низким уровнем помех в используемых частотных диапазонах;
- улучшенной (по сравнению с аналоговыми системами) защитой от несанкционированного доступа, что

достигается путём применения алгоритмов шифрования с разделяемым ключом;

- высокой скоростью опроса присоединенных устройств и приборов.
- легкостью организации канала связи.

Структурная схема АСКУЭ показана на рисунке 5.

Набор функций современных АСКУЭ позволяет использовать их в качестве источников информации о нагрузках в узлах распределительной сети.

Таким образом, по результатам анализа современных систем автоматизации, применяемых в электросетевом комплексе, можно сделать вывод о том, что для функционирования системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети не требуется установка дополнительного измерительного и сетевого оборудования.

Структурная схема организации передачи данных для функционирования системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети показана на рисунке 6.

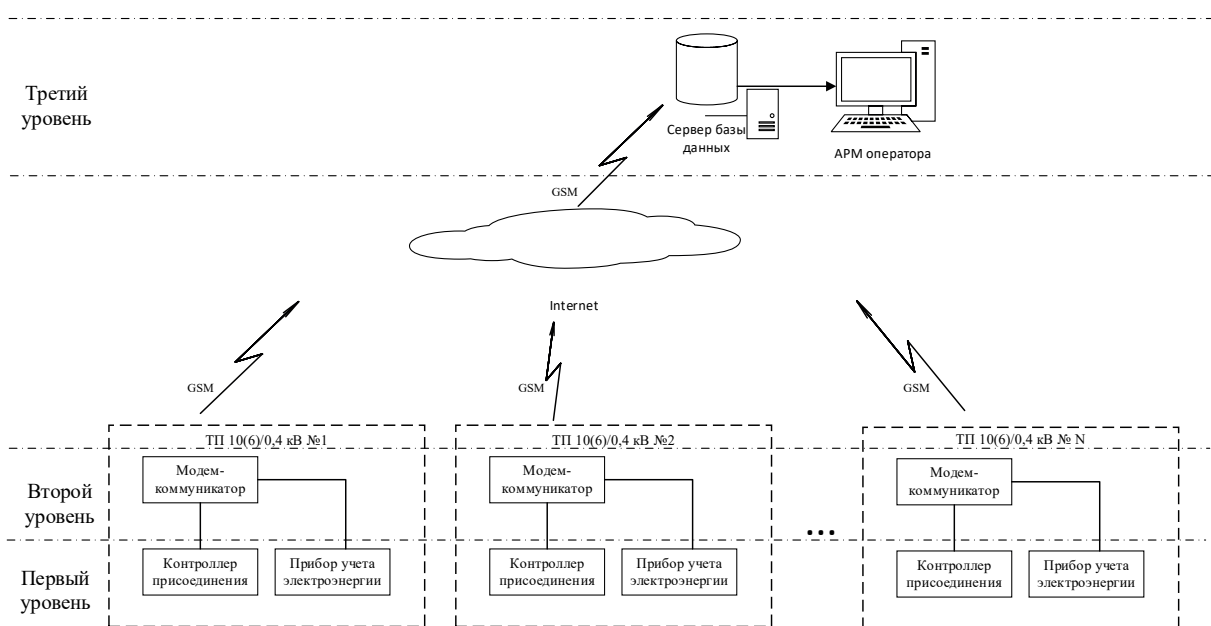


Рисунок 5. Структурная схема АСКУЭ

Figure 5. Structural diagram of the ASCAPS

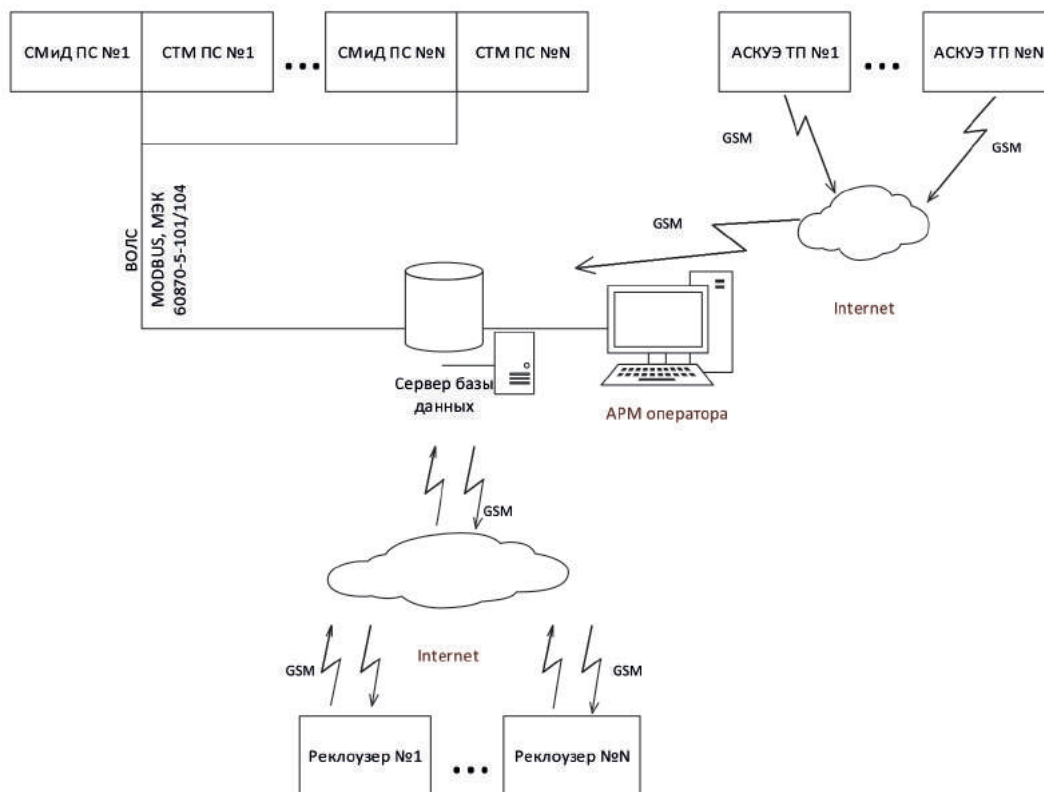


Рисунок 6. Структурная схема организации передачи данных для функционирования системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети

Figure 6. Block diagram of the data transmission organization for the functioning of the optimal control system of the distribution network configuration

Информация о загрузке силовых трансформаторов и напряжениях на шинах питающих подстанций собирается с серверов СМид и по ВОЛС поступает на сервер сбора данных. Данные о нагрузках на головные участки линий поступают с серверов СТМ также по ВОЛС. Информация о нагрузках в узлах сети передается от модемов-коммутаторов, устанавливаемых в ТП 10(6)/0,4 кВ на сервер сбора данных по технологии GSM. После обработки собранной информации и выполнения необходимых вычислений формируются управляющие воздействия, которые по сети GSM передаются на реклоузеры. На АРМ оператора происходит отображение текущей схемы сети. Матрица информационных потоков показана в таблице 2.

Для организации сбора и обработки информации, а также для выдачи управляющих воздействий необходим «общий», объединяющий третий уро-

вень, имеющий следующий ряд функций:

- сбор и обработка информации со вторых уровней СМид силовых трансформаторов на ПС 110 (35)/10 кВ, СТМ ПС 110 (35)/10 кВ и АСКУЭ по беспроводным и волоконно-оптическим каналам связи;
- решение линейных оптимизационных задач с булевыми переменными;
- формирование и отправка управляющих воздействий реклоузерам;
- отображение текущих положений нормальных разрывов в сети.

Как показано в статье [12], применение предлагаемой системы позволит добиться снижения технических потерь мощности в магистральных участках воздушных линий электропередачи на величину до 43 %.

Характеристики предлагаемой системы оптимального управления конфигурацией сети показаны в таблице 3.

Таблица 2. Матрица информационных потоков

Table 2. Matrix of information flows

GSM	GSM		ВОЛС		Тип канала связи
SCADA	Ethernet		Оптический LC		Интерфейс сопряжения
1	1 резерв	1 основной	1 резерв	1 основной	Количество каналов (основной/резервный)
			•	•	СМид ПС 110/10 кВ № 1
			•	•	СМид ПС 110/10 кВ № 2
			•	•	...
			•	•	СТМ ПС 110/10 кВ № 1
			•	•	СТМ ПС 110/10 кВ № 2
			•	•	...
			•	•	СТМ ПС 110/10 кВ № N
			•	•	Диспетчерский пункт
•	•	•			АСКУЭ ТП 10/0,4 кВ № 1
•	•	•			АСКУЭ ТП 10/0,4 кВ № 2
					...
•	•	•			АСКУЭ ТП 10/0,4 кВ № N
•	•	•			Реклоузер № 1
•	•	•			Реклоузер № 2
					...
•	•	•			Реклоузер № — №

Таблица 3. Характеристики системы оптимального управления конфигурацией сети

Table 3. Characteristics of the optimal network configuration management system

Параметр	Значение
Время срабатывания, с	1,95
Количество контролируемых элементов	Не ограничено
Протокол передачи данных	МЭК 60870-5-104
Контролируемые параметры	1. Загрузка силовых трансформаторов питающих подстанций; 2. Нагрузки головных участков рассматриваемых ЛЭП; 3. Напряжения на шинах питающих подстанций; 4. Нагрузки в узлах рассматриваемых ЛЭП; 5. Температура окружающего воздуха.
Функциональность	1. Сбор и обработка измерительной информации; 2. Решение линейных оптимизационных задач с булевыми переменными; 3. Формирование и отправка управляющих воздействий; 4. Отображение текущей схемы сети; 5. Ведение журнала переключений.

Выводы

1. Уровень автоматизации современных распределительных электрических сетей позволяет собирать и обрабатывать информацию в реальном времени в объеме, необходимом для оптимального управления конфигурацией сети.

2. Для функционирования системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети не требуется установка дополнительного измерительного и сетевого оборудования.

3. В качестве первого и второго уровней системы оптимального управления

конфигурацией распределительной сети возможность использовать соответственно первые и вторые уровни СМиД силовых трансформаторов на ПС 110 (35)/10 кВ, СТМ ПС 110 (35)/10 кВ и АСКУЭ.

4. Для функционирования системы оптимального управления конфигурацией распределительной сети потребуется организация третьего уровня, объединяющего СМиД силовых трансформаторов на ПС 110 (35)/10 кВ, СТМ ПС

110 (35)/10 кВ и АСКУЭ, а также имеющего описанный набор функций.

5. Предложена к применению методика оценки вероятности ошибочного распознавания СМиД состояний контролируемого оборудования.

6. Применение СМиД увеличивает объем контролируемой информации о состоянии высоковольтного оборудования, что позволяет своевременно производить ремонтные работы, повышая тем самым надежность электроснабжения.

Список источников

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (утв. Приказом Минэнерго РФ от 09.06.2020 №1523-р). URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 06.07.2023).

2. Burr M.T. Reliability Demands Drive Automation Investments // *Fortnightly Magazine*. URL: <https://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor> (дата обращения: 09.07.2023). <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor>.

3. European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Communities: «European Technology Platform Smart Grids, Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future», European Communities. 2006.

4. «Grids 2030»: A National Vision for Electricity's Second 100 years. Office of Electric Transmission and Distribution of USA Department of Energy. 2003.

5. The National Energy Technology Laboratory: «A Vision for the Modern Grid». March 2007.

6. Smart Power Grids — Talking about a Revolution // IEEE Emerging Technology Portal, 2009.

7. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с. ISBN: 978-5-98420-075-2.

8. Шакарян Ю.Г., Моржин Ю.И., Дорофеев В.В. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью: НИР. М., 2012. 238 с. EDN: VHCPNN.

9. Воропай Н.И. SMART GRID: мифы, реальность, перспективы // Энергетическая политика. 2010. № 2. С. 9–14. EDN: MEGNGX.

10. Рохлов В.А. Анализ статистики потерь электроэнергии в электрических сетях Российской Федерации // Энергосбережение и иннова-

ционные технологии в топливно-энергетическом комплексе: матер. национальн. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, учёных и специалистов. Тюмень, 2022. Т. 2. С. 292–296. EDN: CPCORY.

11. РД 34.09.254. Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений: утвержден и введен в действие Главным научно-техническим управлением энергетики и электрификации 31.03.1986: дата введения 1988-01-01. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294816/4294816579.htm#i38008> (дата обращения: 06.07.2023).

12. Рохлов В.А., Хмара Г.А., Бойчук Р.С. Способ снижения потерь электроэнергии в распределительных сетях с двусторонним питанием // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2021. № 4 (67). С. 98–103. EDN: GTRIXM.

13. Вакуумный реклоузер SMART15. Техническая информация. URL: https://www.tavrida.ru/upload/iblock/03d/c66fswxwe9raa83aea wg3cssscsbrepa/TER_RecDoc_PG_8.pdf.

14. Положение ПАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе, утверждено Советом директоров ПАО «Россети» (протокол № 450 от 02.04.2021). URL: <https://www.te.ru/upload/doc/invest/reports/tehpolitika2023.pdf> (дата обращения: 06.07.2023).

15. СТО 56947007- 29.200.10.011-2008. Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования: утвержден и введен в действие Приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.04.2008 № 140 с изменениями от 16.06.2010, приказ № 423: дата введения 2008-04-18. URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.200.10.011-2008.pdf> (дата обращения: 06.07.2023).

16. Науменко А.П. Теория и методы мониторинга и диагностики: материалы лекций. Омск: ОмГТУ, 2017. 154 с.

17. Валуйских А.О., Мордкович А.Г., Цфасман Г.М. Система управления, мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования // *Электро*. 2004. № 6. С. 35–37.

18. ООО «Димрус»: официальный сайт. URL: <https://dimrus.ru/tdm.html> (дата обращения: 06.07.2023).

19. Монастырский А.Е. Современные системы мониторинга технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27. № 3. С. 97–108. DOI: 10.18721/JEST.27309. EDN: HRCADF.

20. ГОСТ Р МЭК 870-1-1-93. Устройства и системы телемеханики. Часть 1. Основные положения. Раздел 1. Общие принципы: утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России № 309 от 30.12.1993: дата введения 1995-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200027388> (дата обращения: 06.07.2023).

21. СТО 70238424.17.220.20.005-2011. Системы связи для сбора и передачи информации в электроэнергетике. Условия создания. Нормы и требования: утвержден и введен в действие Приказом НП «ИНВЭЛ» № 109/4 от 01.11.2011: дата введения 2010-01-29. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293790/4293790596.pdf> (дата обращения: 06.07.2023).

22. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие для вузов. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 268 с. ISBN 978-5-8114-1028-6.

23. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ: Федеральный закон № 261-ФЗ: [принят государственной думой 23 ноября 2009 года]. М.: Центрмат, 2023. 80 с.

24. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации: Федеральный закон № 522-ФЗ: [принят государственной думой 19 декабря 2018 года]. М.: Центрмат, 2023. 95 с.

25. Концепция цифровая трансформация 2030 / ПАО «Россети». URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf.

26. СТО 34.01-3.1-002-2016. Типовые технические решения подстанций 6–110 кВ:

утвержден и введен в действие Распоряжением ПАО «Россети» № 397р от 19.09.2016: дата введения 2016-09-19. URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/sto-34-01-3-1-002-2016-tipovyye-tehnicheskie-resheniya-podstantsij-6-110-kv.html> (дата обращения: 06.07.2023).

27. Технические аспекты организации связи по линиям 0,4 и 10 кВ с использованием PLC-технологии в АИИС КУЭР «АТЛАС» / ООО «Систел» г. Москва // *Журнал «ИСУП»*. 2015. № 2 (56). С. 49–52.

28. Камалиев Р.Н., Мингалиев А.Р., Хабибуллин Т.Ф. Результаты опробования системы учета электроэнергии на базе PLC-технологии в распределительных сетях 10–0,4 кВ // *Энергетика Татарстана*. 2011. № 4. С. 67–71. EDN: OOKYYN.

29. Часовский А.В., Жернаков Ю.А. Опыт внедрения системы учета электроэнергии на основе технологии PLC в распределительных сетях 0,4 кВ филиала ОАО «Сетевая компания» Бугульминские электрические сети // *Энергетика Татарстана*. 2012. № 3. С. 46–52. EDN: PEWVRF.

References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2035 goda (utv. Prikazom Minenergo RF ot 09.06.2020 № 1523-r)*. [Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035 (Approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation Dated 09.06.2020 No. 1523-r)]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

2. Burr M.T. Reliability Demands Drive Automation Investments. *Fortnightly Magazine*. URL: <https://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor> (accessed 09.07.2023). <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor>.

3. *European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Communities: «European Technology Platform Smart Grids, Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future», European Communities, 2006.*

4. «Grids 2030»: A National Vision for Electricity's Second 100 years. Office of Electric Transmission and Distribution of USA Department of Energy, 2003.

5. *The National Energy Technology Laboratory: «A Vision for the Modern Grid»*. March 2007.

6. Smart Power Grids — Talking about a Revolution. *IEEE Emerging Technology Portal*, 2009.

7. Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart*

Grid [Innovative Development of Electric Power Industry Based on the Concept of Smart Grid]. Moscow, IATs Energiya, 2010. 208 p. ISBN 978-5-98420-075-2. [in Russian].

8. Shakaryan Yu.G., Morzhin Yu.I., Dorofeev V.V. e.a. *Kontseptsiya intellektual'noi elektroenergeticheskoi sistemy s aktivno-adaptivnoi set'yu: otchet o NIR* [The Concept of an Intelligent Electric Power System with an Active Adaptive Network: Research Report]. Moscow, 2012. 238 p. EDN: VHCPNN. [in Russian].

9. Voropai N.I. SMART GRID: mify, real'nost', perspektivy [SMART GRID: Myths, Reality, Perspectives]. *Energeticheskaya politika — Energy Policy*, 2010, No. 2, pp. 9–14. EDN: MEGNGX. [in Russian].

10. Rokhlov V.A. Analiz statistiki poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh Rossiiskoi Federatsii [Analysis of Statistics of Electricity Losses in Electric Networks of the Russian Federation]. *Materialy natsional'noi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh i spetsialistov «Energosberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse»* [Materials of the National Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Scientists and Specialists with International Participation «Energy Saving and Innovative Technologies in the Fuel and Energy Complex»]. Tyumen', 2022, Vol. 2, pp. 292–296. EDN: CPCORY. [in Russian].

11. RD 34.09.254. *Instruktsiya po snizheniyu tekhnologicheskogo raskhoda elektricheskoi energii na peredachu po elektricheskim setyam energosistem i energoob'edinenii: utverzhden i vveden v deistvie Glavnym nauchno-tekhnicheskim upravleniem energetiki i elektrifikatsii 31.03.1986: data vvedeniya 1988-01-01* [RD 34.09.254. Instructions for Reducing the Technological Consumption of Electric Energy for Transmission through Electric Networks of Power Systems and Power Connections: Approved and Put into Effect by the Main Scientific and Technical Department of Energy and Electrification 31.03.1986: Date of Introduction 1988-01-01]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294816/4294816579.htm#i38008> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

12. Rokhlov V.A., Khmara G.A., Boichuk R.S. Sposob snizheniya poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh s dvustoronnim pitaniem [A Way to Reduce Energy Losses in Double-Fed Distribution Networks]. *Elektroenergiya. Pereдача i raspredelenie — Electric Power. Transmission and Distribution*, 2021, No. 4 (67), pp. 98–103. EDN: GTRIXM. [in Russian].

13. *Vakuumnyi reklouzer SMART15. Tekhnicheskaya informatsiya* [Vacuum Recloser SMART15. Technical Information]. URL: https://www.tavrida.ru/upload/iblock/03d/c66fswxwe9raa83aeawg3cssscsbrepa/TER_RecDoc_PG_8.pdf. [in Russian].

14. *Polozhenie PAO «Rosseti» o edinoi tekhnicheskoi politike v elektrosetevom komplekse, utverzhdeno Sovetom direktorov PAO «Rosseti» (protokol № 450 ot 02.04.2021)* [The Regulation of PJSC ROSSETI on the Unified Technical Policy in the Electric Grid Complex, Approved by the Board of Directors of PJSC ROSSETI (Protocol No. 450 of 02.04.2021)]. URL: <https://www.te.ru/upload/doc/invest/reports/tehpolitika2023.pdf> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

15. STO 56947007-29.200.10.011-2008. *Sistemy monitoringa silovykh transformatorov i avtotransformatorov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya: utverzhden i vveden v deistvie Prikazom OAO «FSK EES» ot 18.04.2008 № 140 s izmeneniyami ot 16.06.2010, prikaz № 423: data vvedeniya 2008-04-18* [STO 56947007-29.200.10.011-2008. Monitoring Systems for Power Transformers and Autotransformers. General Technical Requirements: Approved and Put into Effect by Order No. 140 of JSC FGC UES Dated 04/18/2008 with Amendments Dated 06/16/2010, Order No. 423: Date of Introduction 2008-04-18]. URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.200.10.011-2008.pdf> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

16. Naumenko A.P. *Teoriya i metody monitoringa i diagnostiki: mterialy lektsii* [Theory and Methods of Monitoring and Diagnostics: Materials Lectures]. Omsk, OmGTU, 2017. 154 p. [in Russian].

17. Valuiskikh A.O., Mordkovich A.G., Tsfasman G.M. Sistema upravleniya, monitoringa i diagnostiki transformatornogo oborudovaniya [Control System, Monitoring and Diagnostics of Transformer Equipment]. *Elektro — Electro*, 2004, No. 6, pp. 35–37. [in Russian].

18. *OOO «Dimrus»: ofitsial'nyi sait* [Dimrus LLC: Official Website]. URL: <https://dimrus.ru/tdm.html> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

19. Monastyrskii A.E. Sovremennye sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh maslonapolnennykh transformatorov [Modern Systems for Monitoring the Technical Condition of Power Oil-Filled Transformers]. *Materialovedenie. Energetika — Materials Science. Power Engineering*, 2021, Vol. 27, No. 3, pp. 97–108. doi: 10.18721/JEST.27309. EDN: HRCADF. [in Russian].

20. *GOST R MEK 870-1-1-93. Ustroistva i sistemy telemekhaniki. Chast' 1. Osnovnye polozheniya. Razdel 1. Obshchie printsipy: utverzhden i vveden v deistvie Postanovleniem Gosstandarta Rossii № 309*

от 30.12.1993: data vvedeniya 1995-01-01 [State Standard R IEC 870-1-1-93. Telemechanics Devices and Systems. Part 1. The Main Provisions. Section 1. General Principles: Approved and Put into Effect by Resolution of the State Standard of Russia No. 309 of 12/30/1993: Date of Introduction 1995-01-01]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200027388> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

21. STO 70238424.17.220.20.005-2011. *Sistemy svyazi dlya sbora i peredachi informatsii v elektroenergetike. Usloviya sozdaniya. Normy i trebovaniya: utverzhden i vveden v deistvie Prikazom NP «INVEL» № 109/4 ot 01.11.2011: data vvedeniya 2010-01-29* [STO 70238424.17.220.20.005-2011. Communication Systems for Collecting and Transmitting Information in the Electric Power Industry. Conditions of Creation. Norms and Requirements: Approved and Put into Effect by the Order of NP «INVEL» No. 109/4 dated 01.11.2011: Date of Introduction 2010-01-29]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293790/4293790596.pdf> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

22. Sklyarov O.K. *Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fiber-Optic Networks and Communication Systems: a Textbook for Universities]. 5-e izd., ster. Sankt-Peterburg, Lan' Publ., 2021. 268 p. ISBN 978-5-8114-1028-6. [in Russian].

23. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmenenii v otchel'nye zakonodatel'nye akty RF: Federal'nyi zakon № 261-FZ, prinyat gosudarstvennoi dumoi 23 noyabrya 2009 goda [On Energy Saving and Energy Efficiency Improvement and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation: Federal Law No. 261-FZ, Adopted by the State Duma on November 23, 2009]. Moscow, Tsentrmag Publ., 2023. 80 p. [in Russian].

24. *O vnesenii izmenenii v otchel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii v svyazi s razvitiem sistem ucheta elektricheskoi energii (moshchnosti) v Rossiiskoi Federatsii: Federal'nyi zakon № 522-FZ, prinyat gosudarstvennoi dumoi 19 dekabrya 2018 goda* [On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation in Connection with the Development of Electric Energy (Capacity) Metering Systems in the Russian Federation: Federal Law No. 522-FZ, adopted by the State Duma on December 19, 2018]. Moscow, Tsentrmag, 2023. 95 p. [in Russian].

25. *Kontseptsiya tsifrovaya transformatsiya 2030. PAO «Rosseti»* [The Concept of Digital Transformation 2030. PJSC Rosseti]. URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjxs5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf. [in Russian].

26. STO 34.01-3.1-002-2016. *Tipovye tekhnicheskie resheniya podstantsii 6–110 kV: utverzhden i vveden v deistvie Rasporyazheniem PAO «Rosseti» № 397r ot 19.09.2016: data vvedeniya 2016-09-19* [STO 34.01-3.1-002-2016. Typical Technical Solutions of Substations 6-110 kV: Approved and Put into Effect by the Order of PJSC ROSSETI No. 397r Dated 09/19/2016: Date of Introduction 2016-09-19]. URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/sto-34-01-3-1-002-2016-tipovye-tehnicheskie-resheniya-podstantsij-6-110-kv.html> (accessed 06.07.2023). [in Russian].

27. *Tekhnicheskie aspekty organizatsii svyazi po liniyam 0,4 i 10 kV s ispol'zovaniem PLC-tekhnologii v AIIS KUER «ATLAS» / OOO «Sistel» g. Moskva* [Technical aspects of the organization of communication on the lines of 0.4 and 10 kV Using PLC technology in AIIS KUER «ATLAS» / LLC «Sistel» Moscow] [Technical Aspects of the Organization of Communication on the Lines of 0.4 and 10 kV Using PLC Technology in AIIS KUER «ATLAS» / LLC «Sistel» Moscow]. *Zhurnal «ISUP» — Journal «ISUP»*, 2015, No. 2 (56), pp. 49–52. [in Russian].

28. Kamaliev R.N., Mingaliev A.R., Khabibullin T.F. *Rezultaty oprobovaniya sistemy ucheta elektroenergii na baze PLC-tekhnologii v raspredelitel'nykh setyakh 10–0,4 kV* [Results of Approbation of System of the Account of the Electric Power on the Basis of PLC-Technology in Distributive Networks 10–0,4 kV]. *Energetika Tatarstana — Power Engineering of Tatarstan*, 2011, No. 4, pp. 67–71. EDN: OOKYYN. [in Russian].

29. Chasovskii A.V., Zhernakov Yu.A. *Opyt vnedreniya sistemy ucheta elektroenergii na osnove tekhnologii PLC v raspredelitel'nykh setyakh 0,4 kV filiala OAO «Setevaya kompaniya» Bugul'minskie elektricheskie seti* [Experience of Introduction the System of the Account Electric Power on the Basis of Technology PLC in Distributive Networks 0.4 kV Open Society Branch «Network Company» Bugulma Electric Networks]. *Energetika Tatarstana — Power Engineering of Tatarstan*, 2012, No. 3, pp. 46–52. EDN: PEWVRF. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 05.10.2023; одобрена после рецензирования 10.10.2023; принята к публикации 12.10.2023.

The article was submitted 05.10.2023; approved after reviewing 10.10.2023; accepted for publication 12.10.2023.

ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Максим Юрьевич

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

Барвинов Александр Витальевич

аспирант кафедры «Электроэнергетика», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Белявцев Матвей Владимирович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Буланов Михаил Викторович

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

Вавилов Вячеслав Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, директор ПИШ «Моторы Будущего», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Ганичева Лидия Сергеевна

Студент 4-го курса, ПИ-191, Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Демин Алексей Юрьевич

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

Ефименко Ангелина Максимовна

магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Жеребцов Сергей Николаевич

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

Зайниев Азат Венерович

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Зайцев Евгений Артемович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Зайцева Алина Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Заманова Гузель Ихсановна

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Захаров Игорь Леонидович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники, Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Зыкин Павел Витальевич

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

Исмагилов Флюр Рашитович

доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке ПИШ «Моторы Будущего», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Кильмаков Дмитрий Константинович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Кондрашова Юлия Николаевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Королев Вячеслав Игоревич

аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, НИУ «Московский энергетический институт», Москва, Россия

Косарев Борис Андреевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия; научный сотрудник, Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Омск, Россия

Кошук Галина Андреевна

старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Култаев Дим Ринатович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Лазарев Дмитрий Викторович

аспирант кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Лобанов Андрей Викторович

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

Маклаков Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-инновационного сектора, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Максудов Денис Вилевич

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

Месропян Арсен Владимирович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Нафикова Розалия Марселевна

аспирант кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Николаев Александр Аркадьевич

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

Охотников Александр Анатольевич

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

Пашали Диана Юрьевна

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

Раков Иван Витальевич

инженер 1 категории группы внедрения инноваций и изобретательской деятельности, ООО «Газпром трансгаз Томск», Томск, Россия

Рохлов Владислав Андреевич

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

Сафиуллин Рузил Ахнафович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Технические дисциплины», Уфимский университет науки и техники (филиал г. Нефтекамске), Нефтекамск, Россия

Силин Иван Петрович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау), Кумертау, Россия

Снигур Артём

студент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Стыскин Андрей Викторович

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

Терегулов Тагир Рафаилович

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

Уразбахтин Руслан Рустемович

начальник отдела исследований БЛА ПИШ «Моторы Будущего», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Федосов Евгений Михайлович

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

Хакимьянов Марат Ильгизович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Халиков Альберт Рашитович

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

Хамитов Рустам Нуриманович

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

Шайдуллин Венер Фанусович

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Янгиров Ильгиз Флюсович

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

ABOUT THE AUTHORS

Afanasev Maksim Yu.

Assistant Professor of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Barvinov Alexander V.

Postgraduate student of Electrical Power Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Belyavtsev Matvey V.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

Bulanov Mikhail V.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Demin Aleksei Yu.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Efimenko Angelina M.

Undergraduate Student of the Department of Electrical Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Fedosov Evgeniy M.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Ganicheva Lidia S.

4th Year Student, PI-191, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Ismagilov Flur R.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor, Deputy Director for Science of FIS «Motors of the Future», Ufa State University of Science and Technology, Ufa, Russia

Khakimyanov Marat I.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khalikov Albert R.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian

Khamitov Rustam N.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia; Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Kilmakov Dmitriy K.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

Kondrashova Yulia N.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Electrical Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Korolev Vyacheslav I.

Undergraduate Student of Institute of Electrical Engineering and Electrification, National Research University «MPEI», Moscow, Russia

Kosarev Boris A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia; Researcher of Institute of Radiophysics and Physical Electronics, Omsk Scientific Center, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Omsk, Russia

Koshchuk Galina A.

Senior Lecturer of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Kultaev Dim R.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

Lazarev Dmitriy V.

Postgraduate Student of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Lobanov Andrey V.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Maklakov Alexander S.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Research and Innovation Sector, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Maksudov Denis V.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Mesropyan Arsen V.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Mechanics and Digital Design Department, Ufa State University of Science and Technology, Ufa, Russia

Nafikova Rosalia M.

Postgraduate Student of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Nikolaev Aleksandr A.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Okhotnikov Aleksandr A.

Senior Lecturer of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Pashali Diana Yu.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Rakov Ivan V.

Innovations and Inventive Activity Engineer 1 Category, Gazprom transgaz Tomsk LLC, Tomsk, Russia

Rokhlov Vladislav A.

Postgraduate Student of Electric Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Safiullin Ruzil A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Technical Disciplines Department, Ufa State University of Science and Technology (Branch in Neftekamsk), Neftekamsk, Russia

Shaydullin Vener F.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Silin Ivan P.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

Snigur Artem

Student of Department of Electrical Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Styskin Andrey V.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Teregulov Tagir R.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Urazbakhtin Ruslan R.

Head of the UAV Research Department of the FIS «Motors of the Future», Ufa State University of Science and Technology, Ufa, Russia

Vavilov Vyacheslav E.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Director of the FIS «Motors of the Future», Ufa State University of Science and Technology, Ufa, Russia

Yangirov Ilgiz F.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Zaitsev Evgeny A.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

Zaitseva Alina A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa University of Science and Technology (Branch in Kumertau), Kumertau, Russia

Zakharov Igor L.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Zamanova Guzel I.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the General Physics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Zayniev Azat V.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zherebtsov Sergey N.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Zykin Pavel V.

Postgraduate Student of Electric Power Industry Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 10 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без

использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.

11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.

12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.

13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».

14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

— НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);

— НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);

— НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);

— НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям,
отклоняются для доработки**

Requirements for the materials, provided for publication in the journal

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

Memo to authors

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («») or (“”).

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.