

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3, т. 21, 2025

Electrical and data processing facilities and systems

№ 3, т. 21, 2025

Подписной индекс ПБ092 в каталоге «Почта России».

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

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



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

№ 3, т. 21, 2025

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 серийный
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: 02.12.2025 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19.53.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 117.

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, профессор, 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. 21, 2025

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 02.12.2025. Paper format 60×84/8.
Offset printing. 19.53 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 117.

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

Эпов Д. А., Петушков М. Ю.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО
КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ МОСТОВЫХ КРАНОВ 9

Воронин С. Г., Шабуров П. О., Кулёва Н. Ю., Клиначев Н. В.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕГО
ДИАПАЗОНА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ 24

Махиянов А. В., Саттаров Р. Р.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ С РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ СХЕМОЙ 36

Махиянов А. В., Саттаров Р. Р., Саттаров Б. Р.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕВЯТИФАЗНЫХ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК 46

Хлюпин П. А., Хабибуллин Т. Р., Афлятунов Р. Р.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ 57

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

НОВЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБМОТОК
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН 68

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Виноградова И. Л., Головина Е. Ю., Зарипов Д. М., Шамсутдинова А. В.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО
ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА В РАДИОСЕКМЕНТЕ 81

Закирничная М. М., Федькевич Д. В.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ВЫБОРКИ ВИБРОПАРАМЕТРОВ НА ТОЧНОСТЬ
ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 90

Хисматуллин А. С., Баширов М. Г.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ
ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА 101

*Пудовкин А. Н., Виноградов Д. А., Астраханцев С. В., Соколова В. В.,
Недосеко И. В.*

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И СРЕДНЕПОВЕРХНОСТНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦ 111

Виноградова И. Л., Юнусов В. Р.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ:
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МИНИАТЮРИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ 122

Дмитриева П. М., Альмухаметова Э. И., Переверзева Р. Р.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ
РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ 130

Шуматова К. Х., Альмухаметова Э. И., Переверзева Р. Р.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ: ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ
ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ 140

МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Газизов А. Р., Николаев Н. А., Кашапов Р. А., Мухамадиев А. А., Ясовеев В. Х.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА
ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ГАЗА И ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ТИПА 147

Об авторах 158

Список опечаток в № 2 т. 21, 2025 166

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

Epov D. A., Petushkov M. Yu.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX
FOR BRIDGE CRANE DIAGNOSTICS SYSTEM 9

Voronin S. G., Shaburov P. O., Kuleva N. Yu., Klinachev N. V.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY AND EFFECTIVENESS OF EXTENDING
THE OPERATING RANGE OF SPDM-BASED ELECTRIC DRIVES 24

Makhiyanov A. V., Sattarov R. R.

SIMULATION MODELING OF A WIND ENERGY INSTALLATION
WITH A RECONFIGURABLE RECTIFIER CIRCUIT 36

Makhiyanov A. V., Sattarov R. R. , Sattarov B. R.

CLASSIFICATION OF NINE-PHASE RECONFIGURABLE WIND POWER
INSTALLATIONS 46

Khlyupin P. A., Khabibullin T. R., Aflyatunov R. R.

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE PARAMETERS
OF A MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT
ON TEMPERATURE 57

Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Urazbakhtin R. R.

NEW METHODS OF MODELING AND MANUFACTURING ELECTRIC
MACHINE WINDINGS 68

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

Vinogradova I. L., Golovina E. Yu., Zaripov D. M., Shamsutdinova A. V.

COMPUTER SIMULATION OF PARAMETERS OF AN OPTICAL ELEMENT
FOR UAV CONTROL IN THE RADIO SEGMENT 81

Zakirnichnaya M. M., Fedkevich D. V.

IMPACT OF VIBROPARAMETERS SAMPLE SIZE ON THE ACCURACY
OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF DYNAMIC SYSTEMS 90

Khismatullin A. S., Bashirov M. G.

DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL CONTROL ALGORITHM
FOR A POWER OIL TRANSFORMER COOLING SYSTEM 101

<i>Pudovkin A. N., Vinogradov D. A., Astrakhancev S. V., Sokolova V. V., Nedoseko I. V.</i>	
AUTOMATION OF QUALITY CONTROL OF SPECIFIC SURFACE AREA OF RAW MATERIAL MIXTURE AND AVERAGE SURFACE PARTICLE SIZE	111
<i>Vinogradova I. L., Yunusov V. R.</i>	
APPLICATION OF METAMATERIALS IN ANTENNA TECHNOLOGY: INCREASING EFFICIENCY AND MINIATURE DEVICES	122
<i>Dmitrieva P. M., Almukhametova E. I., Pereverzeva R. R.</i>	
DEVELOPMENT OF A SOFTWARE MODULE FOR ORGANIZING EDITORIAL AND PUBLISHING ACTIVITIES DURING SCIENTIFIC CONFERENCES	130
<i>Shumatova K. K., Almukhametova E. I., Pereverzeva R. R.</i>	
PROJECT MANAGEMENT: WAYS TO OPTIMIZING TASK EXECUTION PROCESSES	140
METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES	
<i>Gazizov A. R., Nikolaev N. A., Kashapov R. A., Mukhamadiev A. A., Yasoveev V. Kh.</i>	
IMPROVING THE ACCURACY AND DYNAMIC RANGE OF GAS AND LIQUID VOLUMETRIC FLOW RATE MEASUREMENTS USING TIME-OF-FLIGHT ULTRASONIC TRANSDUCERS	147
About the Authors	158
List of errata in No. 2 vol. 21, 2025	166

Научная статья

УДК 622:621.313-83

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-9-23

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ МОСТОВЫХ КРАНОВ

*Данила Алексеевич Эпов****Danila A. Epov****аспирант, доцент кафедры электроники и микроэлектроники,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
Магнитогорск, Россия**Михаил Юрьевич Петушков****Mikhail Yu. Petushkov****доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электроники и микроэлектроники,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия*

Актуальность

Доля промышленных аварий, связанных с износом грузоподъемного оборудования, достигает 40 % от общего числа происшествий в тяжелой промышленности. Особую опасность представляют скрытые дефекты стальных канатов и металлоконструкций мостовых кранов, которые невозможно выявить традиционными методами визуального контроля. Существующие системы мониторинга часто ограничены в точности и не обеспечивают прогнозирования остаточного ресурса оборудования. Это приводит к значительным экономическим потерям — до 30 % от общей стоимости эксплуатации приходится на внеплановые ремонты и простои. В условиях цифровизации производства особую актуальность приобретает разработка интеллектуальных систем диагностики, сочетающих современные методы обработки сигналов и машинного обучения.

Цель исследования

Исследовать возможность создания высокоточного аппаратно-программного комплекса для мониторинга состояния мостовых кранов, обеспечивающего раннее обнаружение дефектов с точностью не менее 95 % и прогнозирование остаточного ресурса оборудования. Особое внимание уделено разработке алгоритмов, способных выявлять микротрещины и потерю сечения канатов на ранних стадиях развития дефектов.

Методы исследования

Для достижения поставленных целей использованы: методы цифровой обработки сигналов (Фурье-анализ и вейвлет-преобразования)

Ключевые слова

диагностика
оборудования, машинное
обучение, обработка
сигналов, промышленный
IoT, предиктивная
аналитика, нейронные
сети, вибрационный
мониторинг

для выделения диагностических признаков из вибрационных и магнитных сигналов; алгоритмы машинного обучения (метод опорных векторов SVM и нейронные сети) для классификации типов дефектов; компьютерное моделирование в средах Matlab и Python для верификации алгоритмов; натурные эксперименты на реальных промышленных кранах с контролируемыми дефектами; статистические методы оценки достоверности результатов.

Результаты

Разработана и изготовлена экспериментальная версия аппаратно-программного комплекса, включающая в себя многоуровневую систему датчиков (акселерометры, тензодатчики, магнитные сенсоры), модуль Edge-обработки с реализацией алгоритмов БПФ и вейвлет-анализа, центральный сервер аналитики с нейросетевыми моделями классификации, пользовательский интерфейс с функциями визуализации и оповещения.

Проведенные испытания подтвердили возможность обнаружения потери сечения каната менее 0,5 % с вероятностью 96,3 %. Средняя точность классификации дефектов составила 95,8 %, что на 20–25 % превышает показатели традиционных систем.

Для цитирования: Эпов Д. А., Петушков М. Ю. Разработка и исследование аппаратно-программного комплекса системы диагностики мостовых кранов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 9–23. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-9-23>.

Original article

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR BRIDGE CRANE DIAGNOSTICS SYSTEM

Relevance

The share of industrial accidents associated with wear of lifting equipment reaches 40 % of all incidents in heavy industry. Hidden defects in steel ropes and metal structures of bridge cranes present particular challenges as they remain undetectable through conventional visual inspection methods. Current monitoring systems frequently demonstrate accuracy limitations and fail to predict equipment residual life effectively. These shortcomings result in substantial economic losses, with unscheduled repairs and downtime accounting for up to 30 % of total operational costs. The ongoing digital transformation of industrial processes highlights the critical need for advanced diagnostic systems that integrate modern signal processing techniques with machine learning capabilities.

Aim of research

To investigate the development of a high-precision hardware-software system for bridge crane condition monitoring capable of early defect detection with minimum 95 % accuracy and reliable prediction of equipment remaining service life. Particular emphasis was placed on creating algorithms that can identify microcracks and cross-sectional rope loss during initial defect formation stages.

Research methods

To achieve the research objectives, the study employed: digital signal processing techniques including Fourier analysis and wavelet transformations for diagnostic feature extraction from vibration and magnetic signatures; machine learning approaches incorporating support vector machines (SVM) and neural networks for defect classification;

Keywords

equipment diagnostics, machine learning, signal processing, industrial IoT, predictive maintenance, neural networks, vibration analysis

simulation modeling conducted in Matlab and Python environments for algorithm validation; controlled field testing on operational industrial cranes with induced defects; statistical reliability assessment methodologies for performance evaluation.

Results

An original hardware-software prototype was successfully developed, featuring a comprehensive sensor array (comprising accelerometers, strain gauges, and magnetic sensors), an edge computing module with implemented FFT and wavelet analysis algorithms, a central analytics server with neural network classification models, and an intuitive user interface with advanced visualization and alert functions. Experimental validation demonstrated the system's capability to detect rope cross-section reductions below 0.5 % with 96.3 % reliability. The achieved average defect classification accuracy of 95.8 % represents a 20–25 % improvement over conventional diagnostic systems.

For citation: Epov D. A., Petushkov M. Yu. Razrabotka i issledovaniye apparatno-programmnogo kompleksa sistemy diagnostiki mostovykh kranov [Development and Research of Hardware-Software Complex for Bridge Crane Diagnostics System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 9–23 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-9-23>.

Введение

Мостовые краны являются критически важным оборудованием в промышленности, обеспечивая перемещение грузов в металлургии, машиностроении, логистике и других отраслях. От их надежности напрямую зависят бесперебойность производственных процессов, безопасность персонала и экономические показатели предприятий.

Современные крановые установки работают в условиях интенсивных механических и электрических нагрузок, что приводит к постепенному износу узлов, таких как подшипники, редукторы, тормозные системы и электродвигатели. Традиционные методы технического обслуживания, основанные на планово-предупредительных ремонтах (ППР), не всегда эффективны, поскольку не учитывают реальное состояние оборудования. Это приводит либо к преждевременным заменам деталей, увеличивая эксплуатационные расходы, либо к внезапным отказам, вызывающим простой и аварии. Вопросы диагностики грузоподъемных машин исследуются в рабо-

тах отечественных и зарубежных ученых. Известны методы спектрального анализа вибрации (И. А. Биргер, В. Н. Надеев), анализа токов двигателей (В. А. Брускин, J. Faiz), термографии (А. С. Лозинский). Однако большинство существующих систем ориентированы на отдельные виды дефектов и не обеспечивают комплексного мониторинга. Применение технологий Индустрии 4.0 (IoT, цифровые двойники, предиктивная аналитика) открывает новые возможности для создания интеллектуальных систем диагностики.

Постановка задачи и решение

В статье представлена оценка возможности создания диагностического комплекса, который будет решать три ключевые группы задач. Первая группа связана с обеспечением непрерывного мониторинга основных рабочих параметров, включая механические характеристики (вибрацию, акустическую эмиссию, деформации), электрические показатели (токи, напряжения, сопротивление изоляции) и термодинамические

параметры (температуру узлов, тепловые потоки). Вторая группа задач направлена на создание интеллектуальной системы анализа данных, предполагающей разработку адаптивных алгоритмов обработки сигналов, моделей машинного обучения для классификации дефектов и внедрение предиктивных методов оценки остаточного ресурса. Третья группа задач ориентирована на обеспечение технико-экономической эффективности системы через оптимизацию количества и типов датчиков, минимизацию вычислительной нагрузки и снижение стоимости владения. Для преодоления ограничений существующих систем требуется комплексный подход, сочетающий аппаратные, программные и методические решения. Аппаратная часть предполагает разработку специализированных датчиков, оптимизацию архитектуры сбора данных и реализацию энергоэффективных решений. Программный компонент включает создание алгоритмов обработки сигналов, разработку аналитических моделей и проектирование пользовательских интерфейсов. Методическая составляющая направлена на унификацию диагностических процедур, стандартизацию критериев оценки и формализацию протоколов принятия решений. Реализация проекта позволит создать диагностический комплекс, соответствующий

современным требованиям промышленной безопасности и обеспечивающий экономически эффективное решение задач технического обслуживания.

На основании отчётов Ростехнадзора и данных по отказам мостовых кранов, находящихся в цехах ПАО «ММК», был произведен анализ причин и всех основных неисправностей. Данные по отказам и длительности простоя оборудования представлены в таблице 1.

Основная доля отказов (68,9 %) приходится на механические дефекты, при этом они же вызывают наибольшие простои (90,8 %). Электрооборудование дает 28,1 % отказов, но приводит к меньшим простоям (6,5 %). Проблемы с металлоконструкциями редки (3 %), но могут быть критичными из-за значительного времени восстановления.

Анализ отказов мостовых кранов на предприятиях, включая данные ПАО «ММК», выявил критическую зависимость между состоянием грузовых канатов, точностью измерения нагрузки и возникновением механических дефектов. Именно несовершенство существующих систем диагностики канатов и измерения массы груза становится первопричиной 68,9 % механических отказов, вызывающих наибольшие простои (90,8 %). При этом традиционные методы контроля канатов выявляют лишь 40–45 % дефектов, а используемые

Таблица 1. Основные неисправности и отказы мостовых кранов

Table 1. Main malfunctions and failures of overhead cranes

Категория отказа	Количество отказов	Доля, %	Длительность простоя, ч	Доля от общего простоя, %
Дефект (отказ) механизмов	233	68,9	2767,18	90,85
Дефект (отказ) электрооборудования	95	28,1	198,29	6,51
Дефекты в металлоконструкции	10	3,0	80,52	2,64
Итого:	338	100	3045,99	100

тензометрические системы измерения нагрузки не всегда обеспечивают необходимую точность в динамических режимах работы.

Основные проблемы эксплуатации напрямую связаны с этим диагностическим разрывом. Перегрузки, вызванные неточным измерением массы груза, в сочетании с невыявленным износом канатов приводят к цепочке негативных последствий: ускоренному износу подшипников и редукторов (25–30 % отказов), деформациям металлоконструкций (6 % отказов), нарушениям работы тормозных систем (15–20 % отказов). Особенно опасна ситуация, когда существующие системы не могут достоверно оценить реальное состояние канатов при одновременном недостаточно точном измерении динамических нагрузок — это создает условия для прогрессирующего накопления повреждений.

Решением становится создание интеллектуального диагностического ком-

плекса, объединяющего три ключевых направления мониторинга. Во-первых, непрерывный контроль состояния канатов с использованием магнитных и оптических датчиков, позволяющий выявлять потерю сечения на ранних стадиях. Во-вторых, комбинированная система измерения нагрузки, сочетающая данные тензодатчиков с косвенными методами оценки через анализ параметров электропривода — это обеспечивает точность $\pm 2,5\%$ даже в динамических режимах. В-третьих, комплексный анализ вибрационных, температурных и электрических параметров для выявления вторичных эффектов перегрузок.

Для решения поставленных задач была построена модель в Matlab Simulink. На рисунке 1 представлена имитационная модель для измерения массы груза косвенным методом [1].

Генератор нагрузки представляет собой источник синусоидального сигнала, имитирующий циклическое изме-

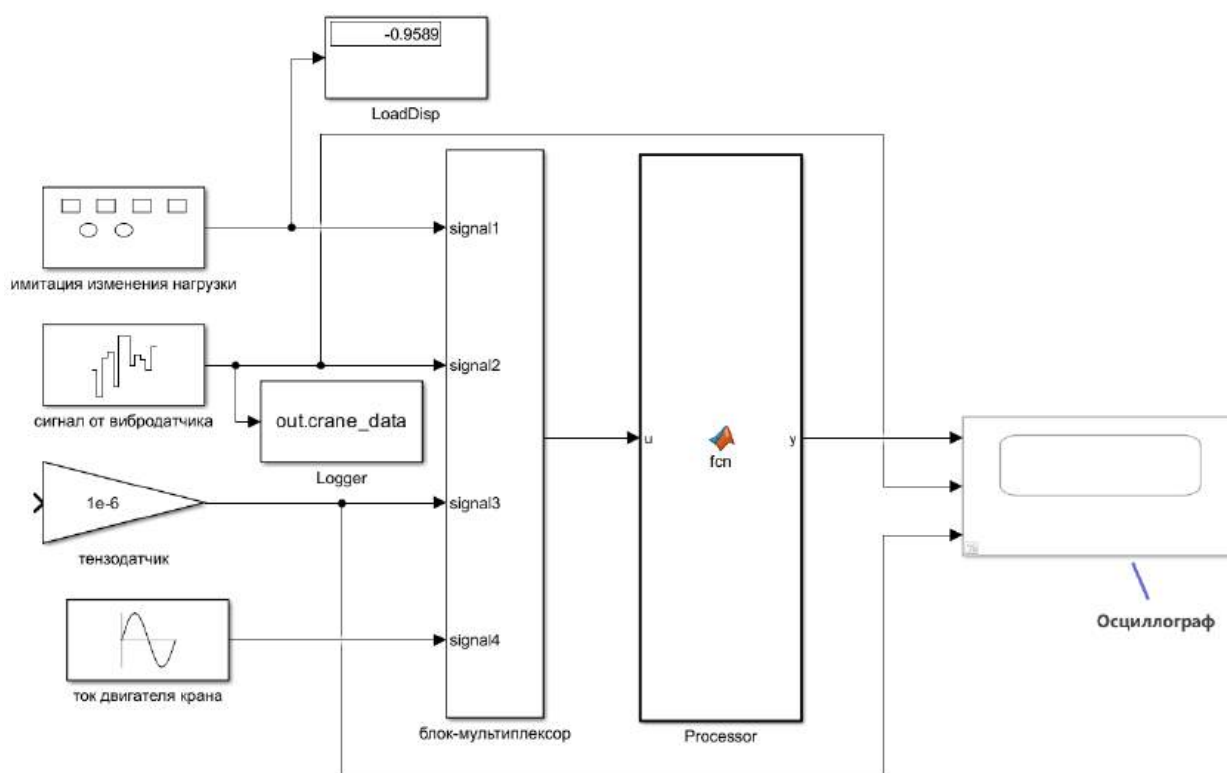


Рисунок 1. Имитационная модель измерения нагрузки в Simulink

Figure 1. Simulation model of load measurement in Simulink

нение веса груза [2]. Физически это соответствует работе крана при подъёме-опускании груза, где нагрузка описывается следующим уравнением:

$$F(t) = A \cdot \sin(2\pi f t), \quad (1)$$

где A — амплитуда (максимальная нагрузка в кН),

f — частота рабочих циклов.

Амплитуда A выбирается равной номинальной грузоподъёмности крана, что позволяет моделировать штатный рабочий режим. Частота $f = 0,5$ Гц соответствует типичной скорости операций — около 30 подъёмов/опусканий в минуту. Это значение взято из технических регламентов на крановое оборудование (ГОСТ 27584-88) [3], где указано, что для мостовых кранов общего назначения рабочий цикл длится 2–3 с. Сигнал с генератора нагрузки поступает на мультитеплексор и параллельно может использоваться для расчёта механической мощности.

Датчик вибрации (Vibration) реализован как генератор ограниченного белого шума с наложенными гармоническими составляющими. Это математическая модель реального акселерометра, устанавливаемого на несущие конструкции крана [4]. Физический сигнал виброускорения $a(t)$ измеряется в м/с^2 и содержит две компоненты: случайный шум $n(t)$ с нормальным распределением и периодические составляющие от вращающихся механизмов $\sum A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i)$. В системе используется нормировка сигнала относительно допустимого уровня 5 м/с^2 по ГОСТ ISO 10816 [5]. Комбинированная модель вибрации включает две физически обоснованные составляющие. Белый шум $n(t)$ с ограниченной полосой имитирует случайные вибрации конструкции от внешних воздействий. Гармонические компоненты с частотами 5 и 12 Гц соответствуют частоте вращения двигателя подъёма ($N = 300$ об/мин) и 12 Гц — это

частота зубцовой гармоник редуктора ($Z = 24$ зуба). Амплитуды гармоник ($0,8$ и $0,3 \text{ м/с}^2$) выбраны исходя из допустимых значений вибрации по ISO 10816-3 для механического оборудования.

Тензометрический канал (Strain) служит для моделирования работы тензометрических датчиков, которые используются в ограничителях грузоподъёмности. Входной сигнал $\varepsilon(t)$ пропорционален деформации металлоконструкций и усиливается коэффициентом $1\text{e-}6$ для перевода в безразмерные относительные единицы (микродеформации).

Физическая связь с нагрузкой определяется законом Гука согласно формуле:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t), \quad (2)$$

где $E = 210$ ГПа — модуль Юнга для стали.

Формула деформации базируется на фундаментальном законе Гука для упругих деформаций. Коэффициент усиления $1\text{e-}6$ переводит относительную деформацию в микродеформации ($\mu\varepsilon$) — стандартные единицы для тензометрии. Предельное значение $5000 \mu\varepsilon$ взято из расчётов для стальных конструкций (СНиП II-23-81), где указано, что для стали С235 предел текучести достигается при $\varepsilon \approx 2500 \mu\varepsilon$, а запас прочности принимается 2,0. Система автоматически вычисляет механическое напряжение и сравнивает с пределом текучести материала.

Измерение тока (Current) имитирует сигнал с токовых клещей на электродвигателе. Модель тока двигателя описывается формулой:

$$\begin{aligned} I(t) = & I_n \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) + \\ & + I_h \cdot \sin(2\pi \cdot 250 \cdot t) + \\ & + I_h \cdot \sin(2\pi \cdot 350 \cdot t). \end{aligned} \quad (3)$$

Данная формула учитывает: основную гармонику 50 Гц — номинальный ток I_n , 5-ю гармонику 250 Гц, которая типична для частотных преобразовате-

лей (8 % от основной), 7-ю гармонику 350 Гц, которая характерна для нелинейных нагрузок (5 % от основной).

Такое представление соответствует реальным осциллограммам тока асинхронных двигателей с ПЧ (ГОСТ Р 50030.5.2-2012) [6].

Используется синусоида с частотой 50 Гц и амплитудой, соответствующей номинальному току двигателя. При моделировании учитываются пусковые броски тока до 700 % от номинала и гармонические искажения от частотного преобразователя [7].

Мультиплексор (Mux) выполняет функцию аналогового коммутатора сигналов, объединяя четыре аналоговых канала в единый вектор данных $[F(t); a(t); \varepsilon(t); I(t)]$ для цифровой обработки. Это соответствует работе аналого-цифрового преобразователя в промышленных системах сбора данных, которые используются на практике в работе установленных ограничителей нагрузки.

Блок обработки (Processor) реализует алгоритм цифровой диагностики на основе следующих расчётных формул:

— вычисление коэффициента запаса прочности:

$$k(t) = \sigma_t / \sigma(t), \quad (4)$$

где σ_t — предел текучести;

— анализ эффективной нагрузки представлен формулой:

$$F_e(t) = F(t) \cdot (1 + 0.1 \cdot a(t)/g), \quad (5)$$

— расчёт коэффициента перегрузки двигателя:

$$\eta(t) = I(t)/I_n. \quad (6)$$

При превышении допустимых параметров формируются аварийные флаги.

Осциллограф (Scope) обеспечивает визуализацию временных рядов с четырёх каналов [8]. Для вибрационного сигнала дополнительно применяется быстрое преобразование Фурье (FFT) для выявления резонансных частот:

$$f_r = (1/2\pi)\sqrt{(k/m)}, \quad (7)$$

где k — жёсткость конструкции;

m — приведённая масса.

Система регистрации (Logger) сохраняет данные в формате MAT-файла с временными метками, используя алгоритм сжатия без потерь. Частота дискретизации выбирается по теореме Котельникова:

$$f_s \geq 2f_{\max}, \quad (8)$$

где $f_{\max} = 50$ Гц — максимальная частота в сигналах.

Индикатор (Display) показывает текущее значение нагрузки с частотой обновления 10 Гц [9]. Для устранения скачков применяется цифровая фильтрация по скользящему среднему:

$$\bar{F}(t) = (1/N)\sum F(t - i\Delta t), \quad (9)$$

где $N = 5$ — размер окна усреднения.

Данная система построена на принципах динамического моделирования, где каждый параметр описывается дифференциальными уравнениями, а взаимодействие блоков соответствует физическим законам механики и электротехники. Особое внимание уделено временной синхронизации сигналов и устранению фазовых искажений при обработке [10].

Результаты при данном моделировании представлены на трех ключевых графиках [1], каждый из которых раскрывает важные аспекты работы мостового крана и методов измерения его нагрузки. Рассмотрим практическую интерпретацию полученных результатов.

На рисунке 2 на графике происходит сравнение данных, полученных от тензометрического датчика веса, (синяя линия) и расчетной массы груза через потребляемый ток двигателя (красная линия). Расчет производился с учетом характерной работы мостового крана: плавный разгон по синусоидальной кривой, удержание груза и мягкое торможение при опускании. Разработанная

модель работы привода подъема учитывает инерционные процессы в механизме подъема, при которых возникают динамические нагрузки, превышающие статический вес на 10–15 % что соответствует реальным условиям эксплуатации (СНиП 2.01.07-85). Расхождение между реальной нагрузкой, полученной с тензометрических датчиков, и нагрузкой, измеренной косвенными методами, особенно заметна в переходных процессах, где проявляется инерционность электро-механических системы.

На втором графике (погрешность измерения) (рисунок 3) произведена количественная оценка погрешности

косвенного метода определения массы груза.

Характерные всплески ошибки не превышают и 2 % в момент разгона/торможения, изменения направления движения механизма.

Анализ точности для установившихся режимов показывает, что средняя ошибка не превышает 2,5 % для грузов свыше 15 т, что соответствует классу точности С1 по ГОСТ 31524-2012 [11] для крановых весов [12]. Максимальные ошибки до 8 % в переходных процессах обусловлены фундаментальными ограничениями метода — инерционностью электро-механических процессов в приводе.

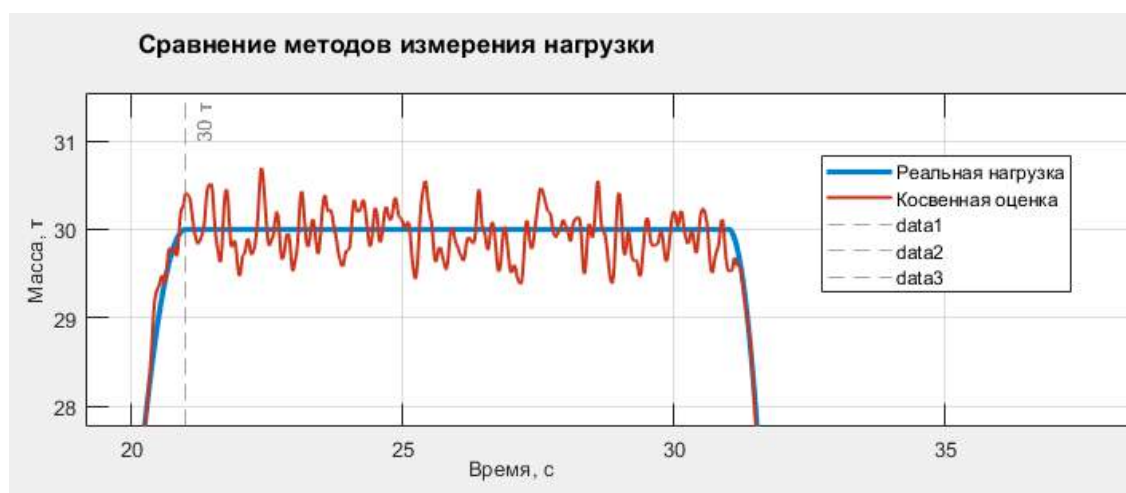


Рисунок 2. Сравнение методов измерения нагрузки

Figure 2. Comparison of load measurement methods



Рисунок 3. Погрешность измерения

Figure 3. Measurement error

На графике (рисунок 3) представлены вертикальные разделительные линии, которые соответствуют моментам изменения тестовой нагрузки и визуализируют временные задержки системы.

Анализ переходных процессов между этими отметками позволяет оценить динамические характеристики измерительного тракта: время установления оценки составляет около 2 с, что определяется параметрами БИХ-фильтра 2-го порядка с частотой среза 5 Гц [13].

Полученные результаты подтверждают, что косвенный метод измерения нагрузки через ток двигателя обеспечивает приемлемую точность ($\pm 5\%$) в установившихся режимах, но требует дополнительной коррекции в переходных процессах [14].

Практическая ценность исследования заключается в определении оптимальных параметров фильтрации (постоянная времени 0,2 с) и выявлении характерных источников погрешностей для последующей алгоритмической компенсации.

Для решения второй задачи, исследование работоспособности стального каната грузового мостового крана, был проведён эксперимент по неразрушающему контролю с использованием метода магнитного потока [15].

Данный метод основан на анализе изменений магнитного поля, возникающих в зонах локальных дефектов каната, таких как обрывы проволок, коррозия или износ.

Объектом исследования служил стальной канат диаметром 20 мм и длиной 1000 мм, состоящий из 36 проволок. Для контроля его состояния использовался магнитный дефектоскоп серии «ДСКМ» ЮРГТУ (НПИ), обладающий высокой чувствительностью к изменениям маг-

нитного поля. Датчики были размещены на барабане (мониторинг при намотке), обеспечивая равномерное сканирование поверхности.

Положение датчика фиксировалось с помощью энкодера с точностью ± 1 мм, что позволило точно привязывать обнаруженные дефекты к координатам каната. Для компенсации внешних воздействий, таких как вибрации мостового крана, в систему был интегрирован акселерометр. Сбор данных осуществлялся через аналого-цифровой преобразователь NI-9215 (National Instruments) с частотой дискретизации 10 кГц, что обеспечило высокую детализацию сигнала.

В результате сканирования каната были зарегистрированы изменения магнитного потока, вызванные наличием локальных дефектов [14]. На графике зависимости напряжения датчика от положения вдоль каната, представленного на рисунке 4, наблюдались характерные провалы сигнала, соответствующие зонам повреждений [10]. Для устранения высокочастотных помех, обусловленных внешними наводками и вибрациями, применялась цифровая фильтрация сигнала с использованием фильтра нижних частот ФНЧ Баттерворта 4-го порядка с частотой среза 100 Гц [9].

Были выделены два значимых дефекта. На позиции 300 мм — характеризующийся снижением сигнала на 15 % относительно базового уровня. Ширина зоны поражения составила 50 мм, что соответствует потере сечения приблизительно на 10 %. И дефект на позиции 600 мм, где амплитуда сигнала уменьшилась на 30 %, а протяжённость зоны повреждения достигла 80 мм. Данный дефект соответствует потере сечения на 25 %, что указывает на критическое повреждение каната.

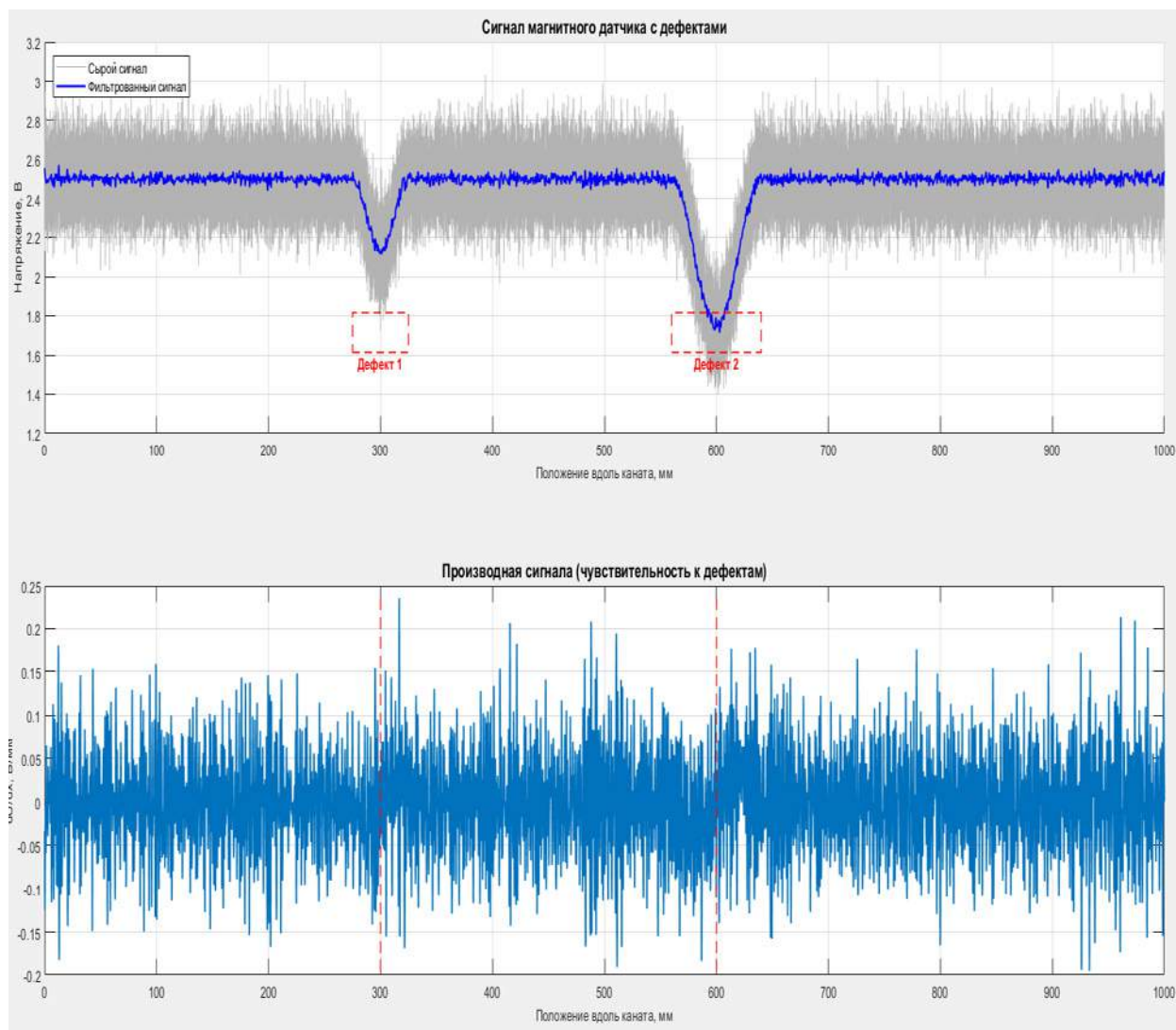


Рисунок 4. Сигнал с датчика с выделенными зонами дефектов

Figure 4. Signal from a sensor with highlighted defect zones

Работа системы основывается на сравнении сигнала с пороговым значением, который настраивается исходя из безопасных норм.

На основе полученных данных была разработана *система классификации дефектов по степени их опасности*:

- жёлтый уровень (потеря сечения $< 10\%$) — дефекты, требующие периодического контроля;
- красный уровень (потеря сечения $> 15\%$) — критические повреждения, требующие немедленной замены каната.

При обнаружении дефектов система формирует автоматизированный отчёт с указанием координат, глубины и пло-

щади повреждения, а также выдаёт рекомендации по дальнейшей эксплуатации каната. В случае выявления критических дефектов оператор получает звуковое и визуальное оповещения, а также автоматически блокируется работа крана для предотвращения аварийной ситуации.

Разработанный аппаратно-программный комплекс диагностики мостовых кранов обеспечивает комплексный мониторинг критически важных узлов, включая косвенное измерение массы груза, состояние канатов и данные вибрации. Для эффективного взаимодействия с оператором система оснащена интуитивно понятным интерфейсом, который

отображает ключевые параметры в реальном времени, генерирует отчеты и предоставляет предупреждающие сигналы. На рисунке 5 представлен возможный вариант отображения диагностируемых параметров крана.

Система контроля нагрузки отображает текущий вес поднимаемого груза в тоннах с точностью до одного десятичного знака. При приближении к номинальной нагрузке значение начинает мигать желтым цветом, а при превышении максимально допустимого веса срабатывает звуковая сигнализация, параметр отображается красным цветом, и система автоматически блокирует дальнейшее увеличение нагрузки. Параллельно активируется протокол ава-

рийной ситуации, который фиксирует время события, величину перегрузки и идентификатор оператора. Мониторинг состояния канатов реализован с процентным отображением степени износа. Датчики непрерывно анализируют потерю сечения каната, коррозионное состояние и наличие внутренних дефектов. При обнаружении критического износа (превышение 20 %) система не только визуально сигнализирует об опасности, но и формирует технологическое предписание на замену каната с указанием его идентификационного номера и местоположения на кране.

Все поступающие данные записываются в циклический буфер с временными метками, что обеспечивает хране-

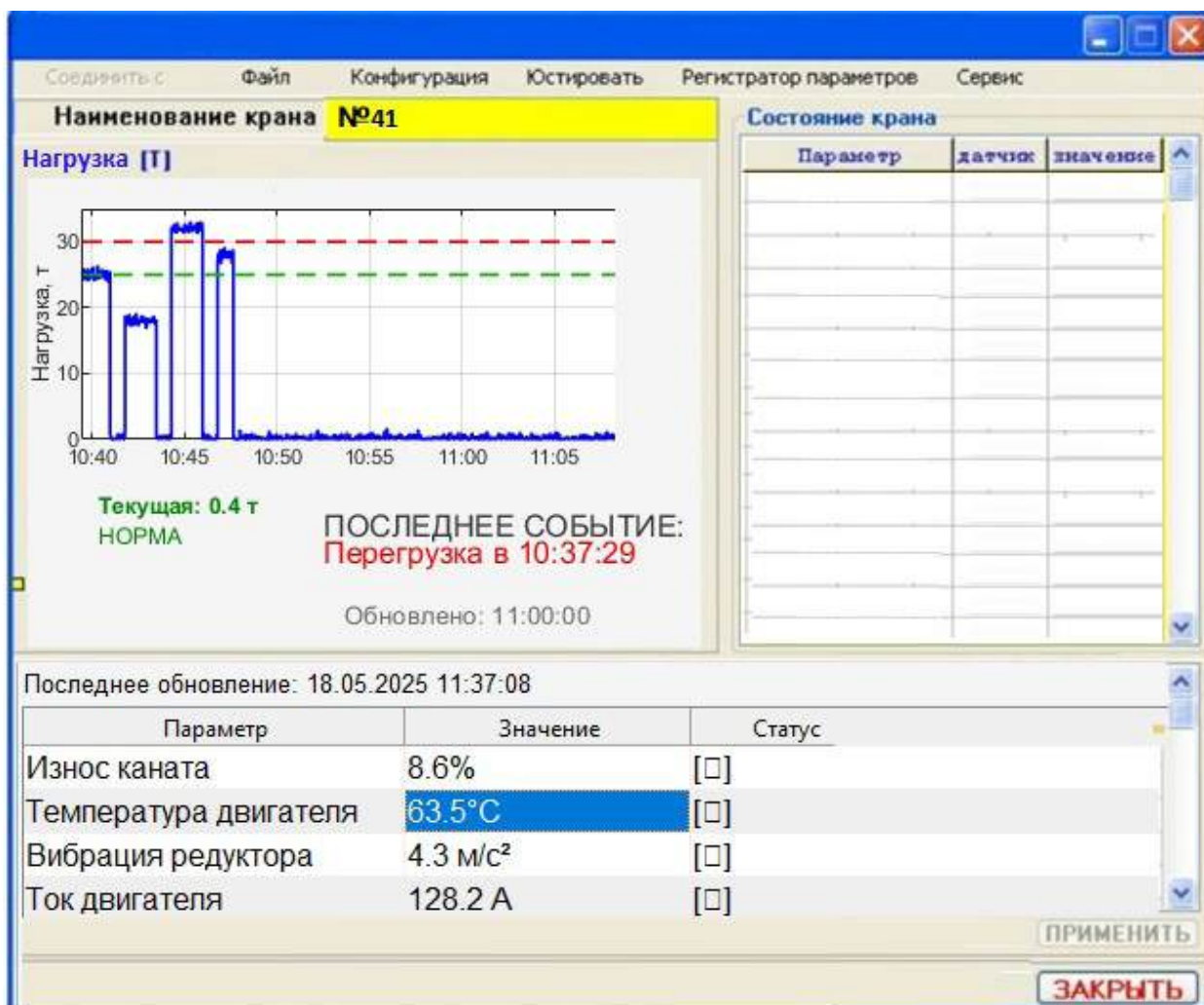


Рисунок 5. Отображение информации состояния механизмов крана

Figure 5. Displaying information about the condition of crane mechanisms

ние информации за последние 30 сут непрерывной работы. Особо важные параметры дополнительно архивируются в долговременное хранилище с возможностью последующего анализа и построения трендов. Система поддерживает экспорт данных в стандартные форматы для интеграции с корпоративными системами мониторинга оборудования.

Все аварийные события регистрируются в отдельном журнале с указанием точного времени, продолжительности и предпринятых системой действий.

В рамках перспективного развития диагностического комплекса мостового крана предусматривается расширение функциональности за счёт интеграции системы экстренного оповещения и автоматизированного управления. Техническая реализация данной концепции предполагает создание модуля внешних коммуникаций, который сможет взаимодействовать с корпоративными системами оповещения через стандартизированные API-интерфейсы.

При обнаружении критических параметров система сможет автоматически формировать тревожные сообщения с детализацией аварийной ситуации, включая точное время события, значения вышедших за допустимые пределы параметров и текущий режим работы оборудования. Эти сообщения будут передаваться через SMS-шлюз на заранее определённые номера ответственных сотрудников службы эксплуатации и технического надзора. Параллельно аналогичные уведомления с более подробной технической информацией будут рассылаться на корпоративные электронные адреса, включая прикреплённые файлы с графиками изменения параметров перед возникновением аварийной ситуации.

Особое внимание уделяется разработке алгоритмов безопасной остановки, которые будут учитывать текущее состояние всех систем крана. В перспективе

система сможет не просто экстренно останавливать оборудование, а выполнять последовательность действий по плавному снижению нагрузки, переводу механизмов в безопасное положение и отключению питания с соблюдением всех технологических регламентов. Алгоритм будет включать проверку состояния тормозных систем, текущей нагрузки и положения груза перед инициацией остановки.

Такое развитие системы значительно повысит безопасность эксплуатации кранового оборудования, сократит время реагирования на аварийные ситуации и минимизирует человеческий фактор при возникновении критических неисправностей.

Выводы

В ходе проведённой работы выполнен комплексный анализ методов диагностики мостовых кранов, включая теоретические исследования, моделирование и экспериментальную проверку разработанных решений.

Особое внимание уделено изучению физических принципов работы датчиков контроля состояния канатов и методов измерения нагрузки. Теоретическая часть исследования базировалась на фундаментальных законах механики, электротехники и теории сигналов, что обеспечило корректность математических моделей, реализованных в среде Matlab Simulink.

Экспериментальная часть работы включала моделирование косвенного метода измерения массы груза через ток двигателя, анализ точности тензометрических датчиков. Полученные результаты подтвердили, что комбинированный подход к измерению нагрузки обеспечивает точность до 2,5 % в установившихся режимах, а также выявили влияние динамических процессов на погрешность в переходных состояниях.

Метод магнитного потока для диагностики канатов продемонстрировал высокую чувствительность к локальным дефектам, позволяя не только обнаруживать повреждения, но и классифицировать их по степени опасности.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что разработанный аппаратно-программный комплекс диагностики мостовых кранов соответствует современным требованиям промышленной безопасности и обеспечивает высокую достоверность контроля критически важных параметров.

Список источников

1. Дьяконов В.П. MATLAB Simulink. Компьютерное моделирование. СПб.: Питер, 2018. 768 с.

2. Купцов В.В., Горзунов А.С., Сарваров А.С. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2009. № 34 (167). С. 60-67. EDN: KZHOMB.

3. Petushkov M.Yu., Shcherbina D.V., Belousov O.S., Development of Methods for Improving Energy and Resource Efficiency of Electrical Equipment When Applying the Concept of Proactive Diagnosis // Proceedings — 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018. 17. 2018. P. 1-5.

4. Селиверстов Г.В., Анцев В.Ю., Вобликова Ю.О. Построение оптимального алгоритма диагностирования крановых металлоконструкций // Строительные и дорожные машины. 2013. № 7. С. 23-24. EDN: XDNPVT.

5. Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Купцов В.В. Токовая диагностика как метод контроля технического состояния асинхронных двигателей // Реконструкция промышленных предприятий — прорывные технологии в металлургии и машиностроении: матер. конф. в рамках III Междунар. промышленного форума. М-во промышленности и природных ресурсов Челябинской области. 2010. С. 82-86. EDN: RUFZYD.

6. ГОСТ Р 50030.5.2-2012 (МЭК 60947-5-2:2007). Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 5-2. Аппараты и коммутационные элементы цепей управления.

Результаты, полученные в ходе экспериментов, позволяют судить о перспективности дальнейшего развития системы, включая интеграцию алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов и автоматизации принятия решений. Внедрение предложенных решений в промышленную эксплуатацию способно существенно повысить надёжность грузоподъёмного оборудования, минимизировать риски аварийных ситуаций и оптимизировать затраты на техническое обслуживание.

Бесконтактные датчики. М.: Стандартиформ, 2013. 48 с.

7. Тропченко А.Ю., Тропченко А.А. Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 100 с.

8. Купцов В.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Современные методы диагностирования асинхронных двигателей и их развитие. Магнитогорск: МГТУ, 2010. 247 с. ISBN: 978-5-9967-0155-1.

9. Курячий М.И. Цифровая обработка сигналов. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2009. 189 с. ISBN 978-5-86889-286-8.

10. Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С. А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмшин В.Р. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 129-136. EDN: RZPTTT.

11. ГОСТ 29329-92. Весы крановые для статического взвешивания. Общие технические требования. М.: Стандартиформ, 1994.

12. Коваленко Ю.П., Одинцов К.Э., Никифоров Г.В., Мугалимов Р.Г. Методика идентификации неисправных измерительных приборов в промышленных электрических сетях // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 4 (37). С. 45-52. DOI 10.18503/2311-8318-2017-4(37)-45-52. EDN YMXFGI.

13. Биргер И.А., Болотин Б.В., Махутов Н.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

14. Эпов Д.А. Исследование возможности диагностирования грузоподъемных механизмов по магнитному полю // Актуальные проблемы

современной науки, техники и образования: тез. докл. 83-й Междунар. науч.-техн. конф., Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2025. С. 31. EDN AVRWIT.

15. Шабалин С.А. Неразрушающий контроль. М.: Изд-во МГТУ, 2010.

References

1. D'yakonov V.P. *MATLAB Simulink. Komp'yuternoye modelirovaniye* [MATLAB Simulink. Computer Modeling]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2018. 768 p. [in Russian].

2. Kuptsov B.B., Gorzunov A.S., Sarvarov A.S. Razrabotka metodiki tokovoy diagnostiki asinkhronnykh dvigateley po ostsillogrammam nestatsionarnykh rezhimov raboty [Development of Current Signature Analysis Technique to Detect Faults in Induction Motors by Oscillograms of Unsteady-State Machine Operation]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika» — Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2009, No. 34 (167), pp. 60-67. EDN: KZHOMB. [in Russian].

3. Petushkov M.Yu., Shcherbina D.V., Belousov O.S. Development of Methods for Improving Energy and Resource Efficiency of Electrical Equipment When Applying the Concept of Proactive Diagnosis. *Proceedings — 2018. 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018. 17.* 2018, pp. 1-5.

4. Seliverstov G.V., Antsev V.Yu., Voblikova Yu.O. Postroyeniye optimal'nogo algoritma diagnostirovaniya kranovykh metallokonstruktsiy [Construction of an Optimal Algorithm for Diagnosing Crane Metal Structures]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny — Construction and Road Machinery*, 2013, No. 7, pp. 23-24. EDN: XDNPVT. [in Russian].

5. Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Kuptsov V.V. Tokovaya diagnostika kak metod kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh dvigateley [Current Diagnostics as a Method of control of technical Condition of Asynchronous Motors]. *Materialy konferentsii «Rekonstruktsiya promyshlennykh predpriyatiy — proryvnyye tekhnologii v metallurgii i mashinostroyenii» v ramkakh III Mezhdunarodnogo promyshlennogo foruma. M-vo promyshlennosti i prirodnnykh resursov Chelyabinskoy oblasti* [Materials of the Conference «Reconstruction of Industrial Enterprises — Breakthrough Technologies in Metallurgy and Machine Building» in the framework of the III International Industrial Forum. Ministry of Industry and Natural Resources of Chelyabinsk

Region]. 2010, pp. 82-86. EDN: RUFZYD. [in Russian].

6. *GOST R 50030.5.2-2012 (MEK 60947-5-2:2007). Apparatura raspredeleniya i upravleniya nizkovol'tnaya. Chast' 5-2. Apparaty i kommutatsionnyye elementy tsepey upravleniya. Beskontaktnyye datchiki* [State Standard R 50030.5.2-2012 (MEK 60947-5-2:2007). Low-Voltage Switchgear and Controlgear. Part 5-2. Control Circuit Devices and switching Element. Proximity Switches. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 48 p. [in Russian].

7. Tropchenko A.Yu., Tropchenko A.A. *Tsifrovaya obrabotka signalov. Metody predvaritel'noy obrabotki* [Digital Signal Processing. Pre-Processing Methods]. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 2009. 100 p. [in Russian].

8. Kuptsov V.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. *Sovremennyye metody diagnostirovaniya asinkhronnykh dvigateley i ikh razvitiye* [Modern Methods of Diagnosing Asynchronous Motors and Their Development]. Magnitogorsk, MGTU Publ., 2010. 247 p. ISBN: 978-5-9967-0155-1. [in Russian].

9. Kuryachiy M.I. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Tomsk, Tomsk. gos. un-t sistem upr. i radioelektroniki, 2009. 189 p. ISBN 978-5-86889-286-8. [in Russian].

10. Luk'yanov S.I., Karandayev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khramshin V.R. Razrabotka i vnedreniye intellektual'nykh sistem diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektricheskogo oborudovaniya [The Development and Implementation of Intelligent Systems for Electrical Equipment State Diagnostics]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova — Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2014, No. 1 (45), pp. 129-136. EDN: RZPTTT. [in Russian].

11. *GOST 29329-92. Vesy kranovyye dlya staticheskogo vzveshivaniya. Obshchiye tekhnicheskkiye trebovaniya* [State Standard 29329-92. Balance for static weighing. General technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 1994. [in Russian].

12. Kovalenko Yu.P., Odintsov K.E., Nikiforov G.V., Mugalimov R.G. Metodika identifikatsii neispravnykh izmeritel'nykh priborov v promyshlennykh elektricheskikh setyakh [Detection Technique of Faulty Metering Instruments in Industrial Electric Networks]. *Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2017, No. 4 (37), pp. 45-52. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-4(37)-45-52. EDN: YMXFGI. [in Russian].

13. Birger I.A., Bolotin B.V., Makhutov N.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical Diagnostics]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 240 p. [in Russian].

14. Epov D.A. Issledovaniye vozmozhnosti diagnostirovaniya gruzopod'yemnykh mekhanizmov po magnitnomu polyu [Study of the Possibility of Diagnosing Lifting Mechanisms by Magnetic Field]. *Tezisy dokladov 83-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki*

i obrazovaniya», 21–25 aprelya 2025 goda [Abstracts of the 83rd International Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Modern Science, Technology and Education», 21–25 April, 2025]. Magnitogorsk, Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet im. G.I. Nosova, 2025, pp. 31. EDN AVRWIT. [in Russian].

15. Shabalin S.A. *Nerazrushayushchiy kontrol'* [Non-Destructive Testing]. Moscow, MGTU Publ., 2010. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 29.05.2025; одобрена после рецензирования 03.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.

The article was submitted 29.05.2025; approved after reviewing 03.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.

Научная статья

УДК 621.313.3

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-24-35

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

**Сергей Григорьевич Воронин****Sergey G. Voronin**

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Передовой инженерной школы «Моторы будущего»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Павел Олегович Шабуров****Pavel O. Shaburov**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты»
и кафедры «Электронные вычислительные машины»,
Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

**Надежда Юрьевна Кулёва****Nadezhda Yu. Kuleva**

кандидат технических наук, заместитель заведующего региональной молодежной
лаборатории электромеханических, электронных и электрохимических систем,
Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

**Николай Васильевич Клиначев****Nikolay V. Klinachev**

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Летательные аппараты»,
Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

Актуальность

В электроприводах на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) актуальным является вопрос расширения диапазона рабочих скоростей и моментов.

Цель исследования

Целью исследования является сравнительная оценка двух способов расширения диапазона рабочих скоростей и моментов: алгоритмического (путём регулирования вектора тока по продольной оси ротора) и схемного (путём изменения схемы подключения обмотки двигателя к преобразователю напряжения).

Ключевые слова

синхронный двигатель
с возбуждением
от постоянных магнитов,
вентильный
электродвигатель,
ток размагничивания
ротора, относительная
индуктивность обмотки,

Объекты исследования

Электродвигатель на основе СДПМ, предназначенный для работы в широком диапазоне скоростей и моментов.

Методы исследования

В работе применено математическое моделирование на основе модели вентильного двигателя с дискретной 120-градусной коммутацией. Модель получена путём решения дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в двигателе и позволяющих вычислить фазные токи для конкретных значений параметров, скорости и напряжения питания в абсолютных единицах.

Результаты

Исследование, проведённое на математических моделях привода, показало, что при больших значениях относительной индуктивности обмотки при векторном управлении удаётся теоретически неограниченно увеличивать скорость привода. Ограничением является увеличение частоты питания обмотки, ведущее к повышенным потерям в железе статора и полупроводниковых ключах преобразователя напряжения.

В результате исследования выявлено, что при малых значениях относительной индуктивности в режиме векторного управления с ростом скорости растут потери в активном сопротивлении обмотки от тока намагничивания, что приводит к снижению КПД. Поэтому здесь более рациональным может оказаться способ расширения скоростного диапазона путём переключения схемы обмотки. В статье приводится схемное решение для реализации такого способа.

схема соединения обмотки, скорость идеального холостого хода, КПД привода

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Челябинской области за счет гранта в форме субсидии № 184/3 от 25.12.2024 на создание региональной молодежной лаборатории.

Для цитирования: Воронин С. Г., Шабуров П. О., Кулёва Н. Ю., Клиначев Н. В. Оценка возможности и эффективности расширения рабочего диапазона электроприводов на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 24–35. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-24-35>.

Original article

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY AND EFFECTIVENESS OF EXTENDING THE OPERATING RANGE OF SPDM-BASED ELECTRIC DRIVES

Relevance

In electric drives based on permanent magnet synchronous motors (PMSM), the issue of expanding the range of operating speeds and torques is relevant.

Aim of research

Aim of research is to compare two ways to expand this range: algorithmically, by adjusting the current vector along the longitudinal axis of the rotor, and schematically, by changing the connection scheme of the motor winding to the voltage converter.

Keywords

synchronous motor with permanent magnet excitation, valve electric motor, rotor demagnetization current, relative inductance of the winding,

Research objects

An electric motor based on PMSM, designed to operate in a wide range of speeds and torques.

Research methods

The paper uses mathematical modeling based on a model of a fan motor with discrete 120-degree switching. The model is obtained by solving differential equations describing electromagnetic processes in the engine and allowing calculating phase currents for specific values of parameters, speed and supply voltage in absolute units.

Results

A study conducted on mathematical models of the drive has shown that with large values of the relative inductance of the winding, with vector control, it is theoretically possible to increase the speed of the drive indefinitely. The limitation is an increase in the frequency of the winding supply, leading to increased losses in the stator iron and semiconductor switches of the voltage converter.

As a result of the study, it was found that with low values of relative inductance in vector control mode, losses in the active resistance of the winding from the magnetization current increase with increasing speed, which leads to a decrease in efficiency. Therefore, a method of expanding the speed range by switching the winding circuit may be more rational here. The article provides a schematic solution for implementing this method.

winding connection scheme, ideal stroke speed, drive efficiency

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Chelyabinsk Region through a grant in the form of subsidy No. 184/3 dated December 25, 2024 for the creation of a Regional Youth Laboratory.

For citation: Voronin S. G., Shaburov P. O., Kuleva N. Yu., Klinachev N. V. Otsenka vozmozhnosti i effektivnosti rasshireniya rabochego diapazona elektroprivodov na osnove sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Assessment of the Possibility and Effectiveness of Extending the Operating Range of Spdm-Based Electric Drives]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 24–35 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-24-35>.

Постановка задачи исследования

При использовании в составе электроприводов синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) часто возникает проблема обеспечения заданного диапазона скоростей и моментов. Это обусловлено тем, что для повышения скорости холостого хода двигателя необходимо снижать индукцию в зазоре, а для повышения пускового момента необходимо её повышать. Для того чтобы расширить рабочий диапазон привода используют различные мероприятия алгоритмического и схемного характеров. К первым можно отнести алгоритмы, построенные на основе векторного управления, путём регулирования тока по продольной оси ротора (i_d)

так, чтобы скорость двигателя могла превышать скорость идеального холостого хода [1–7]. Второй путь предполагает переключение схем соединения обмотки двигателя так, чтобы на низких скоростях вращения двигателя получить большее потокосцепление обмотки с магнитами, а при большой скорости его уменьшить [8]. Схемы с переключением обмотки наиболее распространены в электроприводах на основе вентильных двигателей (ВД) с дискретной коммутацией фаз.

Оба способа расширения скоростного диапазона предполагают, что на высокой скорости вращения двигателя требуется меньший момент. В частности, такой вид имеет механическая характеристика

нагрузки при постоянной мощности, характерная для транспортных средств, когда произведение момента на скорость есть величина постоянная. До последнего времени сравнительная оценка различных способов расширения скоростного диапазона привода, с точки зрения энергетических показателей, выполненная применительно к одним и тем же исполнительным двигателям в одинаковом диапазоне скоростей и моментов, не проводилась. Поэтому трудно объективно судить о сравнительных преимуществах и недостатках того или иного из них. В настоящей статье такая работа выполнена и сформулированы рекомендации по выбору способа расширения скоростного диапазона в соответствии с параметрами двигателя.

Математическое описание привода при векторном управлении

Сравнительную оценку будем проводить на основе двух СДПМ, имеющих существенное отличие по параметрам. Один двигатель (ДВМ-100) сравнительно небольшой мощности с большим значением активного сопротивления обмотки (строка 1 таблицы 1). Второй двигатель (РМ-60) мощнее и имеет малое сопротивление обмотки (строка 2 таблицы 1). В таблице 1 обозначено: P_n — номинальная мощность; M_n — номинальный момент двигателя; U_n — напряжение источника постоянного тока; ω_n — номинальная скорость вращения ротора; k_f — коэффициент связи между амплитудой фазной ЭДС и скоростью вращения ротора двигателя;

r — активное сопротивление фазной обмотки; L — индуктивность фазной обмотки; p — число пар полюсов ротора.

Расчёт механических характеристик и электромагнитного КПД привода будем осуществлять на основе уравнений для токов по продольной и поперечной осям двигателя [9]. Для удобства сравнения характеристик двигателей, имеющих существенное различие по параметрам и мощностям, запишем эти уравнения в относительных единицах [10] в виде:

$$i_d = \frac{u(\xi v \cos \theta - \sin \theta) - v^2 \xi}{1 + (v \xi)^2}, \quad (1)$$

$$i_q = \frac{u(\cos \theta + \xi v \sin \theta) - v}{1 + (v \xi)^2}. \quad (2)$$

В уравнениях обозначено:

i_d, i_q — относительные значения токов по осям d и q соответственно;

v — относительное значение скорости двигателя, которая определяется по выражению $v = \omega / \omega_0$;

ξ — относительная индуктивность фазной обмотки двигателя, которая определяется по выражению $\xi = L p \omega_0 / r$;

ω_0 — скорость, при которой амплитуда фазной ЭДС равняется амплитуде номинального фазного напряжения, определяется по выражению $\omega_0 = U_n / k_f$;

амплитуда номинального фазного напряжения связана с напряжением источника постоянного тока соотношением $U_n = U_n / 3^{0.5}$;

$u = U / U_n$ — относительное значение амплитуды фазного напряжения при его регулировании;

θ — угол коммутации.

Таблица 1. Паспортные данные исследуемых двигателей

Table 1. Passport data of the investigated engines

Тип	P_n	M_n	U_n	ω_n	k_f	r	L	p
	Вт	Нм	В	с-1	Вб	Ом	Гн	—
ДВМ-100	350	5	48	70	0,29	0,375	0,0015	13
РМ-60	60 000	130	500	430	0,58	0,015	0,0003	6

Относительный электромагнитный момент двигателя равен току по поперечной оси ($\mu = i_q$), относительная электромагнитная мощность определяется выражением $p_s = v i_q$, а относительная потребляемая мощность по выражению [9]:

$$p = u \cdot (i_q \cos \theta - i_d \sin \theta). \quad (3)$$

Для расширения рабочего диапазона скоростей и моментов в процессе управления будем изменять ток по продольной оси двигателя таким образом, чтобы обеспечить максимальную для каждого заданного значения скорости величину электромагнитного момента. Как известно [9], для этого необходимо обеспечивать во всём диапазоне работы величину угла коммутации в соответствии с выражением:

$$\theta = \arctg \xi v. \quad (4)$$

Теперь мы можем рассчитать механические характеристики и КПД привода в процессе векторного управления. Расчёт проведём для номинального напряжения ($u = 1$). Прежде всего, по приведённой выше формуле с представленными в таблице параметрами двигателей выполним расчёт относительной индуктивности. В результате получим: для двигателя ДВМ-100 — $\xi \approx 1$; для двигателя РМ-60 — $\xi \approx 60$. Кроме того, для оценки

изменения вида характеристик в зависимости от относительной индуктивности ξ проведём расчёты также для некоторого абстрактного двигателя с $\xi = 5$.

Для расчёта электромагнитного момента воспользуемся выражением (2), а для расчёта КПД следующим выражением [9]:

$$\eta = \frac{i_q v}{i_q \cos \theta - i_d \sin \theta}. \quad (5)$$

Результаты расчёта представлены в таблице 2 и на рисунках 1 и 2 в виде графиков, отражающих зависимости $v = f_1(\mu)$, $\eta = f_2(v)$, $i_d = f_3(v)$, $\theta = f_4(v)$.

Анализ результатов расчёта энергетических характеристик и КПД привода при векторном управлении

Анализируя результаты расчёта, приведённые в таблице 2 и на рисунках 1 и 2, можно отметить, что использование тока размагничивания при векторном управлении для расширения диапазона рабочих скоростей при большой относительной индуктивности обмотки оказывается весьма эффективным как с точки зрения расширения рабочего диапазона привода, так и с точки зрения обеспечения высоких энергетических показателей в процессе регулирования. При этом

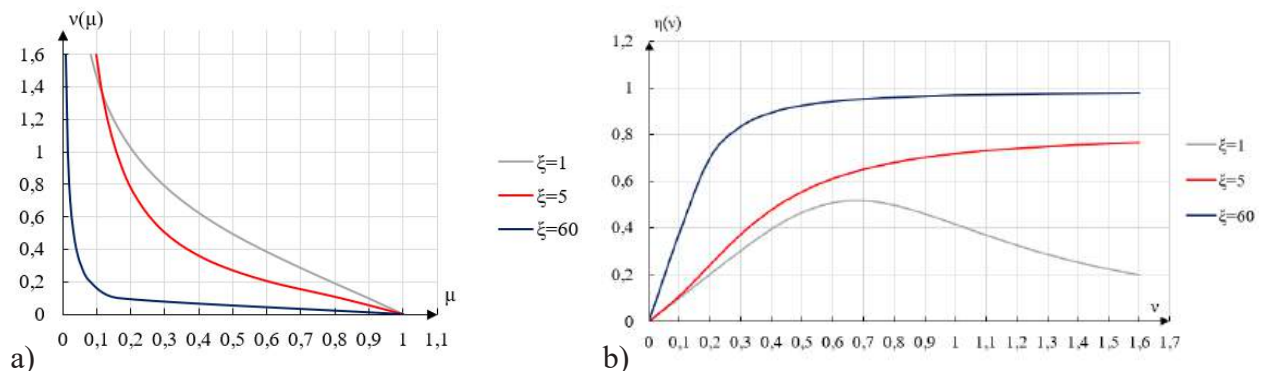


Рисунок 1. Характеристики привода при векторном управлении: механические характеристики $v(\mu)$ (a); зависимость КПД от скорости $\eta(v)$ (b)

Figure 1. Characteristics of the drive with vector control: mechanical characteristics $v(\mu)$ (a); dependence of efficiency on speed $\eta(v)$ (b)

Таблица 2. Взаимная зависимость КПД от управляющих (θ , i_d) и входных (v , i_q) координат привода

Table 2. Mutual dependence of efficiency on the control (θ , i_d) and input (v , i_q) coordinates of the drive

ξ	v	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
1	θ_1	0	0,100	0,192	0,291	0,381	0,464	0,540	0,611	0,675
	i_{d_1}	0	-0,010	-0,038	-0,083	-0,138	-0,200	-0,265	-0,329	-0,390
	i_{q_1}	1	0,896	0,788	0,683	0,584	0,494	0,416	0,349	0,293
	η_1	0	0,100	0,202	0,302	0,394	0,465	0,506	0,515	0,496
5	θ_5	0	0,464	0,785	0,983	1,107	1,190	1,249	1,292	1,326
	i_{d_5}	0	-0,040	-0,100	-0,138	-0,160	-0,172	-0,180	-0,185	-0,188
	i_{q_5}	1	0,814	0,607	0,462	0,367	0,302	0,256	0,222	0,195
	η_5	0	0,109	0,243	0,373	0,478	0,555	0,611	0,651	0,680
60	θ_{60}	0	1,406	1,488	1,515	1,529	1,537	1,543	1,547	1,550
	i_{d_60}	0	-0,016	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017
	i_{q_60}	1	0,162	0,082	0,055	0,041	0,033	0,027	0,023	0,020
	η_{60}	0	0,380	0,702	0,834	0,893	0,924	0,941	0,952	0,959
ξ	v	0	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
1	θ_1	0	0,733	0,785	0,833	0,876	0,915	0,951	0,983	1,012
	i_{d_1}	0	-0,448	-0,500	-0,548	-0,590	-0,628	-0,662	-0,692	-0,719
	i_{q_1}	1	0,246	0,207	0,175	0,148	0,126	0,108	0,093	0,081
	η_1	0	0,459	0,414	0,368	0,325	0,286	0,252	0,223	0,198
5	θ_5	0	1,352	1,373	1,391	1,406	1,418	1,429	1,438	1,446
	i_{d_5}	0	-0,191	-0,192	-0,194	-0,195	-0,195	-0,196	-0,197	-0,197
	i_{q_5}	1	0,175	0,158	0,144	0,132	0,122	0,113	0,106	0,099
	η_5	0	0,702	0,718	0,731	0,741	0,749	0,756	0,761	0,766
60	θ_{60}	0	1,552	1,554	1,556	1,557	1,558	1,559	1,560	1,560
	i_{d_60}	0	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017
	i_{q_60}	1	0,018	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010
	η_{60}	0	0,964	0,968	0,970	0,972	0,974	0,975	0,976	0,977

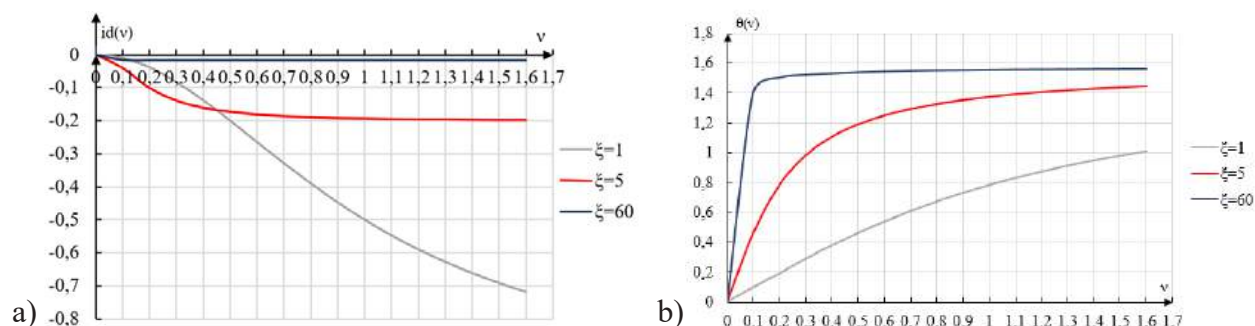


Рисунок 2. Зависимости тока размагничивания и угла коммутации от скорости привода: зависимости тока размагничивания $i_d(v)$ (а); зависимости угла коммутации $\theta(v)$ (б)

Figure 2. Dependences of the demagnetizing current and the commutation angle on the drive speed: dependence of the demagnetizing current $i_d(v)$ (a); dependence of the commutation angle $\theta(v)$ (b)

увеличить скорость двигателя можно в несколько раз. Ограничения здесь будут только технические — из-за сложности обеспечения высокой частоты питания двигателя и увеличения потерь в его магнитной системе. По мере приближения скорости привода к значению $v = 1$ и превышения её значение угла θ асимптотически приближается к $\pi/2$. Что касается тока i_d , то ранее [10, 11] было показано, что его относительное значение по мере роста скорости приближается к значению, определяемому соотношением $i_d = -1/\xi$. Чем больше ξ , тем лучше выполняется указанное соотношение.

Можно отметить интересный факт, что согласно данным таблицы 2 произведение относительного момента на относительную скорость, т.е. относительная электромагнитная мощность привода по мере роста скорости и при достаточно большом значении ξ приблизительно определяется соотношением:

$$P_{max} = v\mu \approx \frac{u}{\xi}. \quad (6)$$

Расчёты показали, что даже при $\xi = 5$ соотношение (6) приблизительно выполняется.

Это легко подтвердить аналитически. Выражение (2), учитывая, что $i_q = \mu$ при v , приближающемся к единице, и достаточно большом ξ , когда для получения максимума момента θ стремится к $\pi/2$, можно переписать в виде:

$$i_q = \mu \approx \frac{uv\xi - v}{1 + (v\xi)^2} = \frac{v(u\xi - 1)}{1 + (v\xi)^2}. \quad (7)$$

Более того, предполагая, что произведение $v\xi$ и $u\xi$ в выражении (7) много больше единицы, что мы имеем в рассматриваемых примерах, это выражение можно переписать в виде:

$$\mu \approx \frac{uv\xi}{(v\xi)^2} = \frac{u}{v\xi}. \quad (8)$$

Умножая обе части выражения (8) на v , получим выражение (6). Таким образом, выражение (4) при достаточно больших

значениях относительной индуктивности может служить для приближённой оценки максимальной мощности, физически развиваемой приводом. Например, для двигателя РМ -60 максимальная развиваемая мощность при номинальном напряжении составляет:

$$P_{max} = P_{max} \cdot P_6 = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{U_a^2}{r} = \\ = \frac{1}{60} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{290^2}{0,015} = 140 \text{ кВт},$$

а для двигателя ДВМ-100 имеем $P_{max} \approx 600 \text{ Вт}$.

По кривым рисунка 1, *b* можно также заключить, что чем меньше относительная индуктивность обмотки, тем ниже электромагнитный КПД в процессе векторного управления. Наконец, при малом значении относительной индуктивности (в рассматриваемом примере $\xi = 1$), как это следует из рисунка 1, *a*, расширение рабочего диапазона привода путём регулирования током размагничивания также возможно, однако при превышении двигателем скорости холостого хода КПД двигателя падает (рисунок 1, *b*). Это объясняется тем, что в указанных двигателях величина активного сопротивления обмотки оказывается соизмеримой или даже больше величины индуктивного сопротивления. Поэтому при возрастании тока i_d возрастают электрические потери в обмотке, что и ведёт к снижению КПД. Следовательно, использование такого метода в данном случае неэффективно. В связи с этим рассмотрим возможность расширения рабочего диапазона при малых ξ путём переключения схемы соединения обмотки.

Математическое описание и расчёт характеристик привода при дискретной коммутации фазной обмотки

Как правило, небольшие значения относительной индуктивности имеют двигатели малой мощности, для которых

распространён режим вентильного двигателя с дискретной коммутацией обмотки [12]. Поэтому рассмотрим возможность расширения рабочего диапазона для такого привода путём переключения схемы соединения обмотки [8]. Привод содержит два трёхфазных инвертора и дополнительный силовой ключ (рисунок 3). На низкой скорости вращения двигателя у второго инвертора (И2) верхние ключи (VT 2.1, VT 2.3, VT 2.5) и дополнительный ключ VT7 постоянно закрыты, а нижние ключи (VT2.2, VT2.4, VT2.6) постоянно открыты. В результате оказывается, что концы фазных обмоток двигателя соединены, а начала обмоток подключены к выходу первого трёхфазного инвертора (И1). С помощью него мы можем организовать дискретную 120-градусную коммутацию обмотки, обеспечивающую лучшие энергетические показатели [13]. После того, как скорость двигателя достигнет предельного для такой схемы значения, мы можем изменить алгоритм коммутации ключей, реализуя на основе каждой

обмотки однофазный режим работы. Для этого достаточно открыть ключ VT7 и например для фазы «а» в течение углового интервала 120 эл. градусов осуществлять одновременное включение ключей VT1.5-VT2.2, затем закрыть их и после паузы в 60 эл. градусов открыть пару ключей VT1.6-VT2.1. Со сдвигом в 120 эл. градусов аналогично осуществляется коммутация ключей в фазах «b» и «с». Таким образом, мы получим три параллельно работающих однофазных двигателя со 120-градусной коммутацией ключей, рабочие интервалы которых также сдвинуты на 120 градусов. Дополнительно к возможности расширения рабочего диапазона привода указанная схема позволяет при малых скоростях вращения, когда обмотка соединена в звезду, обеспечить заданное значение момента при относительно небольшом токе. Кроме того, она позволяет повысить живучесть привода в целом, используя аварийные алгоритмы коммутации силовых ключей, исключающие работу вышедших из строя ключей.

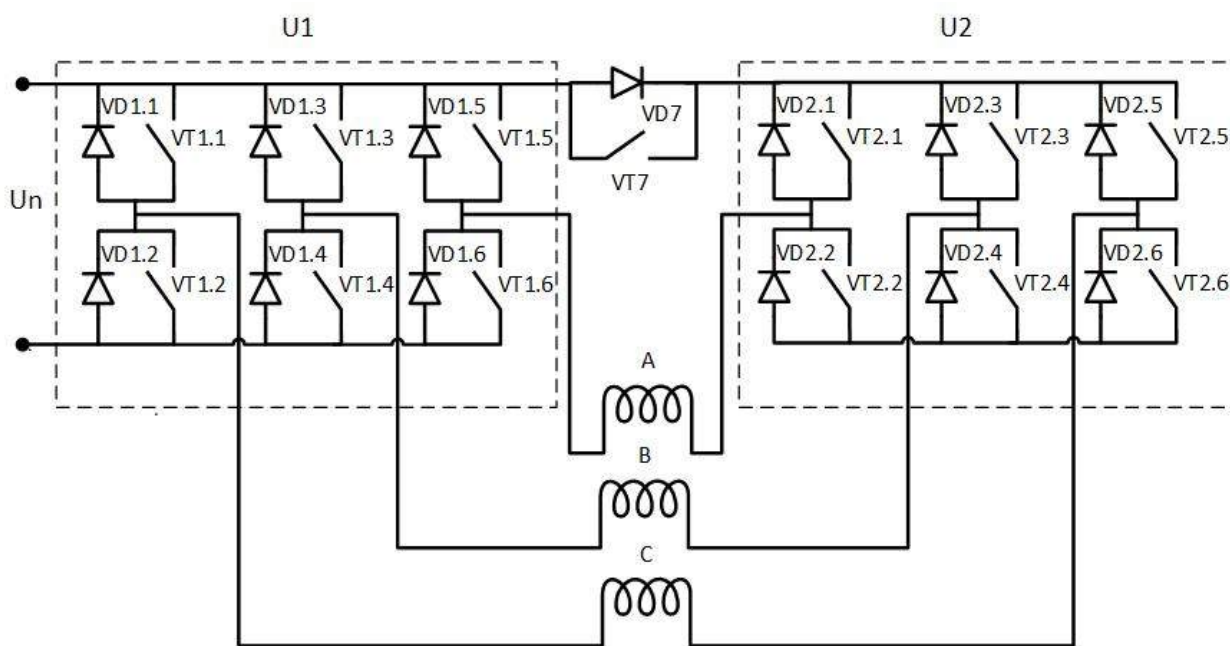


Рисунок 3. Схема ВД с дискретной коммутацией обмотки и возможностью переключения с трёхфазного на однофазный режим

Figure 3. Schematic diagram of a valve motor with discrete winding commutation and the ability to switch from three-phase to single-phase mode

Как известно, при дискретной коммутации обмотки мы не можем получить общих удобных для анализа характеристик привода соотношений. Поэтому придётся использовать численные методы расчёта с конкретными значениями параметров двигателя. Для этого воспользуемся математической моделью вентильного двигателя при дискретной 120-градусной коммутации [12, 13]. Указанная модель получена путём решения дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в двигателе и позволяющих вычислить фазные токи для конкретных значений параметров, скорости и напряжения питания в абсолютных единицах. Для численных расчётов выбран тот же двигатель ДВМ-100, на котором анализировался режим векторного управления. При переходе к относительным единицам для удобства сравнительного анализа были взяты такие же значения базовой мощности, момента и скорости, как и в случае синусоидального напряжения. Следовательно, использованы те же значения относительной индуктивности ξ . В отличие от рассмотренного выше режима векторного управления в данном случае мы работаем с неизменным зна-

чением угла коммутации, принимая во всём диапазоне скоростей $\theta = 0$, так как при этом согласно (5) обеспечивается максимальное значение электромагнитного КПД. Результаты расчёта представлены на графиках (рисунок 4).

Анализ результатов расчёта механических характеристик и КПД привода при переключении обмоток

При нейтральной дискретной коммутации обмотки скорость двигателя не превысит скорости идеального холостого хода, при которой ЭДС на концах, подключённых к источнику постоянного напряжения фаз, будет равна этому напряжению. В случае соединения обмотки в звезду амплитуда ЭДС двигателя в $\sqrt{3}$ раз больше амплитуды фазной ЭДС. Таким образом, при дискретной нейтральной коммутации в случае соединения обмотки в звезду относительная скорость двигателя не может превышать единицы, что мы видим на рисунке 4, а. Для увеличения скорости двигателя мы осуществляем переключение коммутатора так, чтобы обеспечилось однофазное питание каждой обмотки. Тогда относительная скорость вращения

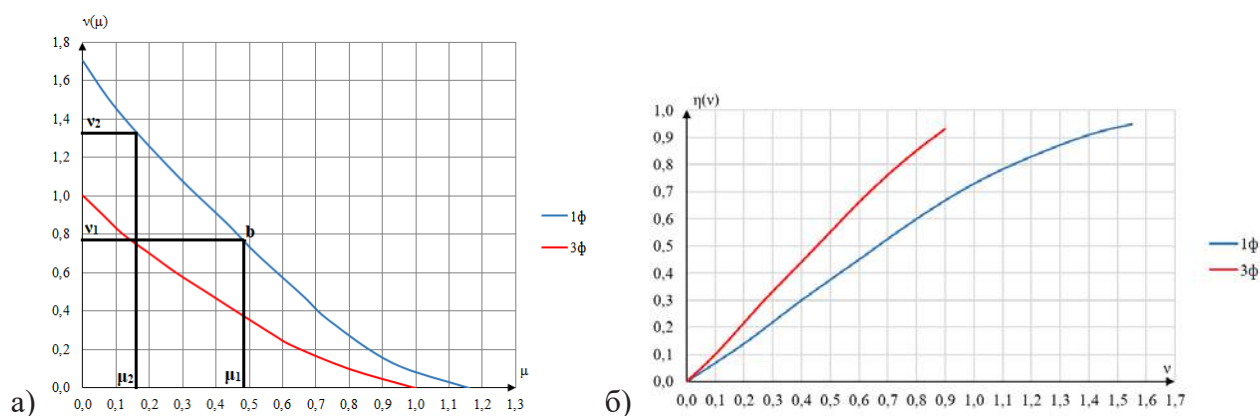


Рисунок 4. Механические характеристик и энергетические показатели привода в режиме вентильного двигателя: механические характеристики (а); энергетические показатели (б)

Figure 4. Mechanical characteristics and energy indicators of the drive in the valve motor mode: mechanical characteristics (a); energy indicators (b)

ротора двигателя для принятой системы базовых единиц может достигнуть значения $\sqrt{3}$, что мы видим на этом же рисунке.

Переход в однофазный режим позволяет увеличить развиваемый двигателем момент (рисунок 4, а). Однако здесь вступают в силу тепловые ограничения и ограничения, обусловленные параметрами силовых ключей. В связи с этим, на низких скоростях вращения ротора пока момент, развиваемый двигателем в трёхфазном режиме, выше заданного (μ_1), мы осуществляем работу в трёхфазном режиме. Только когда, при увеличении скорости вращения до значения v_1 момента оказывается недостаточно, мы переходим в однофазный режим, при котором на этой скорости обеспечивается момент μ_2 , а момент μ_1 может быть обеспечен при скорости v_2 примерно в полтора раза большей v_1 . За счёт этого нам удаётся не только расширить рабочий диапазон привода, но и работать на низких скоростях вращения с меньшими, чем при векторном управлении токами и более высоким КПД (рисунок 4, б).

Выводы

При больших значениях относительной индуктивности двигателя ($\xi \geq 5$) путём регулирования тока i_d удаётся расширить скоростной диапазон привода. При этом ограничения развиваемой скорости будут обусловлены только ростом

дополнительных потерь в магнитной системе двигателя и допустимой частотой работы силовых ключей.

Чем выше относительная индуктивность обмотки двигателя, тем выше его КПД в процессе векторного управления. При значениях относительной индуктивности ниже $\xi \approx 5$ векторное регулирование скорости привода оказывается неэффективным из-за падения КПД двигателя, при достижении и превышении им скорости идеального холостого хода.

При малых значениях относительной индуктивности обмотки двигателя ($\xi \leq 5$) для расширения скоростного диапазона привода эффективным оказывается использование для управления двигателем дискретной нейтральной коммутации с переключением схемы соединения обмотки по мере роста скорости с трёхфазного на однофазный режим. При этом обеспечиваются более высокие значения КПД двигателя, чем в случае решения той же задачи путём векторного управления. Более того, при $\xi \leq 1$ увеличить скорость двигателя выше скорости идеального холостого хода путём векторного управления не удаётся.

Относительная максимальная электромагнитная мощность, развиваемая двигателем, для принятой в статье системы базовых единиц, приближённо определяется простым соотношением $p \approx 1/\xi$.

Список источников

1. Бербиренков И.А., Лохнин В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 4. С. 148-150. EDN: NUPWIL.
2. Громышева А.Д., Овчинников И.Е., Егоров А.В. Управление скоростью и моментом вентильного двигателя в приводе транспортного средства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 3 (73). С. 43-52. EDN: NRAJUZ.

3. Рефки А., Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Микропроцессорная система прямого управления моментом электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 6. С. 62-66. EDN: ООHCJD.
4. Сизякин А., Румянцев М. Управление вентильными электродвигателями на базе системы iMotion компании International Rectifier // Силовая электроника. 2012. № 2. С. 38-43. EDN: OQNCJF.
5. Кэмпбелл-Келли М., Кроаркен М., Робсон Э. История математических таблиц от

Шумера до электронных таблиц. Нью-Йорк, США: Издательство Оксфордского университета, 2003.

6. Векторное управление двигателем // Инженерные решения. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector> (дата обращения: 25.09.2025).

7. Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиёв С.Н. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2011. Т. 319, № 4. С. 93-99. EDN: OJXQYX.

8. Воронин С.Г., Клиначев Н.В., Кулёва Н.Ю. Векторное управление электроприводом на основе вентильного двигателя с дискретной коммутацией обмотки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22. № 3. С. 52-61. DOI: 10.14529/power220405. EDN: BPЕEYA.

9. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1988. 479 с.

10. Воронин С.Г., Курносков Д.А. Сравнительная оценка способов питания СДПМ в режиме вентильного двигателя // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22. № 3. С. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.14529/power-220306>.

11. Воронин С.Г., Шабуров П.О., Кулёва Н.Ю., Клиначев Н.В., Чулкова П.Д. Расширение реализуемого диапазона механических координат электроприводов на основе синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21. № 2. С. 21-30. DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-21-30. EDN: NGHJLS.

12. Шабуров П.О., Кулёва Н.Ю., Соргин А.И., Ерпалов А.В. Математическая модель трехфазного вентильного двигателя с несинусоидальной формой ЭДС вращения при 120-градусной коммутации // Электротехнические комплексы и системы: матер. I Всеросс. конф. по электрическим машинам в рамках Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Уфа, 2022. Т. 2. С. 714-725. EDN: IYSPDS.

13. Пат. 2790625 РФ, МПК Н 02 Р 6/08, Н 02 Р 25/18. Способ и устройство для расширения скоростного диапазона и обеспечения живучести трёхфазного вентильного электродвигателя / П.О. Шабуров, С.Г. Воронин, Н.Ю. Кулёва, Р.А. Закиров, М.В. Федулов, И.В. Сунгуров,

А.В. Харлов. 2022129611, Заявлено 15.11.2022; Опубл. 28.02.2023. Бюл. 7.

References

1. Berbirenkov I.A., Lokhnin V.V. Tyagovyye dvigateli na postoyannyykh magnitakh v elektroprivode elektromobilya [Traction Motors on Permanent Magnets in an Electric Vehicle Drive]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Proceedings of Tomsk Polytechnic University*, 2011, Vol. 318, No. 4, pp. 148-150. EDN: NUPWIL. [in Russian].

2. Gromysheva A.D., Ovchinnikov I.Ye., Yegorov A.V. Upravleniye skorost'yu i momentom ventil'nogo dvigatelya v privode transportnogo sredstva [Speed and Torque Control of Gate Motor in Vehicle Drive Gear]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki — Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, No. 3 (73), pp. 43-52. EDN: NRAJUZ. [in Russian].

3. Refki A., Karakulov A.S., Dement'yev Yu.N., Kladiyev S.N. Mikroprotsessornaya sistema pryamogo upravleniya momentom elektropriwodov na baze sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Microprocessor-Based Direct Control System for Electric Drives Based on a Synchronous Motor with Permanent Magnets]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika — Izvestiya vuzov. Electromechanics*, 2011, No. 6, pp. 62-66. EDN: OOHJCD. [in Russian].

4. Sizyakin A., Rummyantsev M. Upravleniye ventil'nymi elektrodvigateleyami na baze sistemy iMotion kompanii International Rectifier. [Control of Valve Electric Motors Based on the iMotion System of the International Rectifier Company]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2012, No. 2, pp. 38-43. EDN: OQNCJF. [in Russian].

5. Kempbell-Kelli M., Kroarken M., Robson E. *Istoriya matematicheskikh tablits ot Shumera do elektronnykh tablits* [The History of Mathematical Tables from Sumer to Spreadsheets]. 1st ed. New York, USA: Oxford University Press, 2003. [in Russian].

6. Vektornoye upravleniye dvigatelem [Vector Motor Control]. *Inzhenernyye resheniya — Engineering Solutions*. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector> (accessed 25.09.2025). [in Russian].

7. Karakulov A.S., Dement'yev Yu.N., Kladiyev S.N. Sravnitel'nyy analiz vektornogo upravleniya i pryamogo upravleniya momentom sinkhronnogo elektrodvigateleya s postoyannymi magnitami [Comparative Analysis of Vector

Control and Direct Torque Control of a Synchronous Electric Motor with Permanent Magnets]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 2020, Vol. 319, No. 4, pp. 93-99. EDN: OJXQYX. [in Russian].

8. Voronin S.G., Klinachev N.V., Kulova N.Yu. Vektornoye upravleniye elektroprivodom na osnove ventil'nogo dvigatelya s diskretnoy kommutatsiyey obmotki [Vector Control of an Electric Drive Based on a Thyatron Motor with Discrete Winding Commutation]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika — Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2022, Vol. 22, No. 3, pp. 52-61. DOI: 10.14529/power220405. EDN: BPEEYA. [in Russian].

9. Yuferov F.M. *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv* [Electric Machines of Automatic Devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 479 p. [in Russian].

10. Voronin S.G., Kurnosov D.A. Sravnitel'naya otsenka sposobov pitaniya SDPM v rezhime ventil'nogo dvigatelya [Comparative Evaluation of the Methods of Powering the PMSM in a Thyatron Motor Mode]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika — Bulletin of the South Ural State University Series «Power Engineering»*, 2022, Vol. 22, No. 3, pp. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.14529/power220306>. [in Russian].

11. Voronin S.G., Shaburov P.O., Kulova N.Yu., Klinachev N.V., Chulkova P.D. Rasshireniye realizuyemogo diapazona mekhanicheskikh

koordinat elektroprivodov na osnove sinkhronnykh dvigateley s возбуждением от постоянных магнитов [Expansion of the Realized Range of Mechanical Coordinates of Electric Drives Based on Synchronous Motors Excited by Permanent Magnets]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, Vol. 21, No. 2, pp. 21-30. DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-21-30. EDN: NGHJLS. [in Russian].

12. Shaburov P.O., Kulova N.Yu., Sorgin A.I., Yerpalov A.V. Matematicheskaya model' trekhfaznogo ventil'nogo dvigatelya s nesinusoidal'noy formoy EDS vrashcheniya pri 120-gradusnoy kommutatsii [Mathematical Model of a Valve Motor with an Arbitrary EMF Shape]. *Materialy I Vserossiyskoy konferentsii po elektricheskim mashinam «Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy» v ramkakh Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: V 2 t.* [Proceedings of the I All-Russian Conference on Electrical Machines «Electrotechnical Complexes and Systems» within the Framework of the International Scientific and Practical Conference: In 2 Vol.]. Ufa, 2022, Vol. 2, pp. 714-725. EDN: IYSPDS. [in Russian].

13. Shaburov P.O., Voronin S.G., Kulova N.Yu., Zakirov R.A., Fedulov M.V., Sungurov I.V., Kharlov A.V. *Sposob i ustroystvo dlya rasshireniya skorostnogo diapazona i obespecheniya zhivuchesti trokhfaznogo ventil'nogo elektrodvigatelya* [Method and Device for Extending the Speed Range and Ensuring the Survivability of a Three-Phase Motor Valve]. Patent RF, No. 2790625, 2023. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 05.09.2025; одобрена после рецензирования 19.09.2025; принята к публикации 26.09.2025.

The article was submitted 05.09.2025; approved after reviewing 19.09.2025; accepted for publication 26.09.2025.

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-36-45

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ СХЕМОЙ



Артур Валерьевич Махиянов

Arthur V. Makhiyanov

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



Роберт Радикович Саттаров

Robert R. Sattarov

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

Актуальность

Высокие скорости ветра создают серьезные технические проблемы для ветроэнергетических установок. При превышении номинальных значений традиционные системы вынуждены переходить в режим торможения или остановки для предотвращения повреждений оборудования. Это приводит к ситуации, когда наибольший энергетический потенциал ветра остается неиспользованным в периоды максимальной интенсивности. Колебания выходной мощности затрудняют интеграцию ветровой энергии в общую энергосистему, требуя дополнительных решений по стабилизации.

Проблема усугубляется неспособностью стандартных генераторов адаптироваться к экстремальным режимам. Мощность, возрастающая пропорционально кубу скорости ветра, вызывает критические перегрузки в системе передачи энергии. Отсутствие адаптивных систем регулирования приводит к использованию механического торможения, снижающего надежность и увеличивающего эксплуатационные расходы. Эти ограничения подчеркивают необходимость разработки решений, обеспечивающих стабильную работу в широком диапазоне ветровых скоростей.

Цель исследования

Исследовать возможность стабилизации выходного напряжения при высоких скоростях ветра в ветроэнергетической установке с реконфигурируемой выпрямительной схемой.

Ключевые слова

энергоэффективность,
возобновляемые
источники энергии,
ветроэнергетика,
ветроэнергетическая
установка,
магнитоэлектрический
генератор

Методы исследования

Моделирование режимов работы при высоких и нормальных скоростях ветра ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой в пакете прикладных программ Matlab (Simulink).

Результаты

Было проведено исследование режимов работы при высоких и нормальных скоростях ветра ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой в пакете прикладных программ Matlab (Simulink). Подобный метод регулирования напряжения может обеспечить возможность стабилизировать напряжение и сохранять высокую эффективность на приемлемом уровне в более широком диапазоне высоких и нормальных скоростей ветра.

Для цитирования: Махиянов А. В., Саттаров Р. Р. Имитационное моделирование ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 36–45. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-36-45>.

Original article

SIMULATION MODELING OF A WIND ENERGY INSTALLATION WITH A RECONFIGURABLE RECTIFIER CIRCUIT

Relevance

High wind speeds pose significant technical challenges for wind power installations. When wind speeds exceed rated values, conventional systems are forced to switch to a braking or shutdown mode to prevent equipment damage. This results in a situation where the greatest energy potential of the wind remains untapped during periods of maximum intensity. Fluctuations in output power complicate the integration of wind energy into the main power grid, necessitating additional stabilization solutions.

The problem is exacerbated by the inability of standard generators to adapt to extreme operating conditions. The power, which increases proportionally to the cube of the wind speed, causes critical overloads in the power transmission system. The lack of adaptive control systems leads to the use of mechanical braking, which reduces reliability and increases operational costs. These limitations highlight the need for developing solutions that ensure stable operation across a wide range of wind speeds.

Aim of research

To investigate the possibility of output voltage stabilization at high wind speeds in a wind energy installation with a reconfigurable rectifier circuit.

Research methods

Simulation of operating modes at high and normal wind speeds for a wind energy installation with a reconfigurable rectifier circuit using the Matlab (Simulink) software package.

Results

A study of operating modes at high and normal wind speeds was conducted for a wind energy installation with a reconfigurable rectifier circuit using the Matlab (Simulink) software package. This voltage regulation method can provide voltage stabilization capability while maintaining high efficiency at an acceptable level across a wider range of high and normal wind speeds.

Keywords

energy efficiency, renewable energy sources, wind power, wind power installation, permanent magnet generator

For citation: Makhyanov A. V., Sattarov R. R. Imitatsionnoye modelirovaniye vetroenergeticheskoy ustanovki s rekonfiguriruyemoy vypryamitel'noy skhemoy [Simulation Modeling of a Wind Energy Installation with a Reconfigurable Rectifier Circuit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 36–45 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-36-45>.

Развитие ветроэнергетики является ключевым направлением в структуре возобновляемой энергетики в мировом масштабе [1]. Особую актуальность для России данное направление приобретает в связи с наличием обширных территорий с благоприятными ветровыми условиями, но недостаточно развитой инфраструктурой. Согласно Программе Министерства энергетики РФ [2], технический потенциал ветровой энергии в России оценивается в более чем 80000 ТВт·ч/год, при этом используется менее 1 % от этого потенциала.

Особую актуальность приобретает проблема работы ветроустановок в условиях высоких скоростей ветра, характерных для прибрежных зон Дальнего Востока, Арктического побережья и горных районов Юга России [3]. Анализ показывает, что в этих регионах среднегодовая скорость ветра часто превышает 8–10 м/с, что требует специальных технических решений для стабилизации выходных параметров [4].

Для Российской Федерации данная проблема имеет особое значение в свете реализации государственной программы по развитию возобновляемой энергетики [5]. Исследования [6] показывают, что более 30 % территории страны характеризуются повышенными ветровыми нагрузками, где традиционные ветроустановки работают в неоптимальном режиме.

В данной статье рассматривается ветроэнергетическая двухгенераторная установка с реконфигурируемой выпрямительной схемой, предназначенная для применения в условиях российских регионов с высокой ветровой нагрузкой.

Показано, что данный подход позволяет стабилизировать напряжение в широком диапазоне скоростей ветра путем адаптивного переключения режимов работы выпрямителей.

Экспериментальный стенд ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой

Экспериментальный стенд ветроэнергетической установки, изображенный на рисунке 1, построен по аналогии с [7, 8] на базе двух магнитоэлектрических генераторов. В работе [9] упоминается данная установка, но в другом режиме функционирования, когда скорость ветра снижается. Конфигурация стенда включает в себя следующие основные компоненты: частотный преобразователь и асинхронный двигатель типа IM1082, имеющий два цилиндрических конца вала. От двигателя крутящий момент через сильфонные муфты передается на два магнитоэлектрических генератора.

Выводы каждого генератора подключены к индивидуальным выпрямителям VD1 и VD2. Далее постоянный ток подается на контактор, предназначенный для реконфигурации схемы соединения выпрямителей (параллельно или последовательно) в зависимости от требуемого режима работы ветроустановки. Окончательным звеном цепи является электрическая нагрузка, на которую подается питание.

При имитации режима нормальной скорости ветра на асинхронный двигатель с помощью частотного преобразователя подается управляющее напряжение, соответствующее номинальной

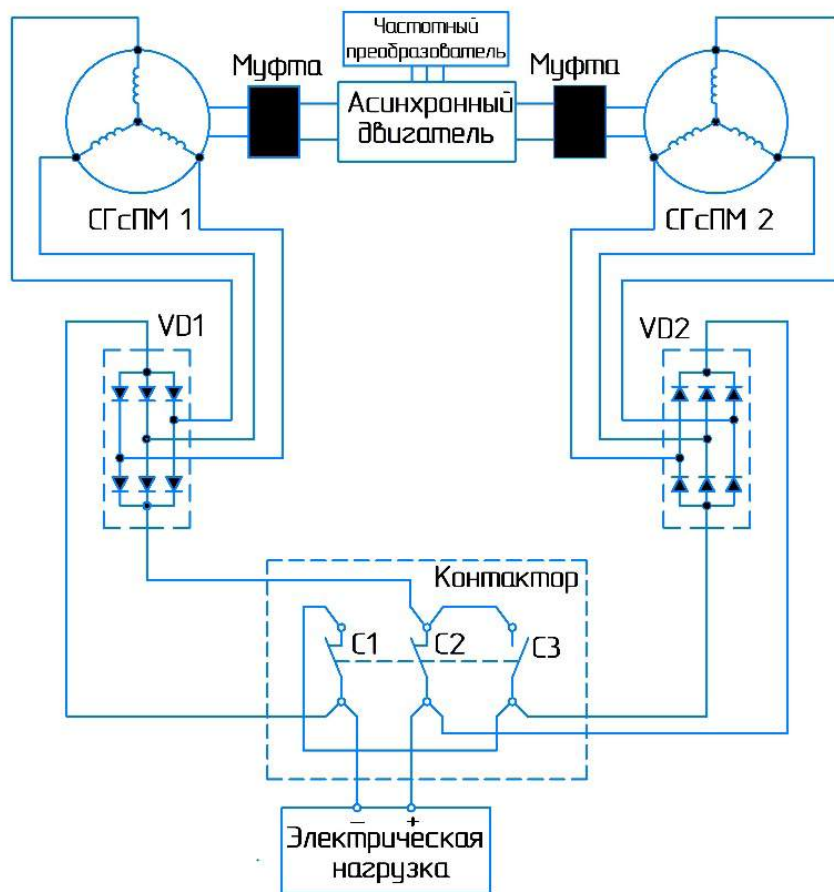


Рисунок 1. Экспериментальный стенд ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой (выпрямители соединены параллельно [9])

Figure 1. Experimental test bench of a wind energy installation with a reconfigurable rectifier circuit (parallel connection of rectifiers [9])

частоте вращения. В контакторе осуществляется следующая конфигурация: ключи C1 и C2 размыкаются, а ключ C3 замыкается. При таком соединении обмотки магнитоэлектрических генераторов через выпрямители VD1 и VD2 подключаются последовательно. В результате выходное напряжение достигает удвоенного номинального значения при сохранении тока в пределах номинального значения одного выпрямителя. Измерительные приборы, подключенные к выходным клеммам контактора, фиксируют значения тока и напряжения на нагрузке. Данный режим обеспечивает номинальную мощность установки при сохранении стандартных параметров выходного напряжения.

При переходе к режиму повышенной скорости ветра частота вращения асинхронного двигателя соответствующим образом увеличивается. Происходит изменение конфигурации контактора: ключи C1 и C2 замыкаются, а ключ C3 размыкается. Такая коммутация обеспечивает параллельное соединение одноименных фаз магнитоэлектрических генераторов через выпрямители. В результате, выходное напряжение стабилизируется на номинальном уровне, а значение тока увеличивается до двойной величины тока одного выпрямителя. Таким образом, данный режим обеспечивает использование повышенной энергии ветра, предотвращая перегрузку по

напряжению и поддерживая максимальную эффективность установки.

При имитации обратного перехода к пониженной скорости ветра осуществляется обратная коммутация, при которой одноименные фазы магнитоэлектрических генераторов через выпрямители возвращаются к последовательному соединению, что обеспечивает поддержание стабильных выходных параметров системы.

Таким образом, с помощью данного экспериментального стенда проводится исследование работы ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой в зависимости от скорости ветра. Во всех режимах работы система поддерживает номинальное напряжение и максимальную эффективность, доступную при данной скорости ветра.

Моделирование ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой

Электрическая часть магнитоэлектрической машины описывается системой уравнений, связанных с ротором [10]:

$$\begin{aligned} u_d &= L_d \frac{d}{dt} i_d + R i_d - L_q p \omega_r i_q, \\ u_q &= L_q \frac{d}{dt} i_q + R i_q - L_d p \omega_r i_d + \lambda p \omega_r, \\ T_e &= 1,5p[\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \end{aligned}$$

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

R — активное сопротивление обмотки статора, Ом;

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

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

ω_r — угловая частота вращения ротора, рад/с;

λ — магнитный поток постоянных магнитов, сцепленный с обмоткой статора, Вб;

p — число пар полюсов;

T_e — электромагнитный момент, Нм.

Выразим проекции токов статора на оси d и q [9]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_d &= \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q, \\ \frac{d}{dt} i_q &= \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}. \end{aligned}$$

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору.

Рассмотрим компьютерную модель в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab (Simulink) исследуемой ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой, показанной на рисунке 2. Подобные исследования были проведены в [9, 11, 12]. В качестве модели ветровой турбины используется блок «Wind Turbine», который рассчитывает механический момент на валу в зависимости от скорости ветра, угла поворота лопастей и скорости вращения генератора. В качестве источников электроэнергии применяются два блока «Permanent Magnet Synchronous Machine», моделирующие магнитоэлектрические генераторы, их параметры представлены в таблице 1. Для измерения трехфазного напряжения на выходе каждого генератора используются блоки «Three-Phase V-I Measurement». Действующее значение напряжения фиксируется с помощью блоков «RMS», подключенных к измерителям напряжения. Каждый мостовой выпрямитель реализован на шести диодных блоках «Diode», которые преобразуют переменное напряжение генераторов в постоянное. С целью снижения пульсаций выпрямленного напряжения исполь-

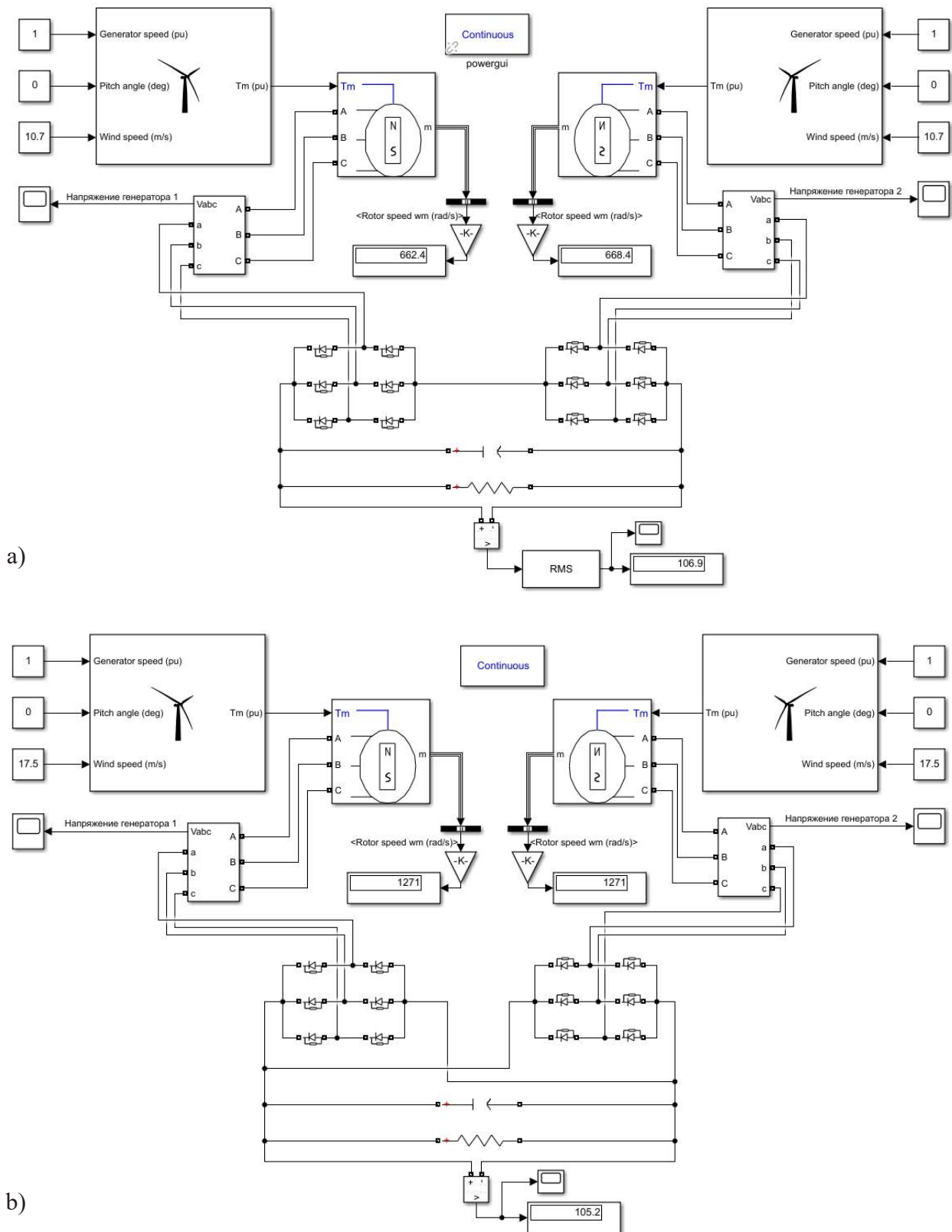


Рисунок 2. Моделирование ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой в Matlab (Simulink): последовательное соединение (a); параллельное соединение (b)

Figure 2. Simulation of a wind energy installation with a reconfigurable rectifier circuit in Matlab (Simulink): series connection (a); parallel connection (b)

Таблица 1. Параметры блока «Permanent Magnet Synchronous Machine»**Table 1.** Parameters of the «Permanent Magnet Synchronous Machine» block

Параметр	Значение
Количество фаз	3
Форма кривой противо — ЭДС	Синусоидальная
Тип ротора	Неявнополюсный
Активное сопротивление фазы статора (R_s)	0,0485 Ом
Индуктивность якоря (L)	0,000395 Гн
Потокосцепление, создаваемое магнитами (λ)	0,1194 В·с
Число пар полюсов (p)	4
Положение потока ротора при $\theta = 0$	На 90 градусов позади оси фазы А

зуется сглаживающий конденсатор емкостью 1 мФ, реализованный посредством блока «Series RLC Branch», позволяющий получить практически постоянное выходное напряжение.

В первом режиме работы, соответствующем нормальной скорости ветрового потока 10,7 м/с, имитируемой с помощью блоков «Wind Turbine», обеспечивается вращение роторов генераторов с частотой 665 об/мин. При последовательном соединении мостовых выпрямителей в данных условиях система демонстрирует стабильное выходное напряжение величиной 107 В.

При переходе во второй режим с повышенной скоростью ветра 17,5 м/с происходит увеличение частоты вращения роторов до 1270 об/мин. Несмотря на возросшую механическую нагрузку переключение мостовых выпрямителей на параллельную схему соединения позволяет сохранить выходное напряжение на неизменном уровне 107 В, что подтверждает эффективность предложенной схемы реконфигурации.

Как показали результаты моделирования (рисунок 3), при повышении скорости ветра переход с последовательного на параллельную схему соединения мостовых выпрямителей обеспечивает

эффективную стабилизацию выходного напряжения на уровне 107 В.

На рисунке 4 график наглядно демонстрирует ключевое преимущество ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой: способность стабилизировать выходное напряжение на заданном уровне (107 В) при широком изменении скорости ветра. При номинальной скорости (10,7 м/с) последовательное соединение выпрямителей обеспечивает требуемое напряжение, а при её увеличении до 17,7 м/с переключение на параллельную схему эффективно ограничивает рост напряжения, поддерживая его неизменным, что подтверждает работоспособность системы для защиты оборудования и расширения рабочего диапазона установки.

Результаты исследования подтверждают, что применение системы переключения мостовых выпрямителей обеспечивает стабилизацию напряжения в ветроэнергетических установках при переменной скорости ветра. Это гарантирует сохранение номинального напряжения и эффективное использование доступной ветровой энергии на каждом из режимов работы.

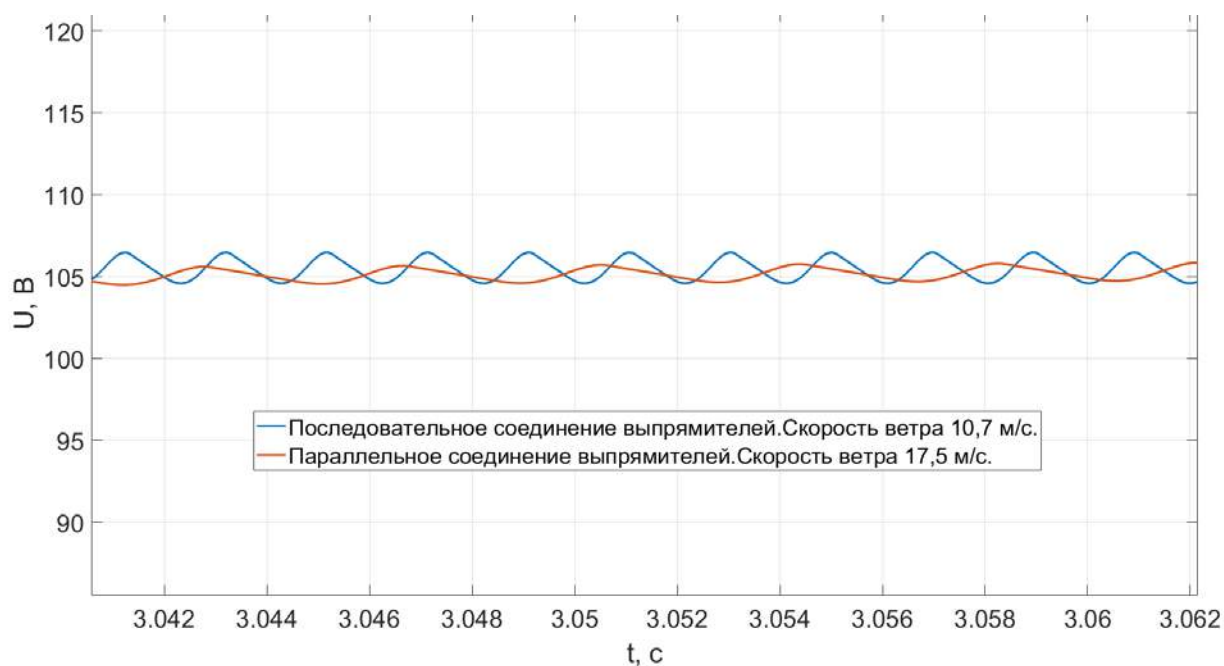


Рисунок 3. Напряжения нагрузки при последовательном и параллельном включении мостовых выпрямителей для нормальной и повышенной скорости ветра

Figure 3. Load voltages during series and parallel connection of bridge rectifiers for normal and increased wind speeds

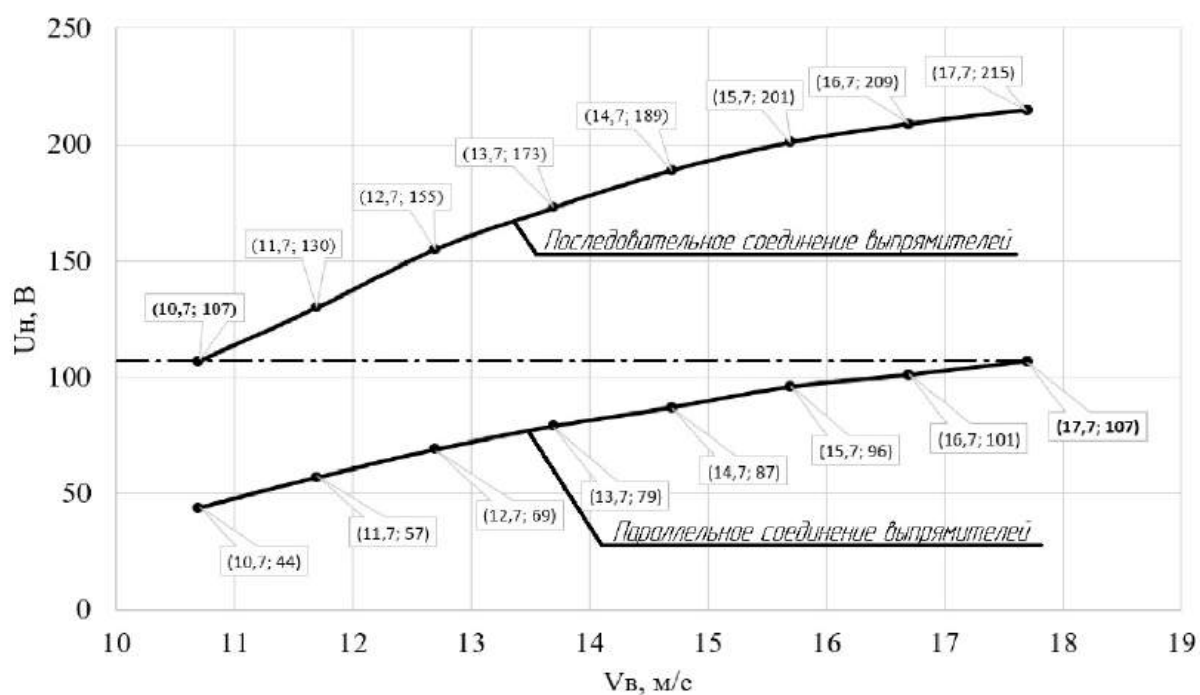


Рисунок 4. График зависимости скорости ветра от напряжения на нагрузке

Figure 4. Load voltage versus wind speed graph

Выводы

Проведено исследование режимов работы ветроэнергетической установки с реконфигурируемой выпрямительной схемой при различных скоростях ветра в среде Matlab Simulink. Реализованный метод регулирования напряжения демонстрирует потенциал для поддержания стабильного выходного напряжения на уровне 107 В и сохранения высоких показателей эффективности в расширенном диапазоне скоростей ветра от 10,7 до 17,7 м/с. Полученные результаты, показывающие ограничение напряжения

до номинальных 107 В при скорости ветра 17,7 м/с вместо потенциальных 215 В без реконфигурации, свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения данной системы, в частности, анализа рабочих характеристик АС-DC-АС инверторов, конфигураций обмоток генераторов и режимов нейтрали энергетической системы. Применение реконфигурируемых обмоток представляет собой перспективное направление для оптимизации параметров выходного напряжения в условиях переменной скорости ветра.

Список источников

1. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2023. 2023. 90 p.

2. Министерство энергетики РФ. Программа развития ветроэнергетики на 2020-2035 гг. / Министерство энергетики РФ. М., 2023. 145 с.

3. Третьяков А.В., Пискунова О.И. Проектирование системы автоматического управления ветроэнергетической установкой. Дубна: Университет «Дубна», 2022. 126 с. ISBN 978-5-89847-665-6.

4. Квитко А.В., Азарян А.А. Особенности проектирования ветроэнергетических станций. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. 112 с. ISBN 978-5-6047401-8-7.

5. Постановление Правительства РФ № 2341 «О развитии возобновляемых источников энергии» от 2022 г. // Собрание законодательства РФ. 2022. № 45. Ст. 7891.

6. Атласы ветрового и солнечного климатов России: атлас / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова; ред. М.М. Борисенко, В.В. Стадник. Санкт-Петербург, 1997. 173 с.

7. Пат. на полезную модель 228169 РФ, МПК F 03 D 9/25, F 03 D 7/06, F 03 D 3/06. Горизонтально-турбинный девятифазный ветрогенератор / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов, Д.Н. Крылов. № 2024107865, Заявлено 26.03.2024; Оpubл. 16.08.2024. Бюл. 23.

8. Пат. на полезную модель 230315 РФ, МПК F 03 D 9/30, F 03 D 3/00, F 03 D 7/06. Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов. № 2024109988, Заявлено 11.04.2024; Оpubл. 26.11.2024. Бюл. 33.

9. Саттаров Р.Р., Махиянов А.В., Минихметова С.О. Компьютерное моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. Т. 20, № 3. С. 28-37. DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37. EDN: CXSRZU.

10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Саратов: Профобразование, 2017. 288 с. ISBN 978-5-4488-0085-6.

11. Саттаров Р.Р., Махиянов А.В. Упрощенная компьютерная модель ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. Т. 20, № 1. С. 45-54. DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-1-45-54. EDN: CSXTGK.

12. Саттаров Р.Р., Махиянов А.В. Моделирование ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов со стабилизацией напряжения при изменяющейся скорости ветра // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 1. С. 16-25. DOI 10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25. EDN: ODHCOK.

References

1. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2023. 2023. 90 p.

2. Ministerstvo energetiki RF. Programma razvitiya vetroenergetiki na 2020-2035 gg. [Ministry of Energy of the Russian Federation.

Program for the Development of Wind Energy for 2020-2035]. Moscow, 2023. 145 p. [in Russian].

3. Tret'yakov A.V. *Proektirovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya vetroenergeticheskoy ustanovkoy* [Design of an Automatic Control System for a Wind Turbine]. Dubna, Universitet «Dubna» Publ., 2022. 126 p. ISBN 978-5-89847-665-6. [in Russian].

4. Kvitko A. V. *Osobennosti proektirovaniya vetroenergeticheskikh stantsiy* [Features of Wind Power Station Design]. Krasnodar, Kubanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni I.T. Trubilina Publ., 2022. 112 p. ISBN 978-5-6047401-8-7. [in Russian].

5. *Postanovleniye Pravitel'stva RF № 2341 «O razvitii vozobnovlyayemykh istochnikov energii» ot 2022 g. Sobraniye zakonodatel'stva RF* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 2341 «On the Development of Renewable Energy Sources» of 2022. Collection of Legislation of the Russian Federation]. 2022, No. 45, Art. 7891. [in Russian].

6. *Atlasy vetrovogo i solnechnogo klimatov Rossii: atlas. Federal'naya sluzhba Rossii po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy, Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voyeykova; red. M.M. Borisenko, V. V. Stadnik* [Atlases of Wind and Solar Climates of Russia: Atlas. Federal Service of Russia for Hydro-meteorology and Environmental Monitoring, A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory; eds. M.M. Borisenko, V.V. Stadnik]. Saint-Peterburg, 1997. 173 p. [in Russian].

7. Sattarov R.R., Makhyanov A.V., Krylov D.N. *Gorizontal'no-turbinnyy devyatifaznyyетрогенератор* [Horizontal-Turbine Nine-Phase Wind Generator]. Utility Model Patent RF, No. 228169, 2024. [in Russian].

8. Sattarov R.R., Makhyanov A.V. *Aerostatnoye vetroenergeticheskoye ustroystvo s devyatifaznym generatorom* [Aerostat Wind Power Device with a Nine-Phase Generator]. Utility Model Patent RF, No. 230315, 2024. [in Russian].

9. Sattarov R.R., Makhyanov A.V., Miniakhmetova S.O. *Komp'yuternoye modelirovaniye vetroustanovki na osnove dvukh sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami* [Computer Simulation of a Wind Turbine Based on Two Synchronous Generators with Permanent Magnets]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, Vol. 20, No. 3, pp. 28-37. DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37. EDN: CXSRZU. [in Russian].

10. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink]. Saratov, Profobrazovaniye Publ., 2017. 288 p. ISBN 978-5-4488-0085-6. [in Russian].

11. Sattarov R.R., Makhyanov A.V. *Uproshchennaya komp'yuternaya model' vetroenergeticheskoy sistemy na osnove dvukh magnitoelektricheskikh generatorov s rekonfiguriruyemyimi obmotkami* [Development and Research of Wind Power Devices with Reconfigurable Windings]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, Vol. 20, No. 1, pp. 45-54. DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-1-45-54. EDN: CSXTGK. [in Russian].

12. Sattarov R.R., Makhyanov A.V. *Modelirovanie vetroustanovki na baze dvukh pyatifaznykh magnitoelektricheskikh generatorov so stabilizatsiei napryazheniya pri izmenyayushcheysya skorosti vetra* [Modeling a Wind Turbine Based on Two Five-Phase Magnetoelectric Generators with Voltage Stabilization at Changing Wind Speed]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, Vol. 21, No. 1, pp. 16-25. DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25. EDN: ODHCOK. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 24.09.2025.

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 17.09.2025; accepted for publication 24.09.2025.

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-4656

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕВЯТИФАЗНЫХ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Артур Валерьевич Махиянов****Arthur V. Makhianov**

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

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

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

**Байрас Робертович Саттаров****Bayras R. Sattarov**

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

Актуальность

Развитие ветроэнергетики связано с поиском решений, повышающих эффективность, надежность и расширяющих диапазон рабочих режимов ветроустановок. Одним из перспективных направлений является использование генераторов с многофазными обмотками, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными трехфазными системами, таких как повышенная отказоустойчивость, сглаживание пульсаций момента и мощности, а также возможность продолжения работы при частичном повреждении обмоток.

В последние годы научной группой Р. Р. Саттарова и А. В. Махиянова (Уфимский государственный нефтяной технический университет / Уфимский университет науки и технологий) была разработана серия перспективных ветроэнергетических установок, объединенных ключевым признаком — применением девятифазного генератора. Данные решения, защищенные патентами на полезные модели, демонстрируют разнообразие конструктивных подходов: от классических горизонтально-осевых и вертикально-осевых турбин до инновационных аэростатных систем.

Ключевые слова

возобновляемые
источники энергии,
ветроэнергетика,
ветроэнергетическая
установка, девятифазный
магнитоэлектрический
генератор

Однако на сегодняшний день отсутствует систематизированный подход к анализу и классификации именно этого семейства ветроустановок. Актуальность настоящего исследования заключается в необходимости обобщения и структурирования патентных решений по ветроустановкам с девятифазными генераторами, что позволит выявить основные тенденции в их проектировании, оценить потенциал каждого типа конструкций и определить наиболее перспективные направления для дальнейших исследований и разработок.

Цель работы

Разработать классификацию ветроустановок с девятифазными генераторами на основе анализа патентных решений и провести сравнительную оценку их конструктивных схем.

Объекты исследования

Ветроэнергетические установки с девятифазными генераторами, конкретизированные в патентах на полезные модели № 17709 U1, № 228169 U1 и № 230315 U1, разработанные коллективом авторов под руководством Р. Р. Саттарова.

Предмет исследования

Принципы классификации и сравнительный анализ конструктивных особенностей данных установок.

Результаты

Практическая значимость результатов исследования заключается в их использовании разработчиками ветроэнергетического оборудования для выбора оптимальной конфигурации установки под конкретные технические требования и условия эксплуатации.

Для цитирования: Махиянов А. В., Саттаров Р. Р., Саттаров Б. Р. Классификация девятифазных реконфигурируемых ветроэнергетических установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 46-56. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-46-56>.

Original article

CLASSIFICATION OF NINE-PHASE RECONFIGURABLE WIND POWER INSTALLATIONS

Relevance

The advancement of wind energy is associated with the search for solutions that enhance the efficiency, reliability, and operational range of wind power installations. One promising direction is the use of generators with multiphase windings, which offer several advantages over traditional three-phase systems, such as increased fault tolerance, smoothing of torque and power pulsations, and the ability to continue operation under partial winding damage.

In recent years, the research group led by R. R. Sattarov and A. V. Makhyanov (Ufa State Petroleum Technological University / Ufa University of Science and Technology) has developed a series of promising wind power installations united by a key feature — the application of a nine-phase generator. These solutions, protected by utility model patents, demonstrate a diversity of design approaches: from classical horizontal-axis and vertical-axis turbines to innovative aerostat-based systems.

However, there is currently no systematic approach to the analysis and classification of this particular family of wind power installations. The relevance of this study lies in the need to generalize and structure patent solutions for wind installations with nine-phase generators, which will help

Keywords

renewable energy sources, wind energy, wind power installation, nine-phase permanent magnet generator

identify key design trends, assess the potential of each structural type, and determine the most promising directions for further research and development.

Aim of research

To develop a classification of wind power installations with nine-phase generators based on an analysis of patent solutions and to conduct a comparative evaluation of their structural layouts.

Object of study

Wind power installations with nine-phase generators, as detailed in utility model patents No. 217709 U1, No. 228169 U1, and No. 230315 U1, developed by a team of authors under the leadership of R. R. Sattarov.

Subject of study

The principles of classification and a comparative analysis of the structural features of these installations.

Results

The results of the work can be used by developers of wind energy equipment to select the optimal installation configuration for specific technical requirements and operating conditions.

For citation: Makhyanov A. V., Sattarov R. R., Sattarov B. R. Klassifikatsiya devyatifaznykh rekonfiguriruyemykh vetroenergeticheskikh ustanovok [Classification of Nine-Phase Reconfigurable Wind Power Installations]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 46-56 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-46-56>.

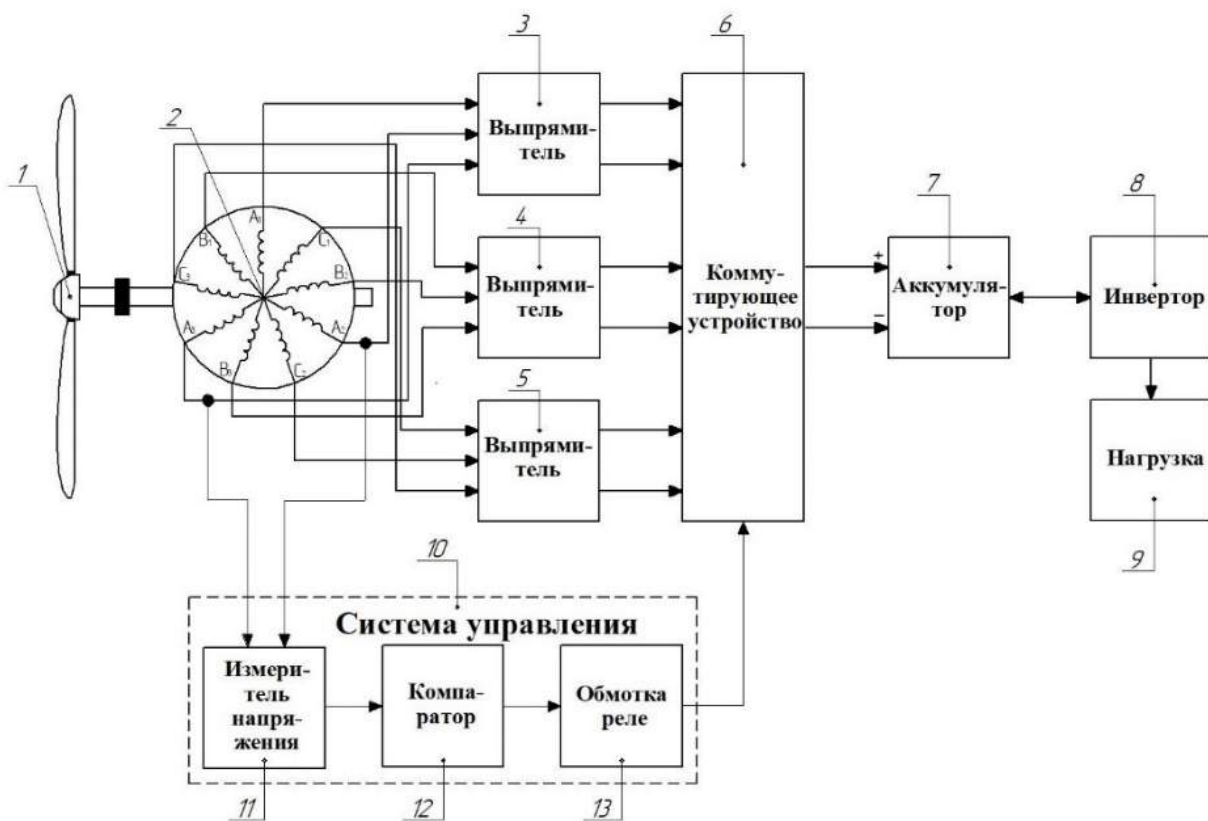
Введение

Современная ветроэнергетика развивается по пути создания систем, способных стабильно и эффективно работать в условиях постоянно меняющейся скорости ветра [1]. Помимо максимизации выработки электрической энергии важнейшей задачей становится поддержание стабильных выходных параметров, особенно уровня напряжения, необходимых для интеграции с существующими энергосистемами и дальнейшей передачи потребителям [2]. Одним из наиболее перспективных решений указанной проблемы выступает внедрение технологий реконфигурации (переключения) электрооборудования, позволяющих адаптироваться к изменениям ветровой нагрузки и поддерживать стабильность качества вырабатываемого электричества даже при резких колебаниях погодных условий [3]. Это направление активно исследуется и внедряется в крупных проектах, способствуя повышению эффективности и надежности ветрогенераторов в составе общей электросети [4, 5].

Ветроэнергетическая установка с девятифазным генератором

Известна ветроэнергетическая установка с девятифазным генератором, показанная на рисунке 1 [6]. Ветроколесо 1 выполнено горизонтально-осевым, ось вращения параллельна направлению воздушного потока. Система управления 10 с измерителем напряжения 11, компаратором 12 и обмоткой реле 13 подает сигнал на коммутирующее устройство 6 для последовательного или параллельного соединения выводов выпрямителей 3, 4, 5 от трех трехфазных обмоток $A_1A_2A_3$, $B_1B_2B_3$, $C_1C_2C_3$. Измеритель напряжения фиксирует изменение на обмотке $A_1A_2A_3$.

При нормальной скорости ветроколеса 1 выпрямители соединяются параллельно, обеспечивая номинальное напряжение и тройной ток. Выход подключен к аккумулятору 7, питающему нагрузку 9 через инвертор 8, обеспечивая максимальную мощность. При незначительном снижении скорости выпрямитель 3 переходит в холостой ход, а выпрямители 4 и 5 соединяются последовательно, удваивая напряжение для стабилизации



1 — ветроколесо; 2 — девятифазный синхронный генератор с постоянными магнитами; 3, 4, 5 — выпрямители; 6 — коммутирующее устройство; 7 — аккумулятор; 8 — инвертор; 9 — нагрузка; 10 — система управления; 11 — измеритель напряжения; 12 — компаратор; 13 — обмотка реле

1 — wind wheel; 2 — nine-phase permanent magnet synchronous generator; 3, 4, 5 — rectifiers; 6 — commutating device; 7 — accumulator; 8 — inverter; 9 — load; 10 — control system; 11 — voltage meter; 12 — comparator; 13 — relay winding

Рисунок 1. Структурная схема ветроэнергетической установки с девятифазным генератором [6]

Figure 1. Structural diagram of a wind power installation with a nine-phase generator [6]

аккумулятора. Дальнейшее снижение приводит к последовательному соединению всех трех выпрямителей, увеличивая напряжение до нормального и уменьшая ток до уровня одного выпрямителя. Мощность установки максимальна для текущей скорости ветра. При повышении скорости система управления возвращает параллельное соединение. Во всех режимах установка поддерживает близкий к номинальному уровень напряжения и максимальную мощность.

Горизонтально-турбинный девятифазный ветрогенератор

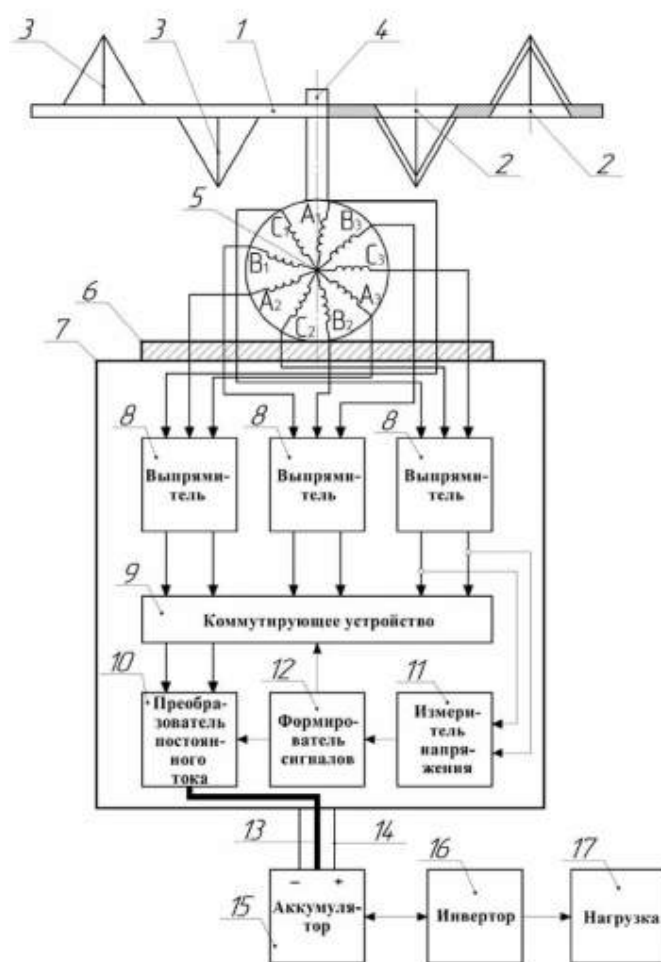
Ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором в виде горизонтально-турбинного ветрогенератора показано на рисунке 2 [7]. Ветроколесо выполнено вертикально-осевым в виде жесткого диска 1 с пирамидно-парусными элементами 3, ось вращения перпендикулярна направлению воздушного потока. Под воздействием ветра и разницы аэродинамических показателей

пирамидно-парусных элементов 3 формируется движущая сила, создающая крутящий момент на роторе 4 девятифазного генератора 5 с постоянными магнитами, который при вращении вырабатывает электричество.

При благоприятной скорости жесткий диск 1 через ротор 4 вращает генератор 5. Формирователь сигналов 12 в блоке 7 подает команду коммутирующему устройству 9 на последовательное соединение выпрямителей 8. Выходное напряжение при этом утраивается, ток соответствует одному выпрямителю. Преобразователь 10 стабилизирует пита-

ние аккумулятора 15 и нагрузки 17 через инвертор 16.

При достижении максимального порога напряжения измерителем 11 формирователь 12 переключает коммутирующее устройство 9 на параллельное соединение выпрямителей 8, обеспечивая номинальное напряжение и утроенный ток. Мощность установки возрастает. Со снижением скорости формирователь 12 возвращает последовательное соединение, восстанавливая нормальную работу. Во всех режимах устройство поддерживает нормальный уровень напряжения и максимальную мощность.



1 — жесткий диск; 2 — треугольные сквозные отверстия; 3 — пирамидно-парусные элементы; 4 — ротор; 5 — девятифазный синхронный генератор с постоянными магнитами; 6 — фланец; 7 — блок измерений напряжений и коммутаций; 8 — выпрямитель; 9 — коммутирующее устройство; 10 — преобразователь постоянного тока; 11 — измеритель напряжения; 12 — формирователь сигналов; 13 — электрический кабель; 14 — опорная мачта; 15 — аккумулятор; 16 — инвертор; 17 — нагрузка

1 — rigid disk; 2 — triangular through holes; 3 — pyramidal-sail elements; 4 — rotor; 5 — nine-phase permanent magnet synchronous generator; 6 — flange; 7 — voltage measurement and switching unit; 8 — rectifier; 9 — commutating device; 10 — DC converter; 11 — voltage meter; 12 — signal former; 13 — electric cable; 14 — support mast; 15 — accumulator; 16 — inverter; 17 — load

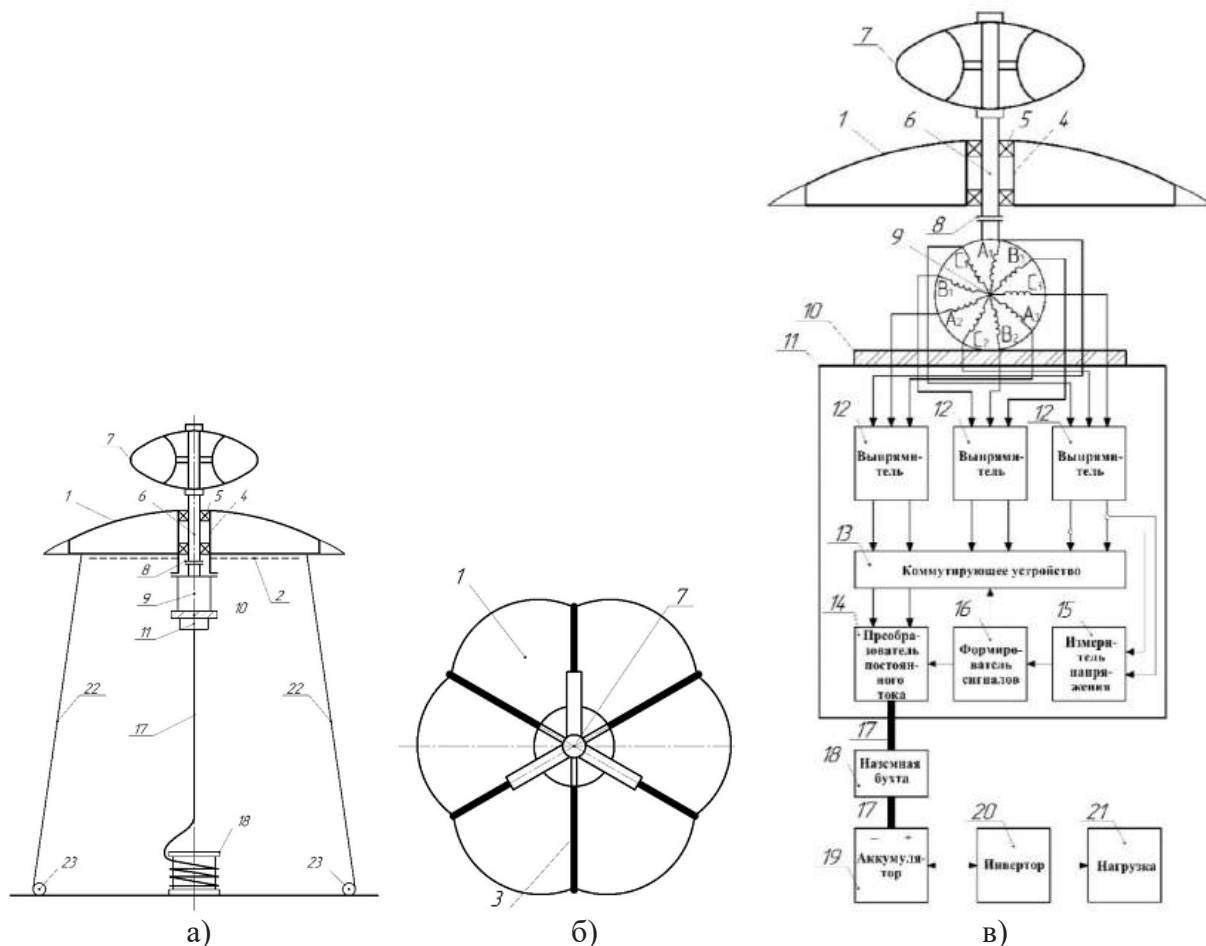
Рисунок 2. Структурная схема горизонтально-турбинного девятифазного ветрогенератора [7]

Figure 2. Structural diagram of a horizontal-axis nine-phase wind generator [7]

Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором

Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором показано на рисунке 3 [8]. Ветроколесо

представляет собой вертикально-осевую ортогональную турбину 7, сочлененную с аэростатной оболочкой 1, расположенной на значительной высоте, где энергия ветра высока.



- 1 — аэростатная оболочка; 2 — клеть из гибких ремней; 3 — жесткие прутья; 4 — цилиндрический корпус; 5 — подшипники; 6 — вал; 7 — ортогональная турбина; 8 — муфта; 9 — девятифазный синхронный генератор с постоянными магнитами; 10 — фланец; 11 — блок измерений напряжений и коммутаций; 12 — выпрямитель; 13 — коммутирующее устройство; 14 — преобразователь постоянного тока; 15 — измеритель напряжения; 16 — формирователь сигналов; 17 — электрический кабель; 18 — наземная бухта; 19 — аккумулятор; 20 — инвертор; 21 — нагрузка; 22 — причальные тросы; 23 — наземные лебедки

- 1 — aerostat shell; 2 — cage of flexible straps; 3 — rigid rods; 4 — cylindrical housing; 5 — bearings; 6 — shaft; 7 — orthogonal turbine; 8 — coupling; 9 — nine-phase permanent magnet synchronous generator; 10 — flange; 11 — voltage measurement and switching unit; 12 — rectifier; 13 — switching; 14 — DC converter; 15 — voltage meter; 16 — signal former; 17 — electric cable; 18 — ground-based cable drum; 19 — accumulator; 20 — inverter; 21 — load; 22 — mooring ropes; 23 — ground-based winches

Рисунок 3. Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором [8]: общий вид (а), вид сверху (б), структурная схема (с)

Figure 3. Aerostat-based wind energy system with a nine-phase generator [8]: general view (a), top view (b), structural diagram (c)

Аэростатная оболочка 1 заполняется газом легче воздуха в количестве, обеспечивающем ее положительную плавучесть под действием аэростатической подъемной силы. Затем причальные тросы 22 стравливаются с барабанов синхронно работающих наземных лебедок 23 до тех пор, пока установка не поднимется на заданную высоту, где подъемная сила умножается аэродинамической формой аэростатной оболочки 1. По конструкции электрической части и принципу действия данное ветроэнергетическое устройство аналогично ранее описанному девятифазному ветрогенератору горизонтально-турбинного

типа [7]. Во всех режимах аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором сохраняет нормальный уровень напряжения и выдает максимально возможную мощность при данной скорости ветра.

Сравнительный анализ конструкций

Для систематизации анализа трёх рассмотренных девятифазных реконфигурируемых ветроэнергетических установок представлена сравнительная таблица 1 их ключевых характеристик [6–8].

На основании данных таблицы 1 можно сделать вывод, что каждая из

Таблица 1. Сравнительный анализ девятифазных реконфигурируемых ветроэнергетических установок

Table 1. Comparative analysis of nine-phase reconfigurable wind power installations

Характеристика	Ветроэнергетическая установка с девятифазным генератором (Патент на ПМ № 217709 U1) [6]	Горизонтально-турбинный девятифазный ветрогенератор (Патент на ПМ № 228169 U1) [7]	Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором (Патент на ПМ № 230315 U1) [8]
Тип ветроколеса	Классическое горизонтально-осевое	Вертикально-осевой жесткий диск с парусными элементами	Вертикально-осевая ортогональная турбина, сочлененная с аэростатной оболочкой
Тип генератора	Девятифазный синхронный генератор с постоянными магнитами		
Количество режимов работы	3	2	
Принцип реконфигурации	Переключение соединения выпрямителей (параллельно/последовательное)	Переключение соединения выпрямителей (последовательное/параллельное)	
Ключевое преимущество	Стабилизация напряжения в широком диапазоне нормальных и низких ветровых скоростей	Стабилизация напряжения в широком диапазоне нормальных и высоких ветровых скоростей	Стабилизация напряжения в широком диапазоне нормальных и высоких ветровых скоростей. Доступ к более мощным и стабильным ветровым потокам обеспечивает высокий уровень использования энергии ветра.
Потенциальная сложность	Конструкция ВЭУ отличается простотой и не предполагает сложных технических решений	Более сложная механическая конструкция ротора	Зависимость от метеоусловий, сложность размещения и обслуживания

представленных девятифазных ветроэнергетических установок обладает уникальными характеристиками, определяющими их оптимальную область применения. Установка по патенту № 217709 U1 отличается конструктивной простотой и эффективной работой при низких скоростях ветра, в то время как горизонтально-турбинный ветрогенератор (патент № 228169 U1) и аэростатное устройство (патент № 230315 U1) демонстрируют стабилизацию напряжения в диапазоне нормальных и высоких скоростей, предлагая различные подходы к повышению эффективности — через усовершенствованную аэродинамику ротора и доступ к высотным ветровым потокам соответственно [6–8].

Обзор существующих подходов к реконфигурации в ветроэнергетических системах

Реконфигурация в контексте ветроэнергетических установок подразумевает динамическое изменение конфигурации электрической цепи системы для оптимальной адаптации её рабочих характеристик к текущим эксплуатационным условиям. Традиционно используется метод реконфигурации выпрямительной части, преобразующей переменный ток генератора в постоянный [9–11]. Стандартные трёхфазные системы зачастую недостаточно гибки, что вызывает повышенный интерес к многофазным генераторам. Реконфигурация позволяет, например, переключать выпрямительные мосты с последовательного на параллельное соединение: первое обеспечивает высокое выходное напряжение при низких скоростях вращения, а второе — ограничивает рост напряжения и увеличивает отдаваемый ток при высоких скоростях, тем самым стабилизируя мощность.

Особый интерес представляет реконфигурация самих обмоток многофазных

генераторов [12, 13]. Генераторы с числом фаз более трех, в частности девятифазные, обладают рядом преимуществ, таких как повышенная отказоустойчивость, снижение пульсаций момента и мощности. Однако их главный потенциал в контексте данной работы заключается в возможности структурного изменения схемы соединения фазных обмоток. Это открывает путь к созданию систем с несколькими стабильными рабочими точками по напряжению, что кардинально расширяет рабочий диапазон установки без использования сложных и дорогостоящих силовых преобразователей с широтно-импульсной модуляцией.

Важно отметить, что принципы реконфигурации успешно применяются и в других типах ветроустановок. Так, в работе В. А. Алексеенко рассматриваются вопросы функционирования автономных вертикально-осевых ветроэнергетических установок [14]. Анализ данной диссертации показывает, что в подобных системах также используется реконфигурация, но на уровне системы накопления энергии. Для оптимизации режимов заряда аккумуляторных батарей и повышения надежности всей установки применяется переключение между различными схемами их соединения. Это напрямую перекликается с идеей реконфигурации выпрямителей в генераторе, поскольку преследует ту же цель — адаптацию системы к изменяющимся условиям для стабилизации выходных параметров.

Конкретным техническим решением в этой области является электромагнитное реле для переключения аккумуляторных батарей, описанное в [15]. Данное устройство позволяет производить реконфигурацию цепи накопления энергии, переключая батареи с параллельной на попарно-параллельную схему зарядки. Это обеспечивает гибкое

управление процессом заряда в зависимости от доступной мощности от генератора и состояния батарей, что является важнейшей задачей для автономных ветроэнергетических систем, работающих в нестабильных ветровых условиях. Таким образом, реконфигурация применяется комплексно: не только в генераторной части, но и в системе хранения энергии [14, 15].

Представленные в данной статье патентные решения являются практической реализацией этих принципов [6–8]. Они объединяют преимущества девятифазных генераторов с простой и надежной схемой реконфигурации выходных выпрямителей, что позволяет создать ветроустановку, эффективно работающую в расширенном диапазоне скоростей ветра за счет стабилизации выходного напряжения.

Выводы

Проведенный анализ патентных решений позволил выявить и систематизировать три основных типа девятифазных реконфигурируемых ветроэнергетических установок: классическую горизонтально-осевую, вертикально-осевую с ротором на основе жесткого диска и аэростатную с ортогональной турбиной [6–8]. Установлено, что общим для всех

рассмотренных установок ключевым элементом является система реконфигурации, обеспечивающая переключение режимов работы выпрямителей для стабилизации выходного напряжения в широком диапазоне скоростей ветра. Сравнительный анализ показал, что каждая из конструкций имеет свои нишевые преимущества: ветроустановка по патенту № 217709 U1 выигрывает за счет конструктивной простоты и эффективной стабилизации напряжения именно при низких скоростях ветра, в то время как горизонтально-турбинный ветрогенератор (патент № 228169 U1) и аэростатное устройство (патент № 230315 U1) демонстрируют высокую эффективность в диапазоне нормальных и высоких скоростей, предлагая, соответственно, усовершенствованную аэродинамику ротора и доступ к более мощным высотным ветровым потокам.

Наиболее перспективным направлением для дальнейших исследований представляется комбинирование преимуществ девятифазных генераторов (повышенная надежность, сглаживание пульсаций) с более сложными системами реконфигурации, включающими не только выпрямители, но и схему соединения самих обмоток статора.

Список источников

1. Мороз Л.Н. Интеграция ветроэнергетики в существующие энергетические системы // Вестник науки. 2024. Т. 1, № 7(76). С. 906-910. EDN: CFYLPK.
2. Суяков С.А. Проблемы интеграции ветроустановок в единую энергетическую систему России // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3(30). С. 89. EDN: TFXGBZ.
3. Мазалов А.А. Адаптивная ветроустановка переменного тока с асинхронным генератором // Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления: сб. матер. X Всеросс. науч. конф., посвященной 150-летию со дня рождения А.П. Чехова, Таганрог, 21–22

октября 2010 года. Таганрог: Издательство ТТИ ЮФУ, 2010. Т. 1. С. 183-184. EDN: CBVDIM.

4. Саттаров Р.Р., Махиянов А.В. Моделирование ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов со стабилизацией напряжения при изменяющейся скорости ветра // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 1. С. 16-25. DOI 10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25. EDN: ODHCOK.
5. Саттаров Р.Р., Махиянов А.В., Минихметова С.О. Компьютерное моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. Т. 20, № 3. С. 28-37.

DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37.
EDN: CXSRZU.

6. Пат. на полезную модель 217709 РФ, МПК F 03 D 7/00. Ветроэнергетическая установка с девятифазным генератором / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов, И.И. Балгазин. № 2023102807, Заявлено 07.02.2023; Опубл. 13.04.2023. Бюл. 11.

7. Пат. на полезную модель 228169 РФ, МПК F 03 D 9/25, F 03 D 7/06, F 03 D 3/06. Горизонтально-турбинный девятифазный ветрогенератор / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов, Д.Н. Крылов. № 2024107865, Заявлено 26.03.2024; Опубл. 16.08.2024. Бюл. 23.

8. Пат. на полезную модель 230315 РФ, МПК F 03 D 9/30, F 03 D 3/00, F 03 D 7/06. Аэростатное ветроэнергетическое устройство с девятифазным генератором / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов. № 2024109988, Заявлено 11.04.2024; Опубл. 26.11.2024. Бюл. 33.

9. Jordan S., Manolopoulos C.D., Apsley J.M. Winding Configurations for Five-Phase Synchronous Generators with Diode Rectifiers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Jan. 2016. Vol. 63. No. 1. P. 517-525, DOI: 10.1109/TIE.2015.2493507.

10. Chinmaya K.A., Singh G.K. Modeling and Experimental Analysis of Grid-Connected Six-Phase Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion System // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 166. P. 151-162. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.10.007.

11. Пат. 2168062 РФ, МПК F03D 9/00. Ветрогенератор / Д.А. Ивашинцов, А.М. Рыжов, М.В. Кузнецов и др. № 99125638/06, Заявлено 07.12.1999; Опубл. 27.05.2001. Бюл. 15.

12. Пат. на полезную модель 216073 РФ, МПК H 02 K 21/12. Магнитоэлектрический генератор с бифилярной обмоткой / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов, Т.Р. Зиганшин. № 2022118402, Заявлено 02.11.2021; Опубл. 16.01.2023. Бюл. 2.

13. Пат. на полезную модель 212697 U1 РФ, МПК F 03 D 7/04, H 02 P 9/00. Ветроэнергетическая двухгенераторная установка / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов, И.Р. Саттаров. № 2022104815, Заявлено 22.02.2022; Опубл. 03.08.2022. Бюл. 22.

14. Алексеенко В.А. Научно-технические аспекты разработки и функционирования автономных вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок для сельскохозяйственных потребителей: дисс. ... д-ра техн. наук. 2022. 377 с.

15. Пат. 2705796 РФ, МПК H 01 H 51/06, H 01 M 10/44, H 02 J 7/00. Электромагнитное реле для переключения аккумуляторных батарей с параллельной на попарно-параллельную зарядку / В.А. Алексеенко, В.А. Халюткин. № 2019115522. Заявлено 21.05.2019; Опубл. 12.11.2019, Бюл. 32.

References

1. Moroz L.N. Integratsiya vetroenergetiki v sushchestvuyushchiye energeticheskiye sistemy [Integration of Wind Energy into Existing Energy Systems]. *Vestnik nauki — Science Bulletin*, 2024, Vol. 1, No. 7(76), pp. 906-910. EDN: CFYLPK. [in Russian].

2. Suyakov S.A. Problemy integratsii vetroustanovok v yedinyu energeticheskuyu sistemu Rossiit [Problems of Integration of Wind Power in the Unified Energy System of Russia]. *Inzhenernyy vestnik Dona — Engineering Journal of Don*, 2014, No. 3(30), pp. 89. EDN: TFXGBZ. [in Russian].

3. Mazalov A.A. Adaptivnaya vetroustanovka peremennogo toka s asinkhronnym generatorom [An Adaptive AC Wind Turbine with an Induction Generator]. *Sbornik materialov X Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Tekhnicheskaya kibernetika, radioelektronika i si-stemy upravleniya», posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya A.P. Chekhova, Taganrog, 21–22 oktyabrya 2010 goda* [Collection of Materials of the 10th All-Russian Scientific Conference «Technical Cybernetics, Radioelectronics and Control Systems», Dedicated to the 150th Anniversary of the Birth of A.P. Chekhov, Taganrog, October 21-22, 2010.]. Taganrog, Izdatel'stvo TTI YUFU, 2010, Vol. 1, pp. 183-184. EDN: CBVDIM. [in Russian].

4. Sattarov R.R., Makhianov A.V. Modelirovanie vetroustanovki na baze dvukh pyatifaznykh magnitoelektricheskikh generatorov so stabilizatsiei napryazheniya pri izmenyayushcheisya skorosti vetra [Modeling a Wind Turbine Based on Two Five-Phase Magnetolectric Generators with Voltage Stabilization at Changing Wind Speed]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, Vol. 21, No. 1, pp. 16-25. DOI: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25. EDN: ODHCOK. [in Russian].

5. Sattarov R.R., Makhianov A.V., Miniakhmetova S.O. Komp'yuternoye modelirovaniye vetroustanovki na osnove dvukh sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami [Computer Simulation of a Wind Turbine Based on Two

Synchronous Generators with Permanent Magnets]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, Vol. 20, No. 3, pp. 28-37. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37. EDN: CXSRZU. [in Russian].

6. Sattarov R.R., Makhiyanov A.V., Balgazin I.I. *Vetro-energeticheskaya ustanovka s devyatifaznym generatorom* [Wind Power Plant with a Nine-Phase Generator]. Patent RF, No. 217709, 2023. [in Russian].

7. Sattarov R.R., Makhiyanov A.V., Krylov D.N. *Gorizontal'no-turbinnyy devyatifaznyy vetro-generator* [Horizontal-Turbine Nine-Phase Wind Generator]. Utility Model Patent RF, No. 228169, 2024. [in Russian].

8. Sattarov R.R., Makhiyanov A.V. *Aerostatnoye vetroenergeticheskoye ustroystvo s devyatifaznym generatorom* [Aerostat Wind Power Device with a Nine-Phase Generator]. Utility Model Patent RF, No. 230315, 2024. [in Russian].

9. Jordan S., Manolopoulos C.D., Apsley J.M. Winding Configurations for Five-Phase Synchronous Generators with Diode Rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Jan. 2016, Vol. 63, No. 1, pp. 517-525, DOI: 10.1109/TIE.2015.2493507.

10. Chinmaya K.A., Singh G.K. Modeling and Experimental Analysis of Grid-Connected Six-Phase Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion System. *Electric Power*

Systems Research, 2019, Vol. 166 pp. 151-162. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.10.007.

11. Ivashintsov D.A., Ryzhov A.M., Kuznetsov M.V. e.a. *Vetrogenerator* [Wind Generator]. Patent RF, No. 2168062, 2001. [in Russian].

12. Sattarov R.R., Makhiyanov A.V., Ziganshin T.R. *Magnitoelektricheskij generator s bifilyarnoj obmotkoj* [Magnetoelectric Generator with Bifilar Winding]. Utility Model Patent RF, No. 216073, 2023. [in Russian].

13. Sattarov R.R., Makhiyanov A.V., Sattarov I.R. *Vetroenergeticheskaya dvukhgeneratornaya ustanovka* [Wind Power Two-Generator Installation]. Utility Model Patent RF, No. 212697, 2022. [in Russian].

14. Alekseyenko V.A. *Nauchno-tekhnicheskiye aspekty razrabotki i funktsionirovaniya avtonomnykh vertikal'no-osevykh rotornykh vetroenergeticheskikh ustanovok dlya sel'skokhozyaystvennykh potrebiteley: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific and Technical Aspects of the Development and Operation of Autonomous Vertical-Axis Rotary Wind Power Plants for Agricultural Consumers: D-r of Engin. Sci. Diss.]. 2022. 377 p. [in Russian].

15. Alekseyenko V.A., Khalyutkin V.A. *Elektromagnitnoye rele dlya pereklyucheniya akkumulyatornykh batarey s parallel'noy na poparno-parallel'nuyu zaryadku* [Electromagnetic Relay for Switching Storage Batteries from Parallel to Pair-Parallel Charging]. Patent RF, No. 2705796. 2019. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 17.09.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 01.10.2025.

The article was submitted 17.09.2025; approved after reviewing 24.09.2025; accepted for publication 01.10.2025.

Научная статья

УДК 621.318

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-57-67

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Павел Александрович Хлюпин****Pavel A. Khlyurin**

кандидат технических наук,

доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Тимур Радикович Хабибуллин****Timur R. Khabibullin**

старший преподаватель кафедры

«Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

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

ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Актуальность

С каждым годом запасов легкоизвлекаемых углеводородов становится меньше. Начинается активная разработка месторождений с тяжелыми углеводородами. В процессе добычи в скважине образуются асфальтосмолопарафиновые отложения, что уменьшает эффективный диаметр труб и ведет к большим потребностям электроэнергии и меньшей нефтеотдаче. Одним из эффективных методов борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями является индукционный нагрев, что позволяет точно поддерживать и регулировать температуру насосно-компрессорной трубы, предотвращая кристаллизацию и коксование на внутренней стенке. Применение многофункционального интегрированного электромагнитного компонента позволяет увеличить надежность и эффективность системы за счет установки непосредственно поверх насосно-компрессорной трубы. Поскольку многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент находится в скважине, он подвергается воздействию внешних факторов, что ведет к изменению его параметров.

Ключевые слова

многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, индукционный нагрев, борьба с асфальтосмолопарафиновыми отложениями, добыча вязкой нефти, параметры колебательного контура

Цель исследования

Исследовать изменение параметров многофункционального интегрированного электромагнитного компонента от внешних влияющих факторов, таких как температура.

Методы исследования

Проведение лабораторных экспериментов с последующей математической обработкой результатов.

Результаты

Исследована зависимость изменения емкости C и индуктивности L многофункционального интегрированного электромагнитного компонента от температуры.

Для цитирования: Хлюпин П. А., Хабибуллин Т. Р., Афлятунов Р. Р. Исследование зависимости параметров многофункционального интегрированного электромагнитного компонента от температуры // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 57-67. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-57-67>.

Original article

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE PARAMETERS OF A MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT ON TEMPERATURE

Relevance

Every year, the reserves of easily extractable hydrocarbons are becoming smaller. Active development of deposits with heavy hydrocarbons begins. During the production process, asphalt-resin-paraffin deposits are formed in the well, which reduces the effective diameter of the pipes and leads to higher energy consumption and lower oil recovery. One of the effective methods of combating asphalt-resin-paraffin deposits is induction heating, which allows you to accurately maintain and regulate the temperature of the tubing, preventing crystallization and coking on the inner wall. The use of a multifunctional integrated electromagnetic component allows you to increase the reliability and efficiency of the system, due to the installation directly on top of the tubing. Since the multifunctional integrated electromagnetic component is located in the well, it is exposed to external factors, which leads to a change in its parameters.

Aim of research

To study the change in the parameters of a multifunctional integrated electromagnetic component from external influencing factors, such as temperature.

Research methods

Conducting laboratory experiments with subsequent mathematical processing of the results.

Results

The dependence of the change in capacitance C and inductance L of a multifunctional integrated electromagnetic component with a change in temperature was studied.

Keywords

multifunctional integrated electromagnetic component, induction heating, combating with asphalt-resin-paraffin deposits, viscous oil production, oscillatory circuit parameters

For citation: Khlyupin P. A., Khabibullin T. R., Aflyatunov R. R. Issledovaniye zavisimosti parametrov mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta ot temperatury [Study of the Dependence of the Parameters of a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component on Temperature]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 57-67 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-57-67>.

Введение

Запасов месторождений с легко извлекаемой нефтью становится с каждым годом меньше, что ведет к разработке месторождений с высоковязкой нефтью. В России и бывших странах СССР известно свыше 300 месторождений высоkozастывающей аномальной нефти. Основные запасы и объемы добычи такой нефти в России приходятся на Тимано-Печорскую нефтегазоносную провинцию (НГП) [1].

Добыча высоковязкой нефти сопровождается активным образованием асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в насосно-компрессорных трубах. Асфальтосмолопарафиновые отложения представляют собой сложные смеси, состоящие из парафинов, асфальтосмолистых соединений, силикагелевых смол, масел, воды и механических примесей. Выпадение парафина определяется температурой, давлением, скоростью течения скважинной продукции. Практика добычи парафиновой нефти показывает, что наиболее интенсивно парафин откладывается на внутренней поверхности колонны насосно-компрессорных труб (НКТ). Различные промышленные исследования показали, что характер распределения парафиновых отложений в подъемных трубах примерно таков: толщина отложений постепенно увеличивается от места начала их образования на глубине 500–900 м и достигает максимального значения на глубине 50–200 м от устья [2].

Одним из методов борьбы с АСПО является нагрев добываемой нефти и поддержание температуры выше температуры кристаллизации парафинов, но не выше температуры коксования нефти [3].

Способы нагрева нефти

Существуют различные способы нагрева добываемой нефти, один из них индукционный нагрев. Данный метод

эффективен за счет бесконтактного воздействия и точного управления нагревом металла труб посредством электромагнитной индукции. Снаружи колонны НКТ размещается катушка индуктивности, по которой пропускается переменный электрический ток высокой частоты. Катушка создает переменное магнитное поле, которое индуцирует в стенках НКТ вихревые токи (токи Фуко) [4]. Эти вихревые токи вызывают локальный нагрев металла труб, который затем передается добываемой нефти и предотвращает выпадение парафинов и других АСПО на внутренней поверхности [4].

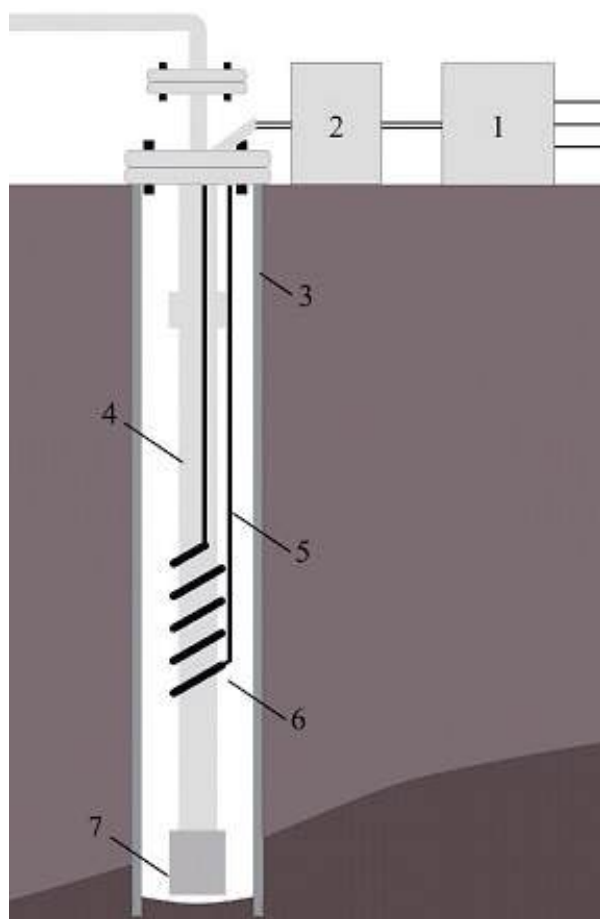
Применение индукционного нагрева позволяет воздействовать непосредственно на те участки НКТ, где более высока вероятность образования АСПО, и поддерживать температуру с высокой точностью.

Классическая реализации индукционного нагрева представлена на рисунке 1: система нагрева состоит из источника вторичного электропитания (ИВЭП) (выпрямитель и резонансный инвертор), конденсаторных батарей и индуктора, находящегося непосредственно в скважине. Конденсаторные батареи и индуктор образуют колебательный LC-контур.

Колебательный контур в системах индукционного нагрева выполняет следующие функции:

- формирование нагрузки для инвертора: LC-контур является нагрузкой силового генератора (инвертора), обеспечивая правильный режим работы силовых ключей и стабильную передачу энергии в индуктор [5];

- колебательный контур настраивается на резонансную частоту, соответствующую рабочей частоте инвертора. В резонансе реактивные сопротивления индуктора и конденсатора компенсируют друг друга, что позволяет минимизировать потери и максимально эффективно передавать энергию в НКТ [5].

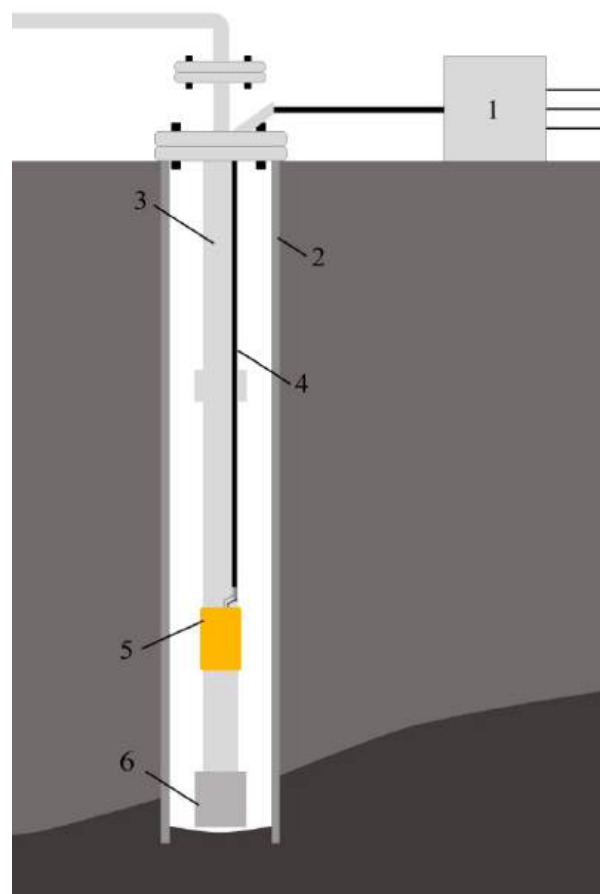


- 1 — источник вторичного электропитания;
 2 — конденсаторные батареи;
 3 — обсадная колонна;
 4 — насосно-компрессорная труба;
 5 — питающий кабель;
 6 — индуктор; 7 — электроприводной
 центробежный насос (ЭЦН)

1 — secondary power supply; 2 — capacitor
 banks; 3 — casing string; 4 — tubing pipe;
 5 — power cable; 6 — inductor; 7 — electric
 centrifugal pump

Рисунок 1. Схема расположения
 классического индукционного
 нагревателя в скважине с установкой
 электроприводного центробежного насоса
 (УЭЦН)

Figure 1. Layout of a classic induction heater
 in a well with an electric centrifugal pump
 installed



- 1 — ИВЭП; 2 — обсадная колонна;
 3 — насосно-компрессорная труба;
 4 — питающий кабель;
 5 — многофункциональный
 электромагнитный компонент; 6 — ЭЦН

1 — secondary power source; 2 — casing
 string; 3 — pump-compressor pipe;
 4 — power cable; 5 — multifunctional
 electromagnetic component;
 6 — electric-driven centrifugal pump

Рисунок 2. Схема расположения
 нагревателя на основе
 многофункционального электромагнитного
 компонента в скважине с УЭЦН

Figure 2. Schematic diagram
 of the arrangement of a heater based
 on a multifunctional electromagnetic
 component in a well with the installation
 of an electric-driven centrifugal pump

Классическую схему индукционного нагрева можно улучшить (рисунок 2), заменив индуктор и конденсатор на многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК).

МИЭК — это гибридный пассивный электротехнический элемент, объединяющий в единой конструкции функции индуктивности и емкости. МИЭК предназначен для использования в преобразовательной технике, источниках питания, фильтрах, стабилизаторах и других электротехнических устройствах, где требуется компактность, надежность и снижения количества дискретных компонентов [6]. В зависимости от схемы подключения токовыводов и числа секций один и тот же МИЭК может использоваться в различных режимах — как фильтр, дроссель, накопитель энергии, стабилизатор и др.

Применение МИЭК увеличивает надежность системы в 1,5–2 раза за счет снижения количества отдельных элементов и соединений, а также позволяет установить источник вторичного электропитания непосредственно в скважине, что открывает возможность более точно и селективно нагревать участки НКТ для предотвращения образования АСПО.

Конструкция МИЭК

МИЭК состоит из двух или более проводящих обкладок (обычно медных),

свернутых в спираль и разделённых диэлектрическим материалом (например полиимидом) (рисунок 3) [7]. Каждая обкладка имеет токовыводы, которые могут располагаться в начале, конце и по всей длине, что позволяет реализовать различные электрические соединения, выводы на клеммную колодку и МИЭК представлены на рисунке 4. Компонент может быть выполнен как односекционным, так и многосекционным, при этом секции могут быть магнитосвязаны между собой для расширения функциональности [6].

Благодаря спиральной конструкции обкладок обеспечивается одновременное проявление индуктивных и емкостных свойств, что позволяет использовать МИЭК как элемент LC-контуров.

Схемы подключения МИЭК варьируются: возможны последовательные,

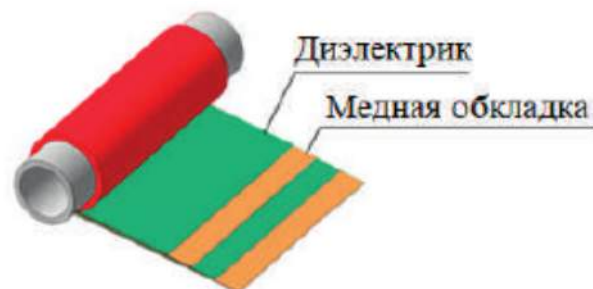


Рисунок 3. Конструкция многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

Figure 3. Design of multifunctional integrated electromagnetic component



Рисунок 4. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент

Figure 4. Multifunctional integrated electromagnetic component

параллельные и комбинированные соединения секций и обкладок, а также диагональное включение источника питания и нагрузки, что обеспечивает более 30 вариантов схем и позволяет гибко настраивать параметры устройства под конкретные задачи, например, стабилизацию тока или усиление напряжения в резонансных режимах [8]. Для реализации индукционно нагревательной системы (ИНС) источник вторичного электропитания подключается в одну из диагоналей МИЭК, что соответствует выводам 1 и 4 (рисунок 5), вторая диагональ с выводами 2 и 3 остается неподключенной [7].

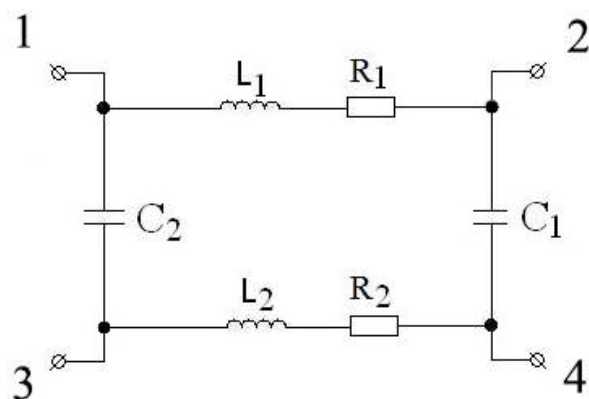


Рисунок 5. Схема замещения МИЭК

Figure 5. Equivalent circuit diagram of multifunctional integrated electromagnetic component

Математическое описание зависимости параметров МИЭК

Для эффективной работы индукционно-нагревательной системы (ИНС) необходимо, чтобы система работала в резонансе, т.е. частота инвертора была равной частоте внутренних колебаний RLC-контура (собственной частоты колебаний МИЭК) [9]. В последовательном резонансном контуре ток достигает максимума, что усиливает магнитное поле и, соответственно, нагрев. При резонансе реактивные мощности компенсируются, энергия передается в нагрузку с минимальными потерями.

Резонансная частота находится по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_{\text{экв}} \cdot C_{\text{экв}}}}. \quad (1)$$

В процессе работы происходит нагрев многофункционального компонента не от протекания тока, а преимущественно теплопередачей от насосно-компрессорной трубы, что приводит к изменениям основных параметров компонента емкости, индуктивности и к выходу из резонанса системы обогрева.

Режимов работы индукционно нагревательной системы два: профилактический, когда нагрев производится постоянно для предупреждения образования АСПО, и аварийный, когда происходит нагрев для ликвидации образовавшегося АСПО.

В первом случае система работает постоянно, а диапазон температурных колебаний составляет 20–30 °С.

Во втором случае система работает кратковременно и включается для плавления отложившихся парафинов на стенках НКТ. В этом случае диапазон колебаний температуры компонента составляет 30–60 °С.

Для понимания диапазона и характера изменения этих параметров было проведено данное исследование.

Были произведены теоретические расчеты емкости МИЭК и температурного коэффициента емкости (ТКЕ).

В виду схожести конструкции МИЭК с пленочными цилиндрическими конденсаторами расчет производился по тем же формулам, что и для пленочных конденсаторов. Емкость цилиндрического конденсатора определяется по формуле [10]:

$$C_{\text{ц}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot b}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (2)$$

где b — длина цилиндра;

R_2 — внешний радиус цилиндра;

R_l — внутренний радиус цилиндра;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость.

Расчетная емкость МИЭК определяется по формуле:

$$C = \sum_{n=1}^w \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot b}{\ln \frac{R_l + (2w-1) \cdot d_m + (2w-1) \cdot (d_{II} + d_k)}{R_l + (2w-1) \cdot d_m + (2w-2) \cdot (d_{II} + d_k)}}, \quad (3)$$

где b — длина МИЭК;

R_l — внутренний радиус МИЭК;

d_m — толщина медной пленки;

d_{II} — толщина полиимидной пленки;

d_k — толщина клеевого слоя;

w — количество витков;

$$C_2 = \sum_{n=1}^w \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot b(1 + \alpha_m \Delta T)}{\ln \frac{R_l + (2w-1) \cdot d_m(1 + \alpha_m \Delta T) + (2w-1) \cdot (d_{II}(1 + \alpha_{II} \Delta T) + d_k(1 + \alpha_k \Delta T))}{R_l + (2w-1) \cdot d_m(1 + \alpha_m \Delta T) + (2w-2) \cdot (d_{II}(1 + \alpha_{II} \Delta T) + d_k(1 + \alpha_k \Delta T))}}, \quad (5)$$

где α_m — коэффициент теплового расширения меди;

α_{II} — коэффициент теплового расширения полиимидной пленки;

α_k — коэффициент теплового расширения клеевого слоя;

ΔT — изменение температуры.

Результаты эксперимента

Для лабораторного макета расчетная емкость при температуре 25 °С соста-

ε — относительная диэлектрическая проницаемость полиимида.

Температурный коэффициент емкости находится по следующей формуле [11]:

$$TKE = \frac{C_1 - C_2}{C_1 \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (4)$$

где T_1 — начальная температура;

T_2 — конечная температура;

C_1 — емкость МИЭК при T_1 ;

C_2 — емкость МИЭК при T_2 определяется с учетом теплового изменения толщины и длин проводящих пластин и диэлектрической пленки по формуле:

вила 177,37 нФ, при 50 °С — 177,17 нФ, а ТКЕ — минус $45,9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. ТКЕ для пленочных конденсаторов составляет от минус 200 до $200 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [12].

Точной формулы определения индуктивности МИЭК (паразитной индуктивности пленочного конденсатора) нет, наиболее точным является измерение через резонансную частоту.

Эксперимент проводился на лабораторном макете МИЭК (рисунок 6), содер-

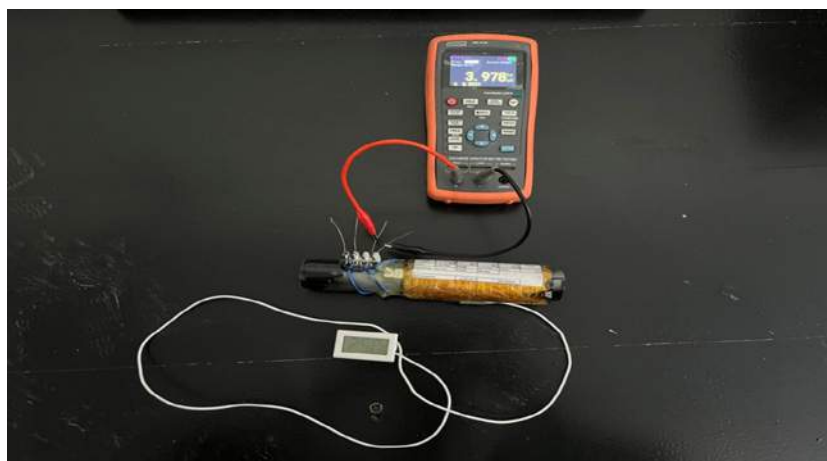


Рисунок 6. Лабораторный макет для исследования зависимости параметров МИЭК от температуры

Figure 6. Laboratory model for studying the dependence of the parameters of a multifunctional integrated electromagnetic component on temperature

жащем 20 витков. Обкладки выполнены из меди толщиной 20 мкм, диэлектрик из полиимида толщиной 12 мкм. Измерения производились RLC-метром АМ-3128 при трех температурах. Для этого компонент охлаждался до температуры минус 10 °С, выдерживался 30 мин, и снимались показания, далее нагревался до комнатной температуры 25 °С и также выдерживался 30 мин, и снимались показания, далее нагревался до температуры 50 °С, выдерживался 30 мин, и снимались показания. Результаты представлены в таблице 1.

Анализ результатов эксперимента

Далее был произведен анализ полученных данных. Построенные графики, отражающие изменения параметров, приведены на рисунках 7–9. Из рисунка

7 видно, что с увеличением температуры происходит снижение емкости, помимо этого, с ростом частоты электрическая емкость МИЭК снижается, достигая минимума при частоте 1 кГц, и далее увеличивается.

Погрешность между теоретическим расчетом емкости и измеренным значением составила 5,7 %. Температурный коэффициент емкости МИЭК составил минус $59 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ при частоте 100 Гц, что на 28 % отличается от теоретического.

Погрешность связана с наличием воздушных пузырьков и пыли в клеевом слое полиимидной пленки из-за ручного изготовления МИЭК. Температурный коэффициент расширения воздуха больше, чем у полиимида и меди.

Таблица 1. Параметры МИЭК при разной температуре и частоте измерения

Table 1. Parameters of a multifunctional integrated electromagnetic component at different temperatures and measurement frequencies

$f, \text{ кГц}$	$C \text{ при } T, \text{ нФ}$			$L_1 \text{ при } T, \text{ мкГн}$			$L_2 \text{ при } T, \text{ мкГн}$			$R_1 \text{ при } T, \text{ мОм}$			$R_2 \text{ при } T, \text{ мОм}$		
	-10 °С	25 °С	50 °С	-10 °С	25 °С	50 °С	-10 °С	25 °С	50 °С	-10 °С	25 °С	50 °С	-10 °С	25 °С	50 °С
0,1	169,04	167,2	166,83	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	34	36	38	34	34	35
0,12	168,06	167,05	166,32	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	32	34	41	32	34	35
1	164,32	163,10	162,39	4,10	4,20	4,30	4,20	4,20	4,2	37	38	42	36	37	39
10	164,94	163,98	163,30	3,98	4,07	4,14	4,02	4,17	4,23	38	39	44	37	39	41
40	169,37	168,82	167,90	3,89	3,95	3,99	3,93	4,05	4,17	37	37	43	35	36	39
100	198,29	198,20	194,86	3,82	3,87	3,93	3,85	3,98	4,11	68	69	76	67	68	73

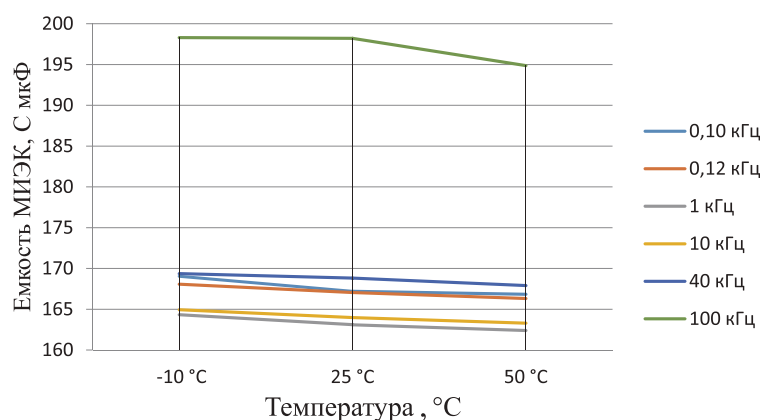


Рисунок 7. Зависимость емкости МИЭК от температуры для различных частот

Figure 7. Dependence of the capacitance of the multifunctional integrated electromagnetic component on temperature for different frequencies

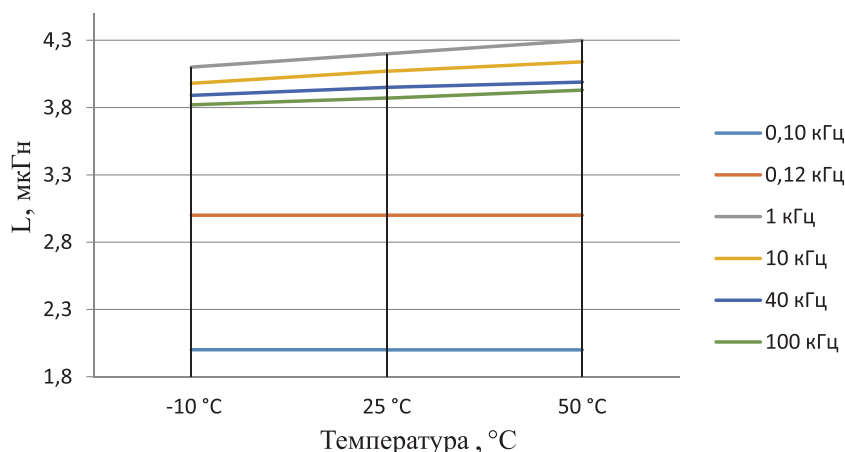


Рисунок 8. Зависимость индуктивности первой обкладки МИЭК от температуры для различных частот

Figure 8. Dependence of the inductance of the first plate of the multifunctional integrated electromagnetic component on temperature for different frequencies

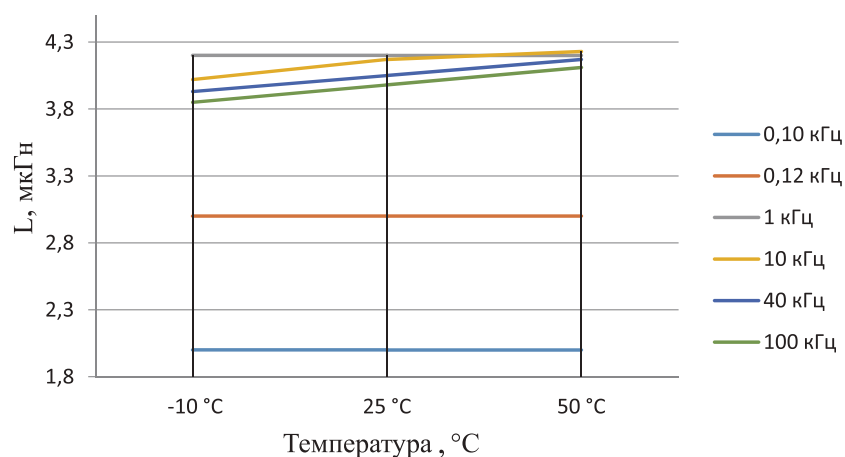


Рисунок 9. Зависимость индуктивности второй обкладки МИЭК от температуры для различных частот

Figure 9. Dependence of the inductance of the second plate of the multifunctional integrated electromagnetic component on temperature for different frequencies

Обратная температурная зависимость наблюдается в индуктивности МИЭК. Из рисунков 8, 9 видно, что с увеличением температуры увеличивается и индуктивность на 4 %.

Изменение емкости в системе индукционного нагрева можно компенсировать параллельной установкой с МИЭК емкости с положительным ТКЕ. Изменение индуктивности не окажет сильного влияния на резонансную частоту при гибридной схеме «МИЭК + класси-

ческий индуктор», так как индуктивность МИЭК меньше чем у классического индуктора.

Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что с ростом температуры емкость МИЭК снижается, что согласуется с теоретическими расчетами. Полученный температурный коэффициент емкости (ТКЕ) составил минус $59 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (при частоте 100 Гц), что на 28 % превы-

шает расчетное значение (минус $45,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) из-за наличия воздушных включений в ручном образце.

2. Установлено, что индуктивность МИЭК увеличивается при нагреве (на $\approx 3 \%$ в диапазоне минус $10\text{--}50 \text{ }^{\circ}\text{C}$), что может привести к отклонению резонансной частоты системы. Однако в гибридных схемах («МИЭК + классический индуктор») изменение индуктивности МИЭК незначительно влияет на суммарную индуктивность колебательного контура за счет большей индуктивности классического индуктора по сравнению с МИЭК. Показано, что зависимость параметров МИЭК от частоты носит

нелинейный характер: минимальная емкость наблюдается при 1 кГц , что требует учета при проектировании резонансных систем. Для стабилизации характеристик предлагается использовать параллельное подключение термокомпенсирующих конденсаторов с положительным ТКЕ.

3. Результаты позволяют оптимизировать работу индукционных нагревательных систем в скважинах, минимизируя энергопотери при изменении температуры. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение долговременной стабильности МИЭК в условиях высоких давлений и агрессивных сред.

Список источников

1. Рогачев М.К., Александров А.Н. Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 596-605. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.13. EDN: IZZZAO.
2. Дроздов А.Н., Чернышов К.И. Технология борьбы с АСПО при насосной эксплуатации скважин с использованием концентрических колонн НКТ // Деловой журнал Neftegaz. RU. 2024. № 5 (149). С. 68-71. EDN: XVWNHK.
3. Пат. WO 2015030621 A1 РФ, МПК E 21 В 43/24. Способ увеличения дебита нефтяных скважин и устройство для его осуществления / Абрамова А.В., Баязитова М.В., Печков А.А., Тимашев Э.О. Заявлено 28.08.2013; Опубл. 03.05.2015.
4. Логвинов А.И. Термические методы борьбы с АСПО и гидратообразованием // Инженерная практика. 2012. № 3. С. 136–139.
5. Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева [Электронный ресурс]. URL: <http://old.icct.ru/node/82> (дата обращения: 21.01.2025).
6. Кириллов Р.В., Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Хазиева Р.Т. Исследование повышающего преобразователя постоянного напряжения на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 68-81.

DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-68-81.
EDN: YICONH.

7. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методика оценки надежности сложных электромагнитных элементов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 11. EDN: VIDUPR.

8. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // Электричество. 2020. № 1. С. 32-38. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-1-32-38. EDN: WFNDMP.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615776 «Регулирование мощности индукционной нагревательной системы посредством широтно-импульсной модуляции в зависимости от температуры нагреваемого объекта» / Хлюпин П.А., Хазиева Р.Т., Афлятунов Р.Р., Хабибуллин Т.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 марта 2023 г.

10. Ёмкость цилиндрического конденсатора // Энергетик [Электронный ресурс]. URL: <https://energetik.com.ru/zakony-elektrotehniki-korotko/elektricheskaya-yomkost-yomkost-kondensatora/yomkost-cilindricheskogo-kondensatora> (дата обращения: 12.04.2025).

11. Исследование линейных диэлектриков: автоматизированный лабораторный практикум: метод. указания по выполнению лабораторной работы [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/7306647/page:3/> (дата обращения: 05.04.2025).

12. Типы диэлектриков в керамических конденсаторах // Chip Info [Электронный ресурс]. URL: <https://chipinfo.pro/elements/capacitor/>

dielectric_in_ceramic_caps.shtml (дата обращения: 02.05.2025).

References

1. Rogachev M.K., Aleksandrov A.N. Obosnovaniye kompleksnoy tekhnologii preduprezhdeniya obrazovaniya asfal'tosmoloparafinovykh otlozheniy pri dobyche vysokoparafinistoy nefti pogrulzhnyimi elektrotsentrobezhnyimi nasosami iz mnogoplastovykh zalezhey [Justification of a Comprehensive Technology for Preventing the Formation of Asphalt-Resin-Paraffin Deposits during the Production of Highly Paraffinic Oil by Electric Submersible Pumps from Multifunctional Deposits]. *Zapiski Gornogo instituta — Journal of Mining Institute*, 2021, Vol. 250, pp. 596-605. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.13. EDN: IZZZAO. [in Russian].

2. Drozdov A.N., Chernyshov K.I. Tekhnologiya bor'by s ASPO pri nasosnoy ekspluatatsii skvazhin s ispol'zovaniyem kontsentriruyemykh kolonn NKT [Technology for Combating ASPD during Pumping Operation of Wells Using Concentric Tubing Columns]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU — Business Journal Neftegaz.RU*, 2024, No. 5 (149), pp. 68-71. EDN: XVWNHK. [in Russian].

3. Abramova A.V., Bayazitova M.V., Pechkov A.A., Timashev E.O. *Sposob uvelicheniya debita neftyanykh skvazhin i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for Increasing the Flow Rate of Oil Wells and Device for Its Implementation]. Patent RF, No. WO 2015030621, 2015. [in Russian].

4. Logvinov A.I. Termicheskiye metody bor'by s ASPO i gidratoobrazovaniyem [Thermal Methods for Combating ASPD and Hydrate Formation]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2012. No. 3, pp. 136-139. [in Russian].

5. *Prostoy laboratornyy invertor dlya induktsionnogo nagreva* [Simple Laboratory Inverter for Induction Heating] [Electronic Resource]. URL: <http://old.icct.ru/node/82> (accessed 21.01.2025). [in Russian].

6. Kirillov R.V., Aflyatunov R.R., Vasil'yev P.I., Khaziyeva R.T. Issledovaniye povyshayushchego preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya na baze mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta [Investigation of a DC Voltage Booster Converter Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and*

Data Processing Facilities and Systems, 2023, No. 1, Vol. 19, pp. 68-81. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-68-81. EDN: YICOHK. [in Russian].

7. Konesev S.G., Khaziyeva R.T. Metodika otsenki nadezhnosti slozhnykh elektromagnitnykh elementov [Method for Assessment the Reliability of Complex Electromagnetic Components]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2015, No. 1-1, pp. 11. EDN: VIDUPR. [in Russian].

8. Konesev S.G., Khaziyeva R.T. Matematicheskoye i fizicheskoye modelirovaniye induktivno-yemkostnykh preobrazovateley [Mathematical and Physical Modeling of Combined Inductive-and-Capacitive Converters on the Basis of a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Elektrichestvo — Elektrichestvo*, 2020, No. 1, pp. 32-38. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-1-32-38. EDN: WFNDMP. [in Russian].

9. Khlyupin P.A., Khaziyeva R.T., Aflyatunov R.R., Khabibullin T.R. *Regulirovaniye moshchnosti induktsionnoy nagrevatel'noy sistemy posredstvom shirotno-impul'snoy modulyatsii v zavisimosti ot temperatury nagrevayemogo ob'yekta* [Regulation of the Power of an Induction Heating System by Means of Pulse-Width Modulation Depending on the Temperature of the Heated Object]. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2023615776, 2023. [in Russian].

10. Yomkost' tsilindricheskogo kondensatora [Capacitance of a Cylindrical Capacitor]. *Energetik* [Power Engineer] [Electronic Resource]. URL: <https://energetik.com.ru/zakony-elektrotekhniki-korotko/elektricheskaya-yomkost-yomkost-kondensatora/yomkost-cilindricheskogo-kondensatora> (accessed 12.04.2025). [in Russian].

11. *Issledovaniye lineynykh dielektrikov: avtomatizirovannyy laboratornyy praktikum: metod. ukazaniya po vypolneniyu laboratornoy raboty* [Study of Linear Dielectrics: Automated Laboratory Practical Training: Methodical Instructions for Performing Laboratory Work] [Electronic Resource]. URL: <https://studfile.net/preview/7306647/page:3/> (accessed 05.04.2025). [in Russian].

12. Tipy dielektrikov v keramicheskikh kondensatorakh [Types of Dielectrics in Ceramic Capacitors]. *Chip Info* [Electronic Resource]. URL: https://chipinfo.pro/elements/capacitor/dielectric_in_ceramic_caps.shtml (accessed 02.05.2025). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 28.08.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 24.09.2025.

The article was submitted 28.08.2025; approved after reviewing 17.09.2025; accepted for publication 24.09.2025.

Научная статья

УДК 621.313.04

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-68-80

НОВЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Флур Рашитович Исмагилов****Flur R. Ismagilov**

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

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

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

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

аспирант кафедры электромеханики,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

Актуальность

Одним из трендов современного электромашиностроения является повышение удельной мощности электрических машин (ЭМ), что может достигаться различными способами. Одним из путей повышения удельной мощности ЭМ является разработка новых типов обмоток. Выполнение прессованных обмоток позволяет улучшить характеристики ЭМ, а создание прессованных обмоток и ЭМ с их применением возможно. Большинство работ рассматривает выполнение прессованных обмоток с проводами диаметром более 1 мм. Экспериментальных исследований прессованных обмоток, выполненных из литцендрата, не проводилось. В связи с этим в настоящей статье рассматривается выполнение и исследование, в том числе экспериментальными методами, прессованных обмоток из обмоточных проводов различных диаметров и из литцендрата.

Цель исследования

Изготовить, смоделировать и исследовать экспериментальными методами прессованные обмотки, выполненные из обмоточных проводов различного диаметра.

Ключевые слова

электрическая машина,
обмоточный провод,
прессованные обмотки,
удельная мощность

Методы исследования

В рамках исследования применяются аналитические методы исследования, компьютерное моделирование методом конечных объемов, метод экспериментальных исследований.

Результаты

Установлено, что сопротивление в обмотках, выполненных из провода диаметром 1 мм, ниже на 6–16 % относительно обмоток, выполненных из проводов меньшего диаметра. Также экспериментальными методами получено, что падение напряжения в катушках диаметром провода 1 мм ниже в 1,54–1,86 раза относительно остальных сечением обмоточного провода 0,355 мм. Это может быть связано с тем, что в процессе изготовления прессованных обмоток часть проводников подвергается деформации, что в свою очередь приводит к изменению их сопротивления. Причем этот эффект выражен сильнее в катушках с большим количеством жил, где сечение каждого провода невелико. На основании проведенных исследований построены и валидированы компьютерные модели прессованных обмоток, обеспечивающие точность моделирования 2–10 %, что позволяет применять их при проектировании ЭМ с прессованными обмотками. Таким образом, прессованные обмотки возможны для выполнения и являются перспективным путем к повышению удельной мощности электрических машин.

Для цитирования: Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Уразбахтин Р. Р. Новые методы моделирования и изготовления обмоток электрических машин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 68-80. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-68-80>.

Original article

NEW METHODS OF MODELING AND MANUFACTURING ELECTRIC MACHINE WINDINGS

Relevance

One of the trends in modern electrical engineering is to increase the specific power of electric machines (EM), which can be achieved in various ways. One of the ways to increase the specific power of EM is to develop new types of windings. The implementation of pressed windings makes it possible to improve the EM characteristics, and the creation of pressed windings and EM using them is possible. Most of the work considers the implementation of pressed windings with wires with a diameter of more than 1 mm. Experimental studies of pressed windings made of litzendrate have not been conducted. In this regard, this article discusses the implementation and investigation, including by experimental methods, of pressed windings from winding wires of various diameters and from a litzendrate.

Aim of research

To produce, simulate and investigate by experimental methods pressed windings made of winding wires of various diameters.

Research methods

The research uses analytical research methods, computer modeling using the finite volume method, and the experimental research method.

Results

It has been found that the resistance in windings made of wire with a diameter of 1 mm is lower by 6–16 % relative to windings made of smaller

Keywords

electric machine, winding wire, pressed windings, specific power

diameter wires. Experimental methods have also shown that the voltage drop in coils with a wire diameter of 1 mm is 1.54–1.86 times lower relative to the rest of the winding wire section of 0.355 mm. This may be due to the fact that during the manufacture of pressed windings, part of the conductors is deformed, which in turn leads to a change in their resistance. Moreover, this effect is more pronounced in coils with a large number of cores, where the cross-section of each wire is not large. Based on the conducted research, computer models of pressed windings have been built and validated, providing modeling accuracy of 2–10 %, which allows them to be used in the design of EM with pressed windings. Thus, pressed windings are possible to perform and are a promising way to increase the specific power of electric machines.

For citation: Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Urazbakhtin R. R. Novyye metody modelirovaniya i izgotovleniya obmotok elektricheskikh mashin [New Methods of Modeling and Manufacturing Electric Machine Windings]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 68-80 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-68-80>.

Введение

Одним из трендов современного электромашиностроения является повышение удельной мощности электрических машин (ЭМ), что может достигаться различными способами. Повышение удельной мощности ЭМ может достигаться за счет применения материалов с высокими характеристиками — электротехнических сталей с высокими индукциями насыщения, проводников с низкими удельными сопротивлениями, высококоэрцитивных постоянных магнитов и т. д. При этом тренды в области авиации, в том числе беспилотной, обуславливают необходимость мобилизации усилий и в перспективе ближайших лет достижения удельной мощности ЭМ на уровне 10–12 кВт/кг. По прогнозу, приведенному в [1], к 2030-м годам целесообразно ставить цели достижения удельной мощности ЭМ порядка 20 кВт/кг, а к 2040-м годам — 50 кВт/кг. Причем вышеуказанные удельные мощности должны обеспечиваться совместно с системами, сопровождающими работу ЭМ, например, блоками электроники, системами охлаждения. Вышесказанное обуславливает необходимость разработки альтернативных решений по повышению удельной мощности ЭМ.

Одним из путей повышения удельной мощности ЭМ является разработка новых типов обмоток. При разработке новых типов обмоток могут решаться задачи снижения потерь в обмотке и улучшения теплоотвода от обмотки. Также при разработке новых видов обмоток целесообразно рассматривать возможность повышения коэффициента заполнения паза, то есть эффективного использования свободного пространства в пазу.

Вышеуказанные задачи могут решаться за счет применения прессованных обмоток. Исследованиям прессованных обмоток посвящены работы [2–6]. В [2] проведено исследование применения прессованных обмоток для интегрированного стартера-генератора методами компьютерного моделирования. Было получено, что без повреждения изоляции жил можно достичь коэффициента заполнения паза до 0,72 при спрессовке проводов с полиамидной изоляцией диаметром 1,35 мм. В [3] был создан экспериментальный образец ротора ЭМ с прессованными обмотками, выполненными из провода 21 AWG, с достижением коэффициента заполнения паза 0,75. В [4] для снижения потерь на переменном токе предложено выполнение

прессованных обмоток из литцендрата или с применением транспозиции проводников. Достигнут коэффициент заполнения паза 0,772 в случае применения прессованной обмотки. Получено, что за счет применения прессованной обмотки сопротивление постоянному току может быть снижено на величину до 18 %. В [5] исследованы прессованные обмотки трапецеидальной формы. Установлено, что при давлении около 400 МПа происходит деформация обмоточного провода — его сечение деформируется из круглого в шестигранное. Также получено, что при давлении около 300 МПа возможно достижение коэффициента заполнения паза на уровне 0,7–0,8. Установлено, что за счет прессования обмотки ее термическое сопротивление может быть снижено на величину до 46 %. В [6] создан и исследован экспериментальный образец ЭМ с номинальной мощностью 6 кВт при частоте вращения до 1300 об/мин, обмотка которого выполнялась прессованной из алюминиевого провода диаметром 1,4 мм. Было получено, что по сравнению с ЭМ с аналогичными характеристиками, обмотка которой выполнена из медного провода диаметром 1,06 мм непрессованной, достигнуто снижение фазного сопротивления приблизительно на 10 % и снижение массы ЭМ приблизительно на 13,3 %.

Ограничением применения прессованных обмоток является необходимость применения сборных магнитопроводов для обеспечения возможности установки обмоток на зубцы либо выполнения зубцов магнитопроводов ЭМ без коронок. Вышеуказанные особенности необходимо обязательно учитывать при проектировании ЭМ с прессованными обмотками.

Таким образом, анализ современных работ показал, что выполнение прессованных обмоток позволяет улучшить характеристики ЭМ, а создание прессо-

ванных обмоток и ЭМ с их применением возможно. Можно заметить, что большинство работ рассматривает выполнение прессованных обмоток с проводами диаметром более 1 мм. Также можно заметить, что экспериментальных исследований прессованных обмоток, выполненных из литцендрата, не проводилось.

В настоящей статье рассматривается выполнение и исследование, в том числе экспериментальными методами, прессованных обмоток из обмоточных проводов различных диаметров и из литцендрата.

Статья структурирована следующим образом. В разделе «Материалы и методы» описан процесс изготовления прессованных обмоток из обмоточных проводов различных диаметров. В разделе «Исследования методами компьютерного моделирования и экспериментальными методами» описаны исследования прессованных обмоток методами компьютерного моделирования и эксперимента. В заключении сформулированы выводы по проделанной работе.

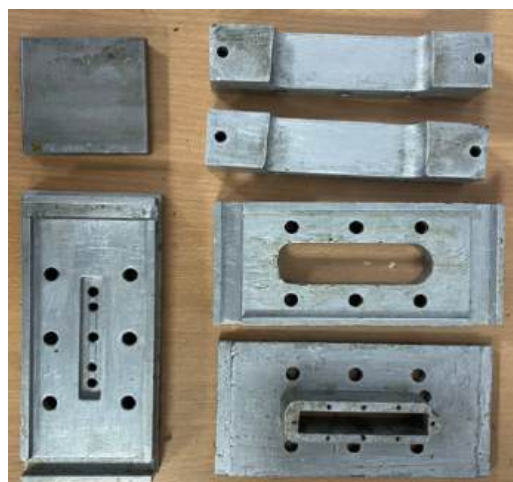
Материалы и методы

В таблице 1 приведены параметры изготавливаемых прессованных обмоток. На рисунке 1 представлена оснастка для изготовления прессованных обмоток.

При изготовлении прессованной обмотки первоначально проводится заготовка провода. Набирается необходимое количество жил требуемой длины из обмоточного провода выбранного диаметра, которое протягивается на специализированной оснастке. В результате этого формируется многожильный провод для выполнения прессованной обмотки. Далее заготовленный провод наматывается на шпильку оснастки, которая предварительно изолируется полиамидной пленкой (рисунок 2).

Таблица 1. Параметры изготавливаемых прессованных обмоток**Table 1.** Parameters of the manufactured pressed windings

Диаметр провода, мм	1	0,355	0,2
Количество жил в витке	8	66	220
Количество витков	12	12	12
Коэффициент заполнения медью	0,57	0,59	0,61



a)



b)

Рисунок 1. Оснастка для изготовления прессованных обмоток: в разобранном виде (a); в собранном виде (b)**Figure 1.** Tooling for the production of pressed windings: in disassembled form (a); in assembled form (b)

После этого производится сборка оснастки за исключением верхней крышки. В таком состоянии производится предварительный нагрев оснастки с находящимся в ней обмоточным проводом в целях улучшения адгезии компаунда с обмоточным проводом. Поверхности оснастки, которые не должны контактировать с компаундом, промазываются специализированным герметиком. После этого производится заливка компаунда в оснастку. В настоящем исследовании использовался компаунд ЭК-1М [7], который обладает высокими теплопроводностью и электроизоляционными свойствами. Далее происходит установка верхней крышки оснастки и спрессовка (рисунок 3).

После спрессовки оснастка стягивается специализированным крепежом. Далее обмотка в оснастке оставляется до момента полимеризации компаунда. В конце готовая прессованная обмотка извлекается из оснастки, производится зачистка выводных концов провода. Изготовленные обмотки показаны на рисунке 4.

Процесс изготовления прессованных обмоток из литцендрата аналогичен процессу изготовления прессованных обмоток из многожильного провода, однако в нем не требуется проводить изолирование провода стеклотканью, так как не происходит распушения обмоточного провода. Прессованная обмотка, изготовленная из литцендрата, представлена на рисунке 5.



Рисунок 2. Намотка заготовленного провода на шпульку оснастки

Figure 2. Winding the prepared wire onto the tool bobbin



Рисунок 3. Спрессовка залитого компаундом провода в оснастке

Figure 3. Compression of a compound-filled wire in a tool



a)



b)



c)

Рисунок 4. Изготовленные прессованные обмотки: из провода диаметром 0,2 мм (a); из провода диаметром 0,355 мм (b); из провода диаметром 1,0 мм (c)

Figure 4. Manufactured pressed windings: from a wire with a diameter of 0.2 mm (a); from a wire with a diameter of 0.355 mm (b); from a wire with a diameter of 1.0 mm (c)



Рисунок 5. Изготовленная из литцендрата прессованная обмотка

Figure 5. Litzendrate-made pressed winding

Исследования методами компьютерного моделирования и экспериментальными методами

Изготовленные образцы прессованных обмоток далее были исследованы методами эксперимента и компьютерного моделирования. Далее прессованная обмотка из обмоточного провода диаметром 1 мм будет называться «обмотка 1», прессованная обмотка из обмоточного провода диаметром 0,355 мм — «обмотка 0,355», прессованная обмотка из обмоточного провода диаметром 0,2 мм — «обмотка 0,2», прессованная обмотка из литцендрата, выполненного обмоточным проводом диаметром 1 мм, — «обмотка 1 литц.».

После изготовления прессованных обмоток каждая из них проверялась генератором импульсов высокого напряжения на обрыв — при наличии замыкания индуктивность катушки так же, как и сопротивление резко падает. С помощью мегаомметра Е6-32 контролировалось значение сопротивления изоляции каждой из катушек, измерения проводились при пробивном напряжении 500 В. С помощью измерителя иммитанса Е7-32 измерялись значения индуктивности. С помощью миллиомметра Е6-25 измерялись значения сопротивления. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Анализируя таблицу 2, можно заметить, что сопротивление в обмотках, выполненных из провода диаметром

1 мм, ниже на 6–16 % относительно обмоток, выполненных из проводов меньшего диаметра.

Также можно заметить, что наибольшее сопротивление изоляции у прессованных обмоток, выполненных из обмоточного провода диаметром 1 мм. Связано это с большей толщиной изоляции провода 1 мм по отношению к проводам диаметрами 0,355 и 0,2 мм. Как было отмечено ранее, литцендрат не изолировался стекловолоконной лентой. Результаты экспериментальных исследований показали, что при условии использования литцендрата из провода диаметром 1 мм межжильного и межвиткового в прессованной обмотке нет.

Далее проводились испытания прессованных обмоток на нагрев под действием постоянного тока. С целью оптимизации временных затрат при проведении испытаний для получения удельных тепловых характеристик катушек было решено пускать электрический ток по 1/8 общего сечения активного проводника обмотки. Прессованная обмотка, выполненная из обмоточного провода диаметром 0,2 мм, таким образом не испытывалась. Данные испытаний фиксировались тепловизором марки NETD Testo 875-1 при достижении установившегося режима по температуре внешней поверхности прессованной катушки. Распределения тепла для исследуемых обмоток показаны на рисунках 6–8. Результаты экспериментальных исследо-

Таблица 2. Результаты измерений сопротивления изоляции, индуктивности и сопротивления для прессованных обмоток

Table 2. Results of insulation resistance, inductance, and resistance measurements for pressed windings

Диаметр проводника, мм	Марка компаунда	Сопротивление изоляции	Активное сопротивление, мОм	Индуктивность, мкГн
1	ЭК-1М	> 1ТОм	7,45	6,08
1 (литц.)	ЭК-1М	> 1ТОм	7,4	6,1
0,355	ЭК-1М	168 кОм	8,56	5,24
0,2	ЭК-1М	240 кОм	8,15	5,85

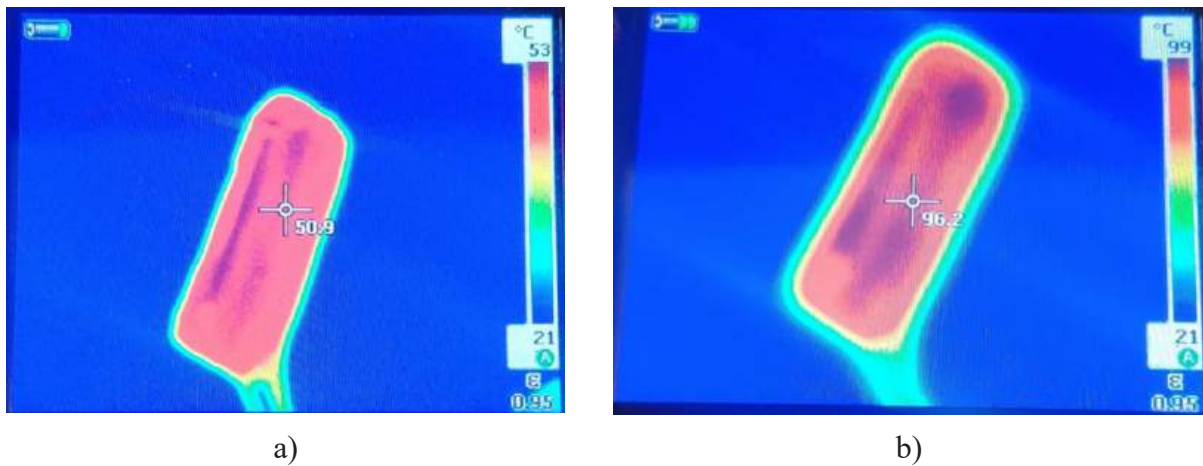


Рисунок 6. Распределение тепла «обмотки 1»: при токе 10 А (а); при токе 15 А (б)

Figure 6. Heat distribution of «winding 1»: at a current of 10 A (a); at a current of 15 A (b)

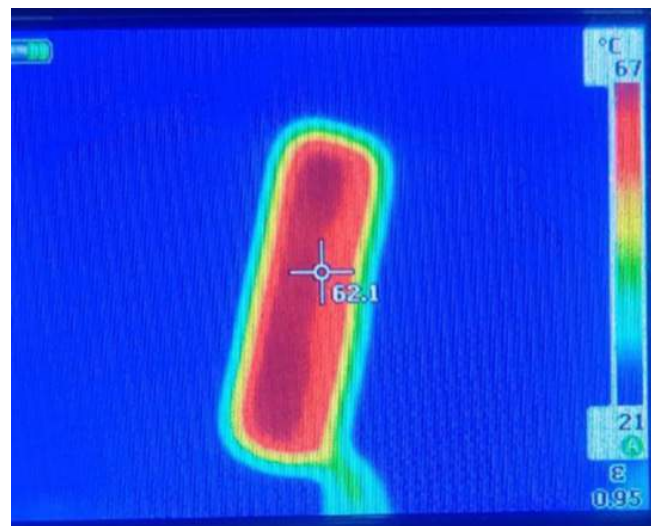


Рисунок 7. Распределение тепла «обмотки 0,355» при токе 10 А

Figure 7. Heat distribution of the «0.355 winding» at a current of 10 A



Рисунок 8. Распределение тепла «обмотки 1 литц.»: при токе 10 А (а); при токе 15 А (б)

Figure 8. Heat distribution of «winding 1 litts.»: at a current of 10 A (a); at a current of 15 A (b)

ваний по снятию тепловых характеристик прессованных обмоток приведены в таблице 3.

Анализируя таблицу 3, можно заметить, что падение напряжения в катушках с диаметром провода 1 мм ниже в 1,54–1,86 раза относительно падения напряжения в катушке с сечением обмоточного провода 0,355 мм.

На основании проведенных экспериментальных исследований были построены компьютерные модели прессованных обмоток, выполненных из много-

жильного провода, в специализированном программном обеспечении Ansys Workbench, соответствующие пропусканию постоянного тока 10 А в описанном выше эксперименте. При проведении компьютерного моделирования были учтены результаты работ [8–11] в части построения сетки, задания граничных условий и настройки компьютерной модели. На рисунке 9 показана сеточная модель прессованной обмотки и ее качество. На рисунке 10 показаны сеточные модели для получения приведенной

Таблица 3. Результаты испытаний по снятию тепловых характеристик прессованных катушек

Table 3. Test results for measuring the thermal characteristics of pressed coils

Диаметр, мм	Марка компаунда	I = 10 A		I = 15 A	
		T, °C	U, В	T, °C	U, В
1	ЭК-1М	53	0,674	99	1,161
1 (литц.)	ЭК-1М	64	0,721	99	1,61
0,355	ЭК-1М	67	1,1	Лавинный нагрев	

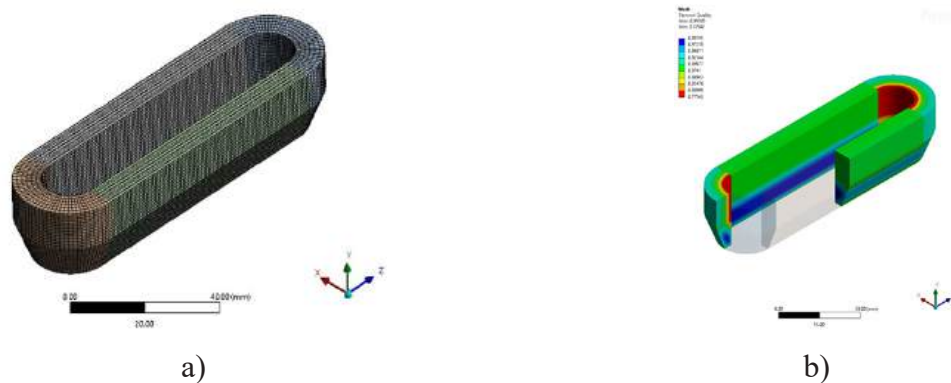


Рисунок 9. Сеточная модель прессованной обмотки (a) и ее качество (b)

Figure 9. Mesh model of a pressed winding (a) and its quality (b)

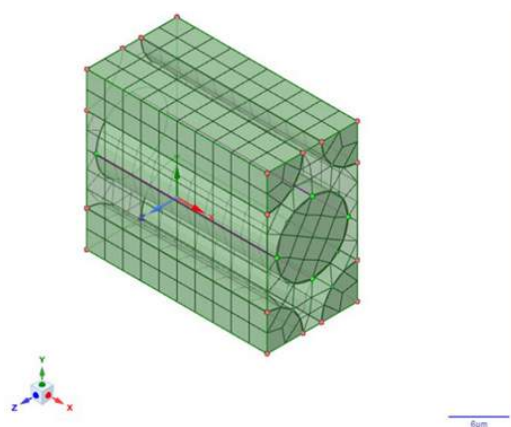


Рисунок 10. Сеточные модели для получения приведенной теплопроводности прессованной обмотки из многожильного провода

Figure 10. Grid models for obtaining the reduced thermal conductivity of a pressed multi-wire winding

теплопроводности прессованной обмотки из многожильного провода и из литцендрата.

На рисунках 11 и 12 представлено тепловое распределение для прессованных обмоток, полученное методом компьютерного моделирования.

Исходя из рисунков 11 и 12, можно сделать вывод о том, что компьютерные

модели соответствуют экспериментальным данным с отклонением не более 2–10 %, что позволяет использовать созданные валидированные компьютерные модели прессованных обмоток из многожильного провода при проектировании электрических машин.

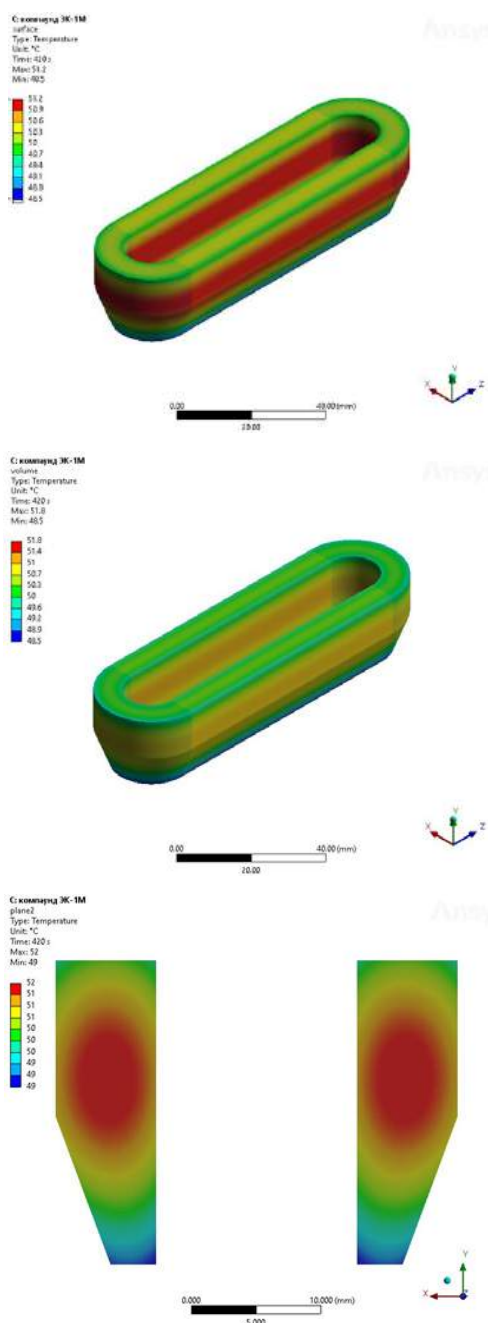


Рисунок 11. Тепловое распределение для «обмотки 1», полученное методом компьютерного моделирования

Figure 11. Thermal distribution for «winding 1» obtained by computer simulation

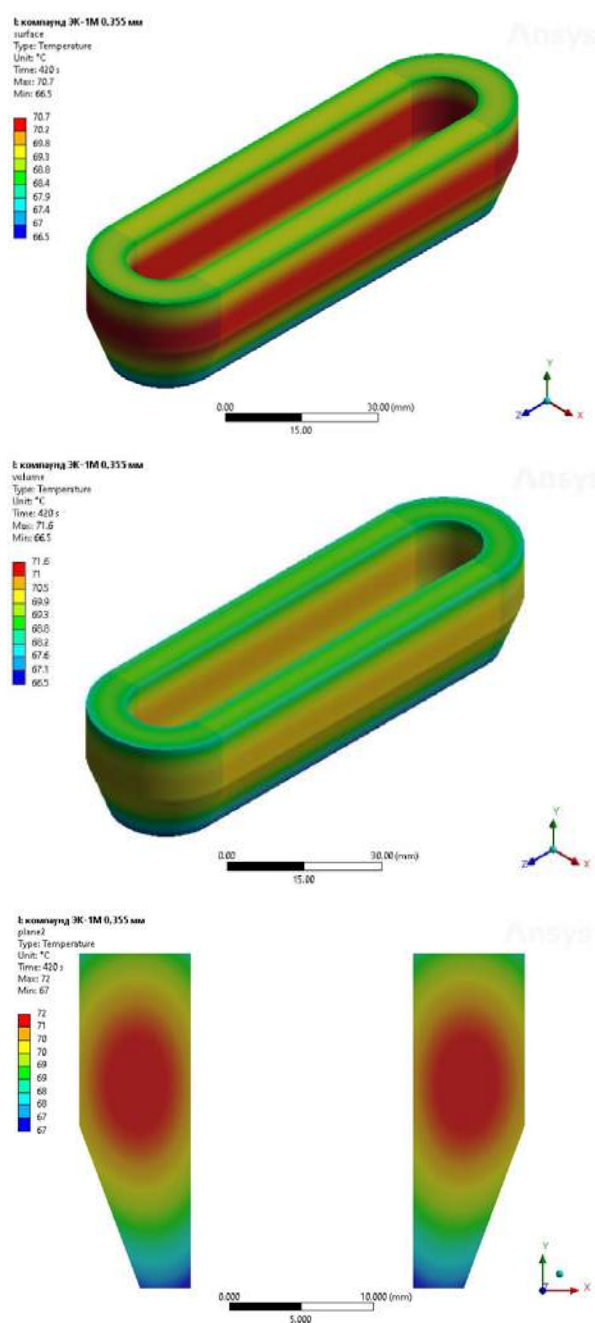


Рисунок 12. Тепловое распределение для «обмотки 0,355», полученное методом компьютерного моделирования

Figure 12. Thermal distribution for «winding 0.355» obtained by computer simulation

Выводы

В настоящей работе представлен обзор прессованных обмоток, применение которых открывает путь к повышению удельной мощности электрических машин. На основании проведенного обзора установлено, что при исследовании прессованных обмоток мало рассматриваются процессы их изготовления и исследований. В связи с этим в настоящей работе рассмотрено выполнение прессованных обмоток из обмоточных проводов различных диаметров, а также из литцендрата.

В результате изготовления прессованных обмоток установлено, что при укладывании провода диаметром 1 мм есть риск повреждения изоляции в местах сгиба при намотке на шпульку. Важно отметить, что чем меньше диаметр обмоточного провода, тем сложнее зачистка изоляции проводников. Для провода диаметром 0,2 мм механическая зачистка стандартными способами требует больших временных и трудовых затрат. В связи с этим была апробирована химическая очистка лаковой изоляции провода. В ходе химической очистки изоляции проводники предварительно окунались в кислоту, после чего окунались в расплавленный припой на 8–15 с. По ходу химической зачистки были выявлены следующие проблемы: 1) при погружении в припой строго необходимо не допускать контакта между жилами, так как изоляции в местах соприкосновения жил не снимается, что трудно обеспечить при большом количестве жил; 2) при погружении выводов катушки в паяльную ванну некоторое количество припоя может остаться на проводах, что делает невозможным дальнейшую очистку выводов от обуглившегося изоляционного лака. Получено, что изготовление прессованных обмоток возможно из многожильного провода и из литцендрата.

Экспериментальными методами установлено, что сопротивление в обмотках, выполненных из провода диаметром 1 мм, ниже на 6–16 % относительно обмоток, выполненных из проводов меньшего диаметра. Также экспериментальными методами получено, что падение напряжения в катушках диаметром провода 1 мм ниже в 1,54–1,86 раза относительно падения напряжения в катушке с сечением обмоточного провода 0,355 мм. Это может быть связано это с тем, что в процессе изготовления прессованных обмоток часть проводников подвергается деформации, что в свою очередь приводит к изменению их сопротивления. Причем этот эффект выражен сильнее в катушках с большим количеством жил, где сечение каждого провода невелико.

На основании проведенных исследований построены и валидированы компьютерные модели прессованных обмоток, обеспечивающие точность моделирования 2–10 %, что позволяет применять их при проектировании ЭМ с прессованными обмотками.

Таким образом, прессованные обмотки возможны к выполнению и являются перспективным путем к повышению удельной мощности электрических машин. Выполнение прессованных обмоток из литцендрата является перспективным с точки зрения снижения потерь на переменном токе в ЭМ, причем при выполнении прессованных обмоток из литцендрата не требуется изоляция проводов стеклотканью. При проектировании ЭМ с прессованными обмотками важно тщательно подходить к выбору диаметра обмоточного провода — при больших диаметрах обмоточного провода достигается большее сопротивление изоляции, выше теплопроводность. Однако при выборе обмоточных проводов большого диаметра важно учитывать потери в ЭМ на переменном токе

и поверхностный эффект. На основании вышесказанного, при проектировании ЭМ с прессованными обмотками рекомендуется выбирать обмоточный провод максимального диаметра, допустимого по условиям поверхностного эффекта и

достижения приемлемого уровня потерь на переменном токе.

В будущих исследованиях планируется освоить методологию компьютерного моделирования прессованных обмоток, выполненных из литцендрата.

Список источников

1. Wheeler P. Technology for the More and All Electric Aircraft of the Future // 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA). 2016. P. 1-5. DOI:10.1109/ICA-ACCA.2016.7778519.

2. Kulan M.C., Baker N.J., Widmer J.D. Design of a High Fill Factor Permanent Magnet Integrated Starter Generator with Compressed Stator Windings // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2016. P. 1513-1519. DOI:10.1109/ICELMACH.2016.7732724.

3. Salameh M. et al. Wound Field Synchronous Machine with Segmented Rotor Laminations and Die Compressed Field Winding // 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2019. P. 1739-1746. DOI:10.1109/ECCE.2019.8912601.

4. Widmer J.D., Martin R., Mecrow B.C. Precompressed and Stranded Aluminum Motor Windings for Traction Motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52. No. 3. P. 2215-2223. DOI: 10.1109/TIA.2016.2528226.

5. Jack A.G. e.a. Permanent-Magnet Machines with Powdered Iron Cores and Prepressed Windings // IEEE Transactions on Industry Applications. 2000. Vol. 36. No. 4. P. 1077-1084. DOI: 10.1109/28.855963.

6. Widmer J.D. e.a. Solar Plane Propulsion Motors with Precompressed Aluminum Stator Windings // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2014. Vol. 29. No. 3. P. 681-688. DOI: 10.1109/TEC.2014.2313642.

7. ТУ 2225-009-00203306-2000. Компаунд эпоксидный холодного отверждения марки ЭК-1. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/415962121> (дата обращения: 23.10.2025).

8. Guo Y., Wang A. Thermal Design and Simulation of Winding Cooling for Permanent Magnet Synchronous Motor of Electric Vehicle // 2021 IEEE 4th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS). 2021. P. 1-5. DOI:10.1109/SCEMS52239.2021.9646152.

9. Kebriti R., Hossieni S.M.H. 3D Modeling of Winding Hot Spot Temperature in Oil-Immersed Transformers // Electrical Engineering. 2022.

Vol. 104. No. 5. P. 3325-3338. DOI:10.1007/s00202-022-01553-0.

10. Ha T. e.a. Experimental Study on Behavior of Coolants, Particularly the Oil-Cooling Method, in Electric Vehicle Motors Using Hairpin Winding // Energies. 2021. Vol. 14. No. 4. P. 956. DOI:10.3390/en14040956.

11. Melka B. e.a. Numerical and Experimental Analysis of Heat Dissipation Intensification from Electric Motor // Energy. 2019. Vol. 182. P. 269-279. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.energy.2019.06.023>.

References

1. Wheeler P. Technology for the More and All Electric Aircraft of the Future. *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, 2016, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICA-ACCA.2016.7778519.

2. Kulan M.C., Baker N.J., Widmer J.D. Design of a High Fill Factor Permanent Magnet Integrated Starter Generator with Compressed Stator Windings. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1513-1519. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732724.

3. Salameh M. et al. Wound Field Synchronous Machine with Segmented Rotor Laminations and Die Compressed Field Winding. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 1739-1746. DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912601.

4. Widmer J.D., Martin R., Mecrow B.C. Precompressed and Stranded Aluminum Motor Windings for Traction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, Vol. 52, No. 3, pp. 2215-2223. DOI: 10.1109/TIA.2016.2528226.

5. Jack A.G. e.a. Permanent-Magnet Machines with Powdered Iron Cores and Prepressed Windings // IEEE Transactions on Industry Applications. 2000. Vol. 36. No. 4. P. 1077-1084. DOI: 10.1109/28.855963.

6. Widmer J.D. e.a. Solar Plane Propulsion Motors with Precompressed Aluminum Stator Windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, Vol. 29, No. 3, pp. 681-688. DOI: 10.1109/TEC.2014.2313642.

7. ТУ 2225-009-00203306-2000 Компаунд эпоксидный холодного отверждения марки ЭК-1 [TU 2225-009-00203306-2000 Cold-Cured Epoxy Compound of the EK-1 Brand] [Electronic Resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/415962121> (accessed 23.10.2025). [in Russian].

8. Guo Y., Wang A. Thermal Design and Simulation of Winding Cooling for Permanent Magnet Synchronous Motor of Electric Vehicle. *2021 IEEE 4th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS)*, 2021, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SCEMS52239.2021.9646152.

9. Kebriti R., Hossieni S.M.H. 3D Modeling of Winding Hot Spot Temperature in Oil-Immersed

Transformers. *Electrical Engineering*, 2022, Vol. 104, No. 5, pp. 3325-3338. DOI: 10.1007/s00202-022-01553-0.

10. Ha T. e.a. Experimental Study on Behavior of Coolants, Particularly the Oil-Cooling Method, in Electric Vehicle Motors Using Hairpin Winding. *Energies*, 2021, Vol. 14, No. 4, pp. 956. DOI: 10.3390/en14040956.

11. Melka B. e.a. Numerical and Experimental Analysis of Heat Dissipation Intensification from Electric Motor. *Energy*, 2019, Vol. 182, pp. 269-279. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.energy.2019.06.023>.

Статья поступила в редакцию 20.10.2025; одобрена после рецензирования 27.10.2025; принята к публикации 31.10.2025.

The article was submitted 20.10.2025; approved after reviewing 27.10.2025; accepted for publication 31.10.2025.

Научная статья

УДК 004.94

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-81-89

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА В РАДИОСЕКМЕНТЕ

**Ирина Леонидовна Виноградова****Irina L. Vinogradova**

доктор технических наук,

профессор кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Евгения Юрьевна Головина****Evgenia Yu. Golovina**

старший преподаватель кафедры информационных технологий,

Институт нефтепереработки и нефтехимии,

Уфимский государственный нефтяной технический университет

(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Дамир Мунзирович Зарипов****Damir M. Zaripov**

кандидат физико-математических наук, доцент,

и.о. заведующего кафедрой «Вычислительная техника

и инженерная кибернетика»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Азалия Викторовна Шамсутдинова****Azaliya V. Shamsutdinova**

студент кафедры информационных технологий,

Институт нефтепереработки и нефтехимии,

Уфимский государственный нефтяной технический университет

(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Актуальность

В современных системах связи, таких как IoT, PoT и SDN, наблюдается значительный рост обмена информацией, преимущественно между техническими объектами. Это включает автоматизированное управление беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), телеметрию подвижных объектов и другие процессы, что повышает требования к скорости обработки сигналов. Одним из способов обеспечения высокой скорости является перенос процессов управления на нижние уровни модели OSI, в частности, на физический уровень. В этом контексте представляет интерес метод передачи управляющей

Ключевые слова

БПЛА, радиоуправление, оптический элемент, HFSS, компьютерное моделирование, диаграмма направленности, радиосегмент, фазированная антенная решетка

информации непосредственно в сигнале — так называемое нереляционное управление, особенно если он основан на процессах физического уровня.

Цель исследования

Исследовать параметры оптического элемента для управления фазированной антенной решеткой в системе радиуправления беспилотными летательными аппаратами с использованием метода нереляционного управления на основе функции изменения мгновенной длины волны оптического сигнала.

Методы исследования

В процессе исследования использованы методы анализа и моделирования в среде HFSS Ansys.

Результаты

В ходе проведенного исследования построена и исследована в HFSS Ansys трёхмерная модель оптического элемента, обеспечивающего разделение chirпированных оптических импульсов на составляющие с различными амплитудами для управления излучателями фазированной антенной решётки (ФАР). На основе сравнительного анализа алгоритмов оптимизации предложены критерии их выбора в зависимости от сложности задачи, числа варьируемых параметров и требуемой точности. Результаты моделирования — диаграммы направленности ФАР с использованием разработанного программного обеспечения — продемонстрировали эффективность предложенной системы управления, что подтверждает перспективность её применения в антенных системах с оптическим управлением.

Благодарности: Работа выполнена в рамках конкурса лидерских проектов УГНТУ 2025 (№ В-17022).

Для цитирования: Виноградова И. Л., Головина Е. Ю., Зарипов Д. М., Шамсутдинова А. В. Компьютерное моделирование параметров оптического элемента для управления БПЛА в радиосегменте // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 81-89. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-81-89>.

Original article

COMPUTER SIMULATION OF PARAMETERS OF AN OPTICAL ELEMENT FOR UAV CONTROL IN THE RADIO SEGMENT

Relevance

In modern communication systems such as IoT, IIoT and SDN, there is a significant increase in information exchange, mainly between technical objects. This includes automated control of unmanned aerial vehicles (UAVs), telemetry of moving objects and other processes, which increases the requirements for signal processing speed. One of the ways to ensure high speed is to transfer control processes to the lower levels of the OSI model, in particular, to the physical layer. In this context, the method of transmitting control information directly in a signal is of interest — the so-called non-relational control, especially if it is based on physical layer processes.

Aim of research

To investigate the parameters of an optical element for controlling a phased array antenna in a radio control system for unmanned aerial vehicles using a non-relational control method based on the function of changing the instantaneous wavelength of an optical signal.

Keywords

UAV, radio control, optical element, HFSS, computer simulation, radiation pattern, radio segment, phased array antenna

Research methods

In the course of the research, the methods of analysis and modeling in the HFSS Ansoft environment were used.

Results

In the course of the study, a three-dimensional model of an optical element was constructed and investigated in HFSS Ansys, which provides separation of chirped optical pulses into components with different amplitudes for controlling headlight emitters. Based on a comparative analysis of optimization algorithms, criteria for their selection are proposed depending on the complexity of the task, the number of variable parameters, and the required accuracy. The results of modeling the directional pattern of headlamps using the developed software demonstrated the effectiveness of the proposed control system, which confirms the prospects of its application in antenna systems with optical control.

Acknowledgments: The work was completed within the framework of the Ufa State Petroleum Technological University leadership projects competition 2025 (No. B-17022).

For citation: Vinogradova I. L., Golovina E. Yu., Zaripov D. M., Shamsutdinova A. V. Komp'yuternoye modelirovaniye parametrov opticheskogo elementa dlya upravleniya BPLA v radiosemente [Computer Simulation of Parameters of an Optical Element for UAV Control In the Radio Segment]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 81-89 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-81-89>.

Введение

Одним из значимых направлений развития современных высокоскоростных телекоммуникаций является расширение возможностей управления сигналом. В частности, сюда относится задача уменьшения времени, требующегося на выполнение управляющего воздействия, что особенно актуально для беспроводных коммуникаций в системах связи с высоким быстродействием, а также субтерагерцового и терагерцового диапазонов [1]. Если для телекоммуникаций абонентского доступа общего пользования минимизация управляющего воздействия в конечном итоге позволит расширить сферу предоставляемых услуг, что представляет коммерческий интерес, то для радиосети, управляющей беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), а еще точнее — роями БПЛА, успешное нахождение такого решения может кардинально повлиять на успешность выполнения операции [2]. Эффективным решением данной задачи может быть применение фазированной антенной решетки (ФАР) с быстродействующей системой

управления лучом. Но в отличие от традиционных решений для ФАР, когда система управления только отслеживает положение БПЛА, уже вполне назрела необходимость в том, чтобы поворотом (переформированием) лепестка еще и выполнялось действие, характерное для 2-го, 3-го уровней телекоммуникационной модели OSI [3] — в рамках этой же системы управления. К настоящему времени уже практически сформировалась концепция, заключающаяся в использовании эффектов и процессов физического уровня для решения задач уровней, расположенных выше первого. Это позволяет упростить аппаратную часть системы связи, увеличить быстродействие выполнения операции и в ряде случаев обеспечить дополнительную информационную безопасность. Особый интерес представляют решения, когда в таком случае удаётся сэкономить телекоммуникационный ресурс или не задействовать его вовсе под нужды управления, т.е. передавать всю необходимую информацию в самом сигнале — так называемое нереляционное управление.

В оптических каналах нереляционное управление может быть реализовано за счет использования дополнительного параметра физического уровня для передачи управляющей информации. Например, в волоконно-оптических линиях передачи (ВОЛП) с амплитудно-модулированными сигналами предлагается использовать функцию чирпа оптических импульсов или функцию изменения мгновенной длины (ФИМД) волны оптического сигнала. Этот подход позволяет передавать управляющую информацию скрытно, не задействуя традиционные телекоммуникационные ресурсы, так как ФИМД не используется для передачи данных и не воспринимается приемником [4].

Моделирование параметров оптического элемента

В работе [5] предложена схема (рисунок 1) управления фазированной антенной решеткой с помощью ФИМД, где управляющая информация передается без дополнительного канала связи. Это упрощает аппаратуру и снижает энергопотребление, что особенно важно для динамичных систем, таких как рой БПЛА.

Для реализации такого канала управления разработаны специальные компоненты: преобразователь ФИМД → амплитуда [6] и оптический элемент — интерференционный волоконно-оптический разделитель [7]. Задача последнего состоит в разделении входного чирпированного импульса на составляющие в зависимости от функции чирпа, которые могут отличаться по амплитудам, и перенаправлении их в различные световодные каналы, подсоединенные к соответствующим радиоизлучателям ФАР.

В рамках исследования параметров указанного оптического элемента было проведено численное моделирование в программной среде HFSS Ansys Electronics Desktop Student 2024 R2 [8, 9]. На начальном этапе исследования была разработана трёхмерная модель оптического элемента с неоднородной структурой. Материалам, составляющим модель, были присвоены соответствующие диэлектрические и магнитные характеристики. При этом использовалась как встроенная библиотека материалов HFSS, так и возможность задания пользовательских параметров, таких как диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость и тангенс угла диэлек-

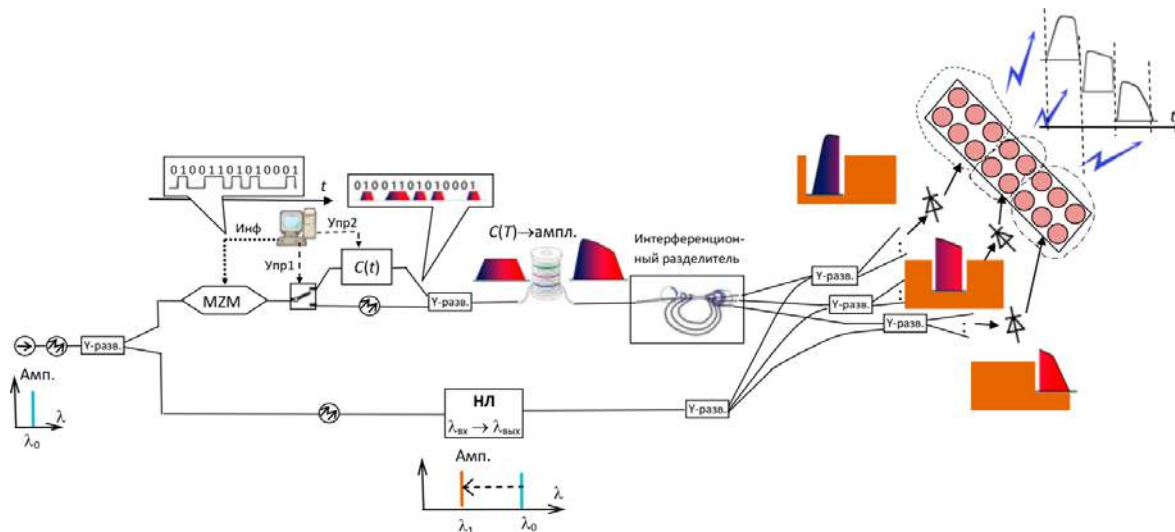


Рисунок 1. Схема функциональная, реализующая управление ФАР с ФИМД-сигналами

Figure 1. Functional diagram implementing control of PAA with ILCF signals

трических потерь. Для корректного моделирования распространения электромагнитных волн были определены граничные условия, а в качестве источника возбуждения выбран тип Wave Port, обеспечивающий возбуждение радиосигнала в заданном диапазоне частот. Для обеспечения точности и сходимости результатов моделирования выбирался подходящий тип решателя, и задавались параметры дискретизации, максимальное количество итераций и критерии сходимости. Результаты моделирования оптического элемента представлены на рисунке 2.

Были установлены особенности распределения электрического поля в неоднородной структуре элемента. Выявлено, что узкие резонансные структуры требуют точных настроек решателя (узкий частотный диапазон, мелкая сетка), а также необходима оптимизация геометрии для достижения целевых характеристик.

Для оптимизации геометрии был задействован встроенный модуль Optimetrics, интегрированный в программный пакет HFSS, который предоставляет возможность параметрической

оптимизации конструкции. Данный инструмент позволяет оптимизировать широкий спектр конструктивных параметров на основе изменяемой геометрии, материалов, возбуждений, значений компонентов и т.д. Алгоритм оптимизации в Optimetrics итеративно корректирует заданные переменные до достижения целевого критерия, минимизируя целевую функцию с заданной точностью. Процесс продолжается до выполнения условий сходимости, определяемых допустимой погрешностью или достижением предельного числа итераций. Это обеспечивает автоматизированный поиск оптимальной конфигурации модели в соответствии с заданными техническими требованиями [10].

В процессе оптимизации параметров оптического элемента проведён сравнительный анализ современных численных методов оптимизации, включая:

- последовательное нелинейное программирование (Sequential Nonlinear Programming, SNLP) — метод эффективен для задач с гладкими целевыми функциями и ограничениями;

- последовательное смешанное целочисленное нелинейное программи-

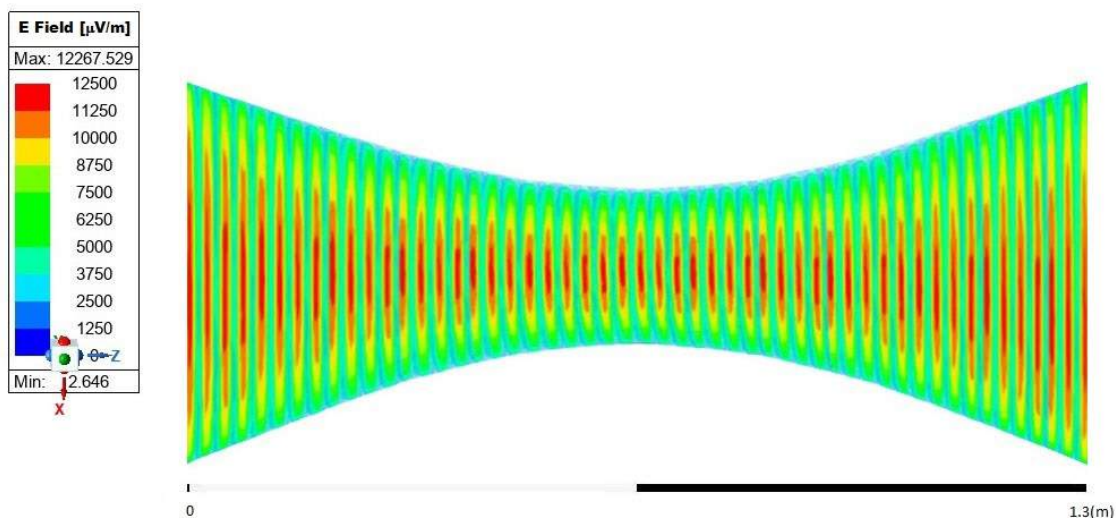


Рисунок 2. Визуализация распределения электрического поля в объеме оптического элемента

Figure 2. Visualization of the electric field distribution in the volume of an optical element

рование (Sequential Mixed-Integer Nonlinear Programming, SMINLP) — применяется при наличии дискретных и непрерывных параметров;

— квази-Ньютоновские методы (Quasi-Newton, QN) — отличаются высокой скоростью сходимости за счёт аппроксимации матрицы Гессе;

— поиск по шаблону (Pattern Search, PS) — данный метод устойчив к шумам в целевой функции, но требует значительных вычислительных ресурсов;

— генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA) — эффективен для многопараметрических задач с наличием локальных экстремумов[11].

На основе проведённого анализа разработаны рекомендации по выбору метода оптимизации в зависимости от сложности задачи, количества оптимизируемых параметров и требуемой точности.

Результаты сравнительного анализа сведены в таблицу 1, где приведены

Таблица 1. Сравнительный анализ численных методов оптимизации

Table 1. Comparative analysis of the listed optimization methods

Алгоритм (метод)	Тип	Количество параметров	Требования к вычислениям	Сложность целевой функции	Рекомендации по применению
Последовательное нелинейное программирование	Локальный	Небольшое — среднее	Средние	Гладкая, выпуклая	Для задач с гладкой целевой функцией, относительно небольшим количеством параметров и необходимостью учета ограничений
Последовательное смешанное целочисленное нелинейное программирование	Локальный	Небольшое – среднее	Высокие	Гладкая, выпуклая	Для задач с гладкой целевой функцией, относительно небольшим количеством параметров и необходимостью учета ограничений и наличием целочисленных параметров
Квази-Ньютоновские методы	Локальный	Небольшое	Низкие	Гладкая	Для задач с относительно простой целевой функцией и небольшим количеством параметров, где важна скорость сходимости и нет ограничений
Поиск по шаблону	Глобальный	Среднее	Средние	Негладкая	Для задач, где целевая функция негладкая, вычисление градиента затруднительно, или нет аналитического выражения, и требуется грубая оценка оптимального решения
Генетический алгоритм	Глобальный	Большое	Высокие	Сложная	Для задач с очень сложной целевой функцией, большим количеством параметров и необходимостью поиска глобального экстремума, даже если это занимает много времени

оценки эффективности каждого метода по указанным критериям.

В ходе данного исследования для моделирования диаграммы направленности ФАР разработано специализированное программное приложение. Оно позволяет осуществлять моделирование различных конфигурации ФАР, задавать параметры отдельных излучателей, а также управлять фазовыми сдвигами для формирования желаемой диа-

граммы направленности. Важной составляющей разработанного программного обеспечения является средство визуализации результатов, позволяющие строить двухмерные диаграммы направленности, отображать основные характеристики (ширину луча, уровень боковых лепестков) и проводить сравнительный анализ различных конфигураций (рисунок 3) [12].

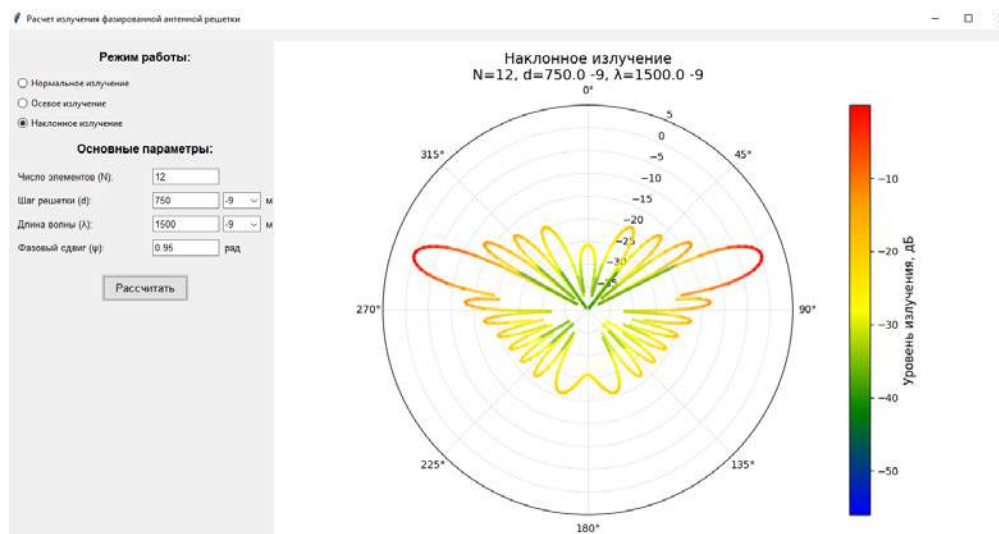


Рисунок 3. Результаты моделирования диаграммы направленности ФАР

Figure 3. Results of radiation pattern modeling PAA

Выводы

Рассмотренный подход нереляционного управления на физическом уровне с использованием функции изменения мгновенной длины волны и специализированного оптического элемента является перспективным решением для современных высокоскоростных систем связи, особенно в задачах управления роем БПЛА. Компьютерное моделирова-

ние и оптимизация параметров оптического элемента в HFSS Ansys обеспечивают высокую точность и эффективность реализации. Использование разработанного специализированного программного обеспечения для анализа диаграммы направленности ФАР способствует дальнейшему совершенствованию систем управления и расширению их функциональных возможностей.

Список источников

1. Balzer J.C. e.a. THz Systems Exploiting Photonics and Communications Technologies // IEEE Journal of Microwaves. Jan. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 268-288. DOI: 10.1109/JMW.2022.3228118.
2. Мустаев А.Ф. Стратегии управления роем беспилотных летательных аппаратов //

Вестник науки. 2019. № 3 (12). С. 96-99. EDN: ZATRUD.

3. Таненбаум Э., Фимстер Н., Уэзеролл Д. Компьютерные сети: [пер. с англ.] / С. Черников; ред. М. Капранов. 6-е изд. Санкт-Петербург–Москва–Минск: Питер, 2024. 960 с. ISBN: 978-5-4461-1766-6.

4. Виноградова И.Л., Головина Е.Ю. Выработка рекомендаций по структуре ВОЛП городских сетей, минимально искажающей информационно-управляющие ФИМД-сигналы // Инфокоммуникационные технологии. 2023. Т. 21, № 4. С. 37-46. DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.06.

5. Виноградова И.Л., Филатов П.Е., Комиссаров А.М., Косцов Я.М., Янтилина Л.З. Метод управления сегментом ROF-сети с применением chirpированных оптических импульсов // Наукоемкие технологии. 2023. Т. 24, № 5. С. 37–52. DOI: [https://doi.org/ 10.18127/j19998465-202305-05](https://doi.org/10.18127/j19998465-202305-05). EDN: RAMXLX.

6. Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Янтилина Л.З., Гизатуллин А.Р. Преобразователь chirp→амплитуда на базе эрбиевого волоконно-оптического усилителя для управления радиопотонными системами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 4-2. С. 129-137. DOI: 10.18469/1810-3189.2019.22.4.129-137. EDN: JBUMRF.

7. Пат. 163995 РФ, МПК G 02 B 6/28. Устройство для разветвления и chirpирования оптических сигналов / Абдрахманова Г.И., Андрианова А.В., Виноградова И.Л., Грахова Е.П., Зайнуллин А.Р., Ишмияров А.А., Мешков И.К., Султанов А.Х., Чириков Р.Ю. № 2016103991/28, Заявлено 08.02.2016; Опубл. 20.08.2016. Бюл. № 23.

8. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. 256 с.

9. Ntambara B., Axel M.H., Aline U. Design, Simulation, and Analysis of Advanced Patch Antenna Using High-Frequency Structural Simulator (HFSS) // 2024 International Conference on Sustainable Technology and Engineering (i-COSTE), Perth, Australia, 2024. pp. 1-5. DOI: 10.1109/i-COSTE63786.2024.11024602.

10. Ploshchych A., Politsanskyi R., Haliuk S. Analysis of Antenna System S-Parameters in Wireless Communication Networks Using HFSS: Role and Significance in Wi-Fi and 5G // 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), IEEE, 2024. P. 560-563.

11. Буторов Е., Ларионов А. Обзор возможностей ANSYS HFSS для трехмерного моделирования СВЧ-устройств произвольной геометрии // САПР и графика. 2012. № 1. С. 62-65.

12. Головина Е.Ю., Шамсудинова А.В. Инновации в управлении сигналом в фазированных антенных решетках // Наука. Технология.

Производство — 2025: матер. конф. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2025. С. 329-331.

References

1. Balzer J.C. et al. THz Systems Exploiting Photonics and Communications Technologies. *IEEE Journal of Microwaves*, Jan. 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 268-288. DOI: 10.1109/JMW.2022.3228118.

2. Mustayev A.F. Strategii upravleniya royem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Drone Swarm Management Strategies]. *Vestnik nauki — Science Bulletin*, 2019, No. 3 (12), pp. 96-99. EDN: ZATRUUD. [in Russian].

3. Tanenbaum E., Fimster N., Uezeroll D. *Komp'yuternyye seti: [per. s angl.]* [Computer Networks: Transl. from Engl.]; S. Chernikov; red. M. Kapranov. 6th ed. Saint-Petersburg–Moscow–Minsk, Piter Publ., 2024. 960 p. ISBN: 978-5-4461-1766-6. [in Russian].

4. Vinogradova I.L., Golovina Ye.Yu. Vyrabotka rekomendatsiy po strukture VOLP gorodskikh setey, minimal'no iskazhayushchey informatsionno-upravlyayushchiye FIMD-signalny [Development of Recommendations on the Structure of Fiber-Optic Communication Lines of Urban Networks That Minimally Distort Information and Control Signals of the ILCF]. *Infokommunikatsionnyye tekhnologii — Infocommunication Technologies*, 2023, Vol. 21, No. 4, pp. 37-46. DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.06. [in Russian].

5. Vinogradova I.L., Filatov P.Ye., Komissarov A.M., Kostsov Ya.M., Yantilina L.Z. Metod upravleniya segmentom ROF-seti s primeneniym chirpirovannykh opticheskikh impul'sov [ROF Network Segment Control Method Using Chirped Optical Pulses]. *Naukoyemkiye tekhnologii — Science Intensive Technologies*, 2023, Vol. 24, No. 5, pp. 37–52. DOI: [https://doi.org/ 10.18127/j19998465-202305-05](https://doi.org/10.18127/j19998465-202305-05). EDN: RAMXLX. [in Russian].

6. Vinogradova I.L., Sultanov A.Kh., Yantilina L.Z., Gizatullin A.R. Preobrazovatel' chirp→amplituda na baze erbiyevogo volokonno-opticheskogo usilitelya dlya upravleniya radiofotonnymi sistemami [Chirp-To-Amplitude Converter Based on an Erbium Fiber Optic Amplifier for Radio-Photon Systems Control]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy — Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*, 2019, Vol. 22, No. 4-2, pp. 129-137. DOI: 10.18469/1810-3189.2019.22.4.129-137. EDN: JBUMRF. [in Russian].

7. Abdrakhmanova G.I., Andrianova A.V., Vinogradova I.L., Grakhova E.P., Zaynullin A.R., Ishmiyarov A.A., Meshkov I.K., Sultanov A.Kh.,

Chirikov R.Yu. *Ustroystvo dlya razvetvleniya i chirpirovaniya opticheskikh signalov* [Device for Branching and Chirping Optical Signals]. Patent RF, No. 163995, 2016. [in Russian].

8. Bankov S.E., Kurushin A.A. *Raschet antenn i SVCH struktur s pomoshch'yu HFSS Ansoft* [Calculation of Antennas and Microwave Structures Using HFSS Ansoft]. Moscow, ZAO «NPP «RODNIK», 2009. 256 p. [in Russian].

9. Ntambara B., Axel M.H., Aline U. Design, Simulation, and Analysis of Advanced Patch Antenna Using High-Frequency Structural Simulator (HFSS). *2024 International Conference on Sustainable Technology and Engineering (i-COSTE)*, Perth, Australia, 2024, pp. 1-5. DOI: 10.1109/i-COSTE63786.2024.11024602.

10. Ploshchik A., Politansky R., Haliuk S. Analysis of Antenna System S-Parameters in Wireless Communication Networks Using HFSS: Role and Significance in Wi-Fi and 5G. *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends*

in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), IEEE, 2024. P. 560-563.

11. Butorov Ye., Larionov A. Obzor vozmozhnostey ANSYS HFSS dlya trekhmernogo modelirovaniya SVCH-ustroystv proizvol'noy geometrii [Review of ANSYS HFSS Capabilities for Three-Dimensional Modeling of Microwave Devices of Arbitrary Geometry]. *SAPR i grafika — SAPR and Graphics*, 2012, No. 1, pp. 62-65. [in Russian].

12. Golovina E.Yu., Shamsudinova A.V. Innovatsii v upravlenii signalom v fazirovannykh antennnykh reshetkakh [Innovations in Signal Control in Phased Antenna Arrays]. *Materialy Konferentsii «Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo — 2025»* [Materials of the Conference «Science. Technology. Production — 2025»], Ufa, UNPTS «Izdatel'stvo UGNTU», 2025, pp. 329-331. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 04.09.2025; одобрена после рецензирования 11.09.2025; принята к публикации 24.09.2025.

The article was submitted 04.09.2025; approved after reviewing 11.09.2025; accepted for publication 24.09.2025.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 3. С. 90–100. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2025. Vol. 21. No. 3. P. 90–100. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 681.518.5

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-90-100

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ВЫБОРКИ ВИБРОПАРАМЕТРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Марина Михайловна Закирничная

Marina M. Zakirnichnaya

*доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой автоматизации, телекоммуникации и метрологии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*



Даниил Владимирович Федькевич

Daniil V. Fedkevich

*магистрант кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*

Актуальность

Настоящее исследование посвящено вопросам влияния размера выборки вибропараметров с использованием метода построения фазовых портретов на точность диагностики неисправностей центробежных насосных агрегатов (ЦНА). Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения точности оценки их технического состояния, особенно на ранних стадиях развития неисправностей. Развитие методов вибродиагностики, основанных на анализе фазовых портретов, сталкивается в настоящее время с необходимостью адаптации к современным объёмам данных, обеспечиваемым новыми средствами измерений и используемых программных средств.

Цель исследования

Анализ влияния размера выборки вибропараметров на характеристики фазовых портретов, включая их площадь и отношение сигнал/шум, и, соответственно, на точность диагностики основных неисправностей ЦНА, таких как «Дисбаланс», «Расцентровка» и «Потеря жёсткости опор».

Методы исследования

Для исследований применялись методы вибродиагностики, основанные на теории детерминированного хаоса, численные методы расчёта площади фазовых портретов (метод Гаусса), статистический анализ SNR, а также разработка программного обеспечения на языке Python с использованием библиотек NumPy, SciPy, Matplotlib и PyQt5 для обработки данных и визуализации результатов.

Ключевые слова

центробежные насосные агрегаты, диагностика неисправностей, вибродиагностика, теория детерминированного хаоса, фазовые портреты, информационная система, размер выборки

Результаты

Установлено, что увеличение размера выборки с 1024 до 16384 значений повышает информативность фазовых портретов: площадь портрета возрастает (например, для неисправности «Дисбаланс» в состоянии «Отлично» прирост составил 1242 %), траектории становятся более детализированными, что улучшает точность диагностики. Разработанная программа на языке программирования Python, представляющая собой информационную систему, обеспечивает обработку больших объёмов данных, визуализацию фазовых портретов, расчёт площади и отношения сигнал/шум, а также оценку состояния оборудования с производительностью 0,8–1,2 с на стандартном компьютере. Данная система позволяет создать базу знаний для систем, основанных на предиктивной аналитике, что способствует повышению точности прогнозирования неисправностей ЦНА.

Для цитирования: Закиричная М. М., Федькевич Д. В. Влияние размера выборки вибропараметров на точность оценки технического состояния динамических систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 90–100. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-90-100>.

Original article

IMPACT OF VIBROPARAMETERS SAMPLE SIZE ON THE ACCURACY OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF DYNAMIC SYSTEMS

Relevance

This study is dedicated to investigating the influence of vibro-parameter sample size on the accuracy of fault diagnosis in centrifugal pump units (CPUs) using the method of phase portrait construction. The relevance of the work stems from the need to improve the accuracy of assessing their technical condition, particularly at the early stages of fault development. The advancement of vibro-diagnostic methods based on phase portrait analysis currently faces the challenge of adapting to modern data volumes provided by new measurement tools and software systems.

Aim of research

The objective of the study is to analyze the impact of vibro-parameter sample size on the characteristics of phase portraits, including their area and signal-to-noise ratio (SNR), and, consequently, on the accuracy of diagnosing key CPU faults such as «Imbalance», «Misalignment», and «Loss of Support Stiffness».

Research methods

The study employed vibro-diagnostic methods based on the theory of deterministic chaos, numerical methods for calculating the area of phase portraits (Gauss method), statistical analysis of SNR, and the development of software in Python using the NumPy, SciPy, Matplotlib, and PyQt5 libraries for data processing and result visualization.

Results

It was established that increasing the sample size from 1024 to 16384 values enhances the informativeness of phase portraits: the portrait area increases (e.g., for the «Imbalance» fault in the «Excellent» condition, the increase was 1242 %), and the trajectories become more detailed, thereby improving diagnostic accuracy. The developed Python-based program, functioning as an information system, enables the processing of

Keywords

centrifugal pump units, fault diagnosis, vibro-diagnostics, theory of deterministic chaos, phase portraits, information system, sample size

large data volumes, visualization of phase portraits, calculation of area and SNR, and equipment condition assessment with a performance of 0.8–1.2 s on a standard computer. This system facilitates the creation of a knowledge base for predictive analytics systems, contributing to improved accuracy in forecasting CPU faults.

For citation: Zakirnichnaya M. M., Fedkevich D. V. Vliyaniye razmera vyborki vibroparametrov na tochnost' otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem [Impact of Vibroparameters Sample Size on the Accuracy of Assessing the Technical Condition of Dynamic Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 90-100 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-90-100>.

Современные технологические процессы в нефтегазовой отрасли, охватывающие добычу, переработку и транспортировку нефти, требуют непрерывного мониторинга состояния динамических систем, среди которых выделяются центробежные насосные агрегаты (ЦНА). Для предотвращения их внеплановых отказов и, соответственно, снижения финансовых рисков требуется тщательный контроль технического состояния [1]. Диагностика и прогнозирование состояния таких систем основаны на предиктивной аналитике, в том числе на технологиях искусственного интеллекта и машинного обучения. Развитие предиктивной аналитики играет ключевую роль в повышении эффективности диагностики подобных систем, позволяя своевременно выявлять потенциальные неисправности и оптимизировать эксплуатацию оборудования благодаря обработке больших объёмов данных в режиме реального времени. Однако ключевой проблемой является отсутствие достаточной информационной базы данных о состоянии оборудования, необходимой для эффективной работы этих систем. Данная система должна быть способна собирать и анализировать эксплуатационные параметры ЦНА, такие как вибрационные характеристики, что позволит создать обучающую выборку для предиктивных моделей и повысить точность прогнозирования неисправностей [2].

Традиционно для обработки вибросигналов применяется спектральный анализ на основе преобразования Фурье [3]. Однако несмотря на простоту и универсальность этот метод имеет недостатки: он усредняет коэффициенты для нестационарных процессов, не выявляет дефекты на ранних стадиях и затрудняет диагностику из-за совпадения диагностических признаков на одинаковых частотах (например для неисправностей типа «Расцентровка» и «Потеря жёсткости опор») [4]. В связи с этим существуют и развиваются альтернативные методы анализа вибросигналов, основанные на вейвлет-преобразовании, пикфакторе, огибающей высокочастотной вибрации, реконструированных фазовых портретах.

Особое место среди методов вибродиагностики занимает анализ реконструированных фазовых портретов, основанный на теории детерминированного хаоса. Этот метод позволяет визуализировать динамику системы в фазовом пространстве и эффективно выявлять основные неисправности, такие как «Дисбаланс», «Расцентровка» и «Потеря жёсткости опор» [5]. Исследования [4–7] показывают, что площадь фазового портрета коррелирует с уровнем развития дефектов и отношением амплитуды сигнала к шуму (отношение сигнал/шум (ОСШ), англ. Signal-to-Noise Ratio (SNR)), что делает её важным диагностическим признаком. Площадь фазо-

вого портрета напрямую зависит от размера выборки вибропараметров, что определяет детальность и точность его построения. В связи с этим возникает необходимость детального исследования влияния объёма выборки на форму фазового портрета и, соответственно, на величину его площади в анализируемом фазовом пространстве. В данной статье рассматривается влияние объёма данных — 1024 и 16384 значений — на характеристики фазовых портретов и их способность отражать техническое состояние насосных агрегатов.

Увеличение объёма выборки обусловлено усовершенствованием приборной базы, применяемой для регистрации вибросигналов. На ранних этапах развития технологий вибродиагностики приборы измерения виброскорости, как правило, использовали ограниченное количество выборки — обычно 2^{10} , то есть 1024 значения за измерение. Такой объём данных был обусловлен техническими ограничениями аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) и вычислительных возможностей устройств того времени. Например, классические вибрационные анализаторы, такие как CSI 2115, 2120, 2130 производства США, которые активно использовались лабораториями вибродиагностики на нефтеперерабатывающих заводах, имели блок данных с 1024 значениями, что соответствовало разрешению 512 спектральных линий при анализе в частотной области [7]. Это обеспечивало базовую диагностику, но не позволяло выявлять тонкие изменения в сигнале, связанные с ранними стадиями развития дефектов, особенно в условиях нестационарных процессов.

С развитием технологий цифровой обработки сигналов и увеличением мощности вычислительных систем появилась возможность значительно увеличить объём выборки. Современные приборы, такие как например ONEPROD

FALCON производства Франции, которыми в настоящее время в основном оснащены лаборатории вибродиагностики на нефтеперерабатывающих заводах, способны обрабатывать до 2^{14} , то есть 16384 значений выборки и более за одно измерение и поддерживать частоту дискретизации 102,4 кГц, что позволяет получать более детализированные спектры с разрешением до 8192 линий [8]. В связи с переходом на новую приборную базу, где размер выборки увеличен до 16384 значений, необходимо оценить, как этот параметр влияет на форму и площадь фазового портрета, а, следовательно, на точность диагностики технического состояния ЦНА.

Переход на использование более объёмного размера выборки в современных средствах измерения виброскорости, таких как ONEPROD FALCON, значительно повысил качество и точность диагностики центробежных насосных агрегатов. Однако это изменение выявило проблему совместимости со старыми программными средствами, которые были разработаны для обработки меньших объёмов данных. Одним из примеров такого программного обеспечения является система IMPROS, созданная на языке программирования Delphi и впервые представленная в начале 2000-х годов для анализа вибрационных сигналов и построения фазовых портретов [7] (рисунок 1).

Данная программа позволяла строить фазовые портреты вибрационных сигналов, визуализировать динамику системы и выявлять неисправности оборудования. С её помощью была доказана корреляция между площадью фазового портрета и техническим состоянием оборудования, а также установлено влияние отношения амплитуды сигнала/шум SNR на точность диагностики состояния агрегатов. Кроме того, программа IMPROS демонстрировала хорошую сходимость

и позволяла выявлять тенденции изменения фазовых портретов в зависимости от типа неисправности (например «Дисбаланс», «Расцентровка» или «Потеря жёсткости опор») и стадии её развития [2, 4–7], что обеспечивало более глубокое понимание динамики дефектов. Эти достижения сделали программу IMPROS ценным инструментом для анализа вибрационных данных и способствовали развитию методов диагностики на основе теории детерминированного хаоса.

Следует отметить, что программа IMPROS была разработана для работы с ограниченными наборами данных, характерными для приборов того времени и использовала алгоритмы, оптимизированные под 1024 значения.

Архитектура программы не была рассчитана на обработку больших объёмов данных. При попытке использовать IMPROS с современными виброанализаторами, генерирующими 16384 значения, возникли серьёзные проблемы: ограничения памяти, связанные с 32-битной архитектурой Delphi, приводят к переполнению буфера данных; алгоритмы обработки сигналов, такие как быстрое преобразование Фурье (FFT) не масштабируются эффективно для больших выборок, что вызывает значительные задержки в обработке данных.

Для анализа влияния размера выборки вибропараметров (1024 и 16384) на характеристики фазовых портретов функционал программы IMPROS был перенесён в среду Visual Studio Code при использовании языка Python [9] (рисунок 2). Для разработки интерфейса программы использовалась среда QtDesigner [10]. Выбор Python в качестве языка программирования обусловлен рядом его преимуществ, которые делают его оптимальным для данной задачи. Во-первых, язык программирования Python обладает мощными библиотеками для научных вычислений и обработки больших объёмов данных, такими как NumPy и SciPy, которые обеспечивают высокую производительность при работе с массивами данных, включая 16384 значения.

Во-вторых, библиотека Matplotlib позволяет эффективно визуализировать фазовые портреты и другие графики, что критически важно для анализа вибрационных сигналов. В-третьих, язык Python является кроссплатформенным языком с простым и понятным синтаксисом, что упрощает разработку, отладку и дальнейшее расширение программы. Наконец, язык Python предоставляет гибкость для интеграции с современными технологиями, такими как методы искусственного интеллекта, что открывает перспективы для будущего развития программы [9].

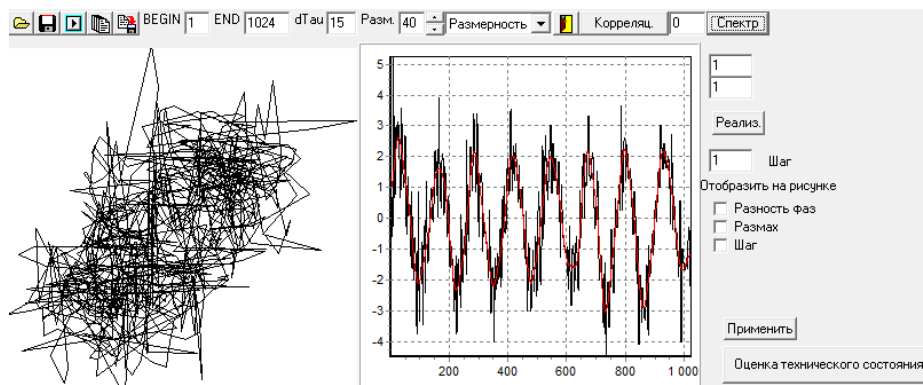


Рисунок 1. Фазовый портрет и форма волны для типа неисправности «Дисбаланс» при состоянии «Требуется мер» в программе IMPROS

Figure 1. Phase portrait and waveform for the «Imbalance» fault type in the IMPROS program

Данная программа позволяет строить и количественно оценивать фазовые портреты вибрационных сигналов центробежных насосных агрегатов. Она обеспечивает поддержку современных объёмов данных и гибкость для дальнейшего развития. Программа включает функционал для построения фазовых траекторий методом запаздывания, расчёта площади портретов, оценки отношения сигнал/шум SNR и диагностики технического состояния оборудования

Программа реализована с использованием библиотек Python: PyQt5 для графического интерфейса, NumPy для численных расчётов, Matplotlib для визуализации, SciPy для фильтрации сигналов. Основной алгоритм построения фазовых портретов использует метод запаздывания, где сигнал $y(t)$ преобразуется в двумерную траекторию $(y(t), y(t + \tau))$ с параметром запаздывания τ [7].

Для расчёта площади фазового портрета применён метод Гаусса, где площадь выражается в $\text{мм}/\text{с}^2$ (квадратах

виброскорости), которые в данной работе обозначаются как условные единицы (у.е.). Для оценки параметра SNR, который был введен в [9], используется сглаживание сигнала с помощью функции `uniform_filter1d` из SciPy.

Программа предоставляет следующие возможности:

— *обработка данных и визуализация.* Программа позволяет загружать вибрационные сигналы из текстовых файлов, строить график сигнала и фазовый портрет с заданным числом значений (1024 или 16384) и параметром τ . Реализована возможность масштабирования графиков с помощью прокрутки колесика мыши и сброса масштаба через кнопку «Сбросить масштаб». Графики отображаются с подписями осей и заголовками;

— *количественная оценка:* программа рассчитывает SNR и площадь фазового портрета, а также оценивает состояние насоса на основе пороговых значений SNR. Состояние насоса было

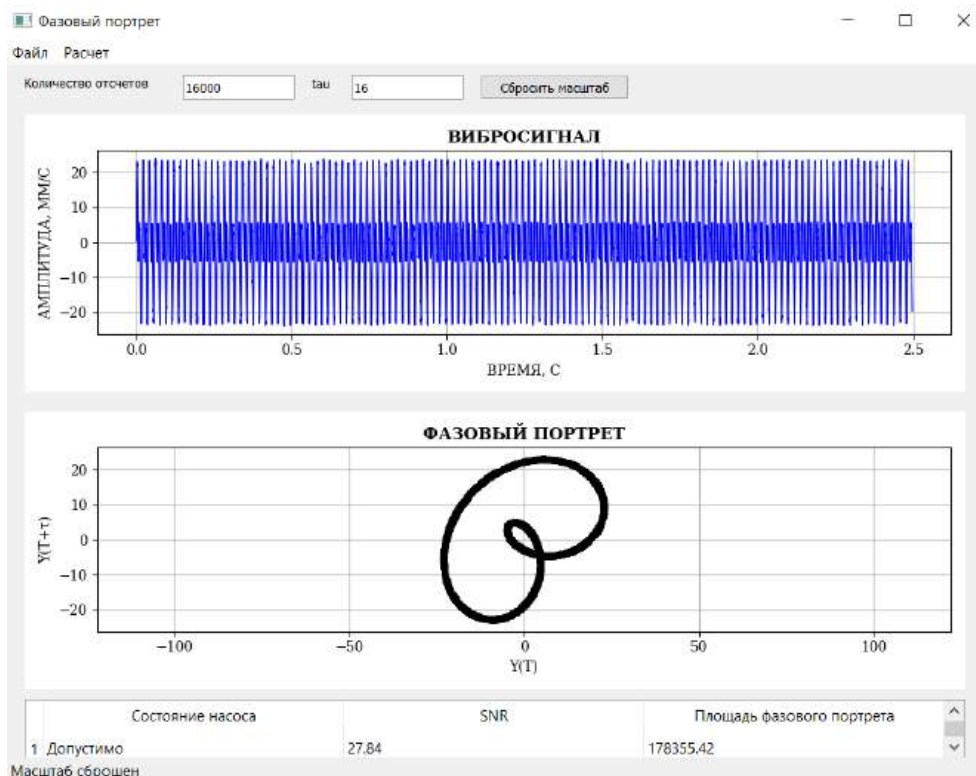


Рисунок 2. Фазовый портрет и форма волны для типа неисправности «Расцентровка»

Figure 2. Phase portrait and waveform for the «Misalignment» fault type

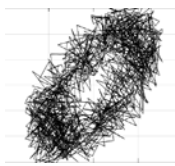
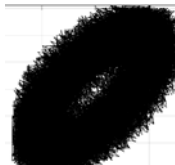
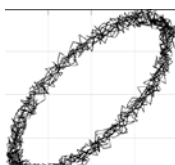
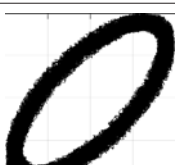
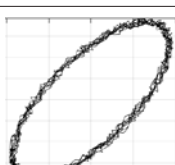
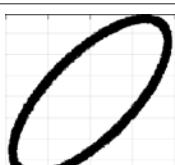
выбрано в соответствии с [4]. Например, состояние «Отлично» при $SNR < 23,7$; «Недопустимо» при $SNR \geq 40,7$, что соответствует результатам полученным в [5]. Результаты отображаются в таблице и могут быть сохранены в текстовый файл вместе с графиками (в формате PNG);

Для оценки адекватности разработанной программы было проведено тестирование. В рамках тестирования проана-

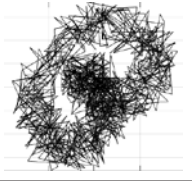
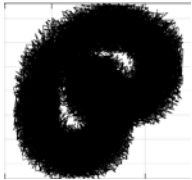
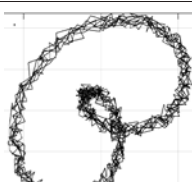
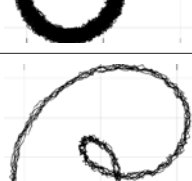
лизированы вибросигналы, соответствующие трём состояниям оборудования: «Отлично», «Единожды допустимо» и «Требуется экстренной остановки», для трёх основных типов неисправностей: «Дисбаланс», «Потеря жёсткости опор» и «Расцентровка». На основе этих вибросигналов построены фазовые портреты и рассчитаны их параметры, включая площадь портрета и SNR. Результаты тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение фазовых портретов для 1024 и 16384 значений в программе, написанной на языке Python

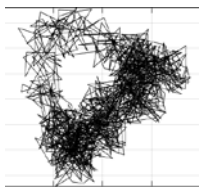
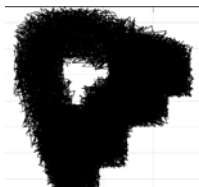
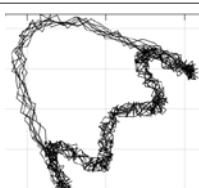
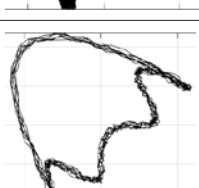
Table 1. Comparison of phase portraits for 1024 and 16384 values in the program written in Python

Тип неисправности	Состояние агрегата	Размер выборки вибропараметров	Фазовый портрет	SNR	Площадь фазового портрета (у.е.)
«Дисбаланс»	«Отлично»	1024		12,9	9,59
		16384		12,6	128,70
	«Единожды допустимо»	1024		29,0	14,31
		16384		29,4	224,02
	«Требуется экстренной остановки»	1024		37,5	15,82
		16384		37,7	248,85

Продолжение таблицы 1

Тип неисправности	Состояние агрегата	Размер выборки вибропараметров	Фазовый портрет	SNR	Площадь фазового портрета (у.е.)
«Расцентровка»	«Отлично»	1024		12,6	11,62
		16384		12,5	178,13
	«Единожды допустимо»	1024		29,4	18,03
		16384		29,3	287,98
	«Требуется экстренная остановка»	1024		37,3	19,41
		16384		37,6	312,77

Продолжение таблицы 1

Тип неисправности	Состояние агрегата	Размер выборки вибропараметров	Фазовый портрет	SNR	Площадь фазового портрета (у.е.)
«Потеря жесткости опор»	«Отлично»	1024		12,1	6,82
		16384		12,6	114,68
	«Единожды допустимо»	1024		29,3	11,18
		16384		29,1	188,36
	«Требуется экстренной остановки»	1024		37,2	12,34
		16384		37,2	206,26

Тестирование показало, что при 1024 значениях фазовые траектории менее детализированы, что может приводить к пропуску незначительных изменений в динамике системы. Например, для сигнала с неисправностью «Дисбаланс» при состоянии «Отлично» площадь портрета составила 9,59 у.е. при 1024 значениях и 128,7 у.е. при 16384 значениях (прирост на 1242 %), что связано с более точной дискретизацией траектории. SNR также

оказался более точным при большем размере выборки вибропараметров, так как сглаживание сигнала лучше учитывает низкочастотные компоненты.

Эти результаты подтверждают, что программа успешно решает задачу анализа фазовых портретов, обеспечивая более точное выявление неисправностей ЦНА, таких как «Дисбаланс», «Потеря жёсткости опор», «Расцентровка» при использовании 16384 значений.

Выводы

Анализ фазовых портретов вибрационных сигналов центробежных насосных агрегатов (ЦНА) подтвердил их высокую информативность для диагностики неисправностей, таких как «Дисбаланс» и «Потеря жёсткости опор». Сравнение результатов при выборке в 1024 и 16384 значений выявило значительные различия в характеристиках фазовых портретов. Например, для неисправности «Дисбаланс» в состоянии «Требуется экстренной остановки» площадь фазового портрета при 1024 значениях составила 15,82 у.е., а при 16384 значениях увеличилась до 248,85 у.е. (прирост на 1472 %), что отражает более детализированное представление траекторий. При этом SNR остаётся практически неизменным: 37,5 при

1024 значениях и 37,7 при 16384 значениях. Это указывает на то, что увеличение выборки не оказывает существенного влияния на выделение полезного сигнала из шума, но значительно повышает информативность фазового портрета за счёт большей детализации, что критически важно для точной диагностики дефектов на ранних стадиях. Программа эффективно обрабатывает 16384 значения, демонстрируя время построения графиков и расчёта параметров около 0,8–1,2 с на стандартном компьютере (Intel Core i5, 8 ГБ ОЗУ).

Таким образом, переход на выборку в 16384 значений позволяет улучшить диагностику за счёт более точного отображения динамики системы, сохраняя при этом стабильность оценки SNR.

Список источников

1. Нефтегазовый комплекс России: проблемы и приоритеты развития. URL: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/i20-151> (дата обращения: 22.04.2025).
2. Хузин Т.Р., Закирничная М.М. Интеллектуальная информационная система для вибродиагностики насосных агрегатов, основанная на теории детерминированного хаоса // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 2. С. 129–138. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-129-138. EDN: HERLXA.
3. Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Диагностика технологических систем: учебное пособие: в 2 ч. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. Ч. 2. 128 с.
4. Валишин Р.Г., Корнишин Д.В. Разработка критериев очистки вибрационных сигналов для выявления основных неисправностей центробежных насосных агрегатов на ранней стадии развития // Студенческий: электрон. научн. журн. 2022. № 23 (193). URL: <https://sibac.info/journal/student/193/259610> (дата обращения: 28.04.2025).
5. Кузеев И.Р., Закирничная М.М., Сабуров В.К., Нафиков А.Ф. Вибродиагностика оборудования с использованием основ детерминированного хаоса // Контроль. Диагностика. 2004. № 12. С. 16–23. EDN: UNEQAL.

6. Булатов Б.Р. Диагностика центробежных насосных агрегатов с использованием метода построения фазовых портретов. Уфа: УГНТУ, 2019. 100 с.

7. Солодовников Д.С. Вейвлеты и детерминированный хаос при анализе вибросигналов центробежно-компрессорных агрегатов. Уфа: УГНТУ, 2000. 183 с.

8. Альтернативные источники: OneProd: [Official Site]. URL: <https://www.oneprod.com/> (дата обращения: 22.04.2025).

9. Альтернативные источники: Python: [Official Site]. URL: <https://www.python.org> (дата обращения: 28.04.2025).

10. Альтернативные источники: Qt Designer: [Official Site]. URL: <https://doc.qt.io/qtforpython-6.5/overviews/qtdesigner-manual.html> (дата обращения: 25.05.2025).

References

1. *Neftegazovyy kompleks Rossii: problemy i priority razvitiya* [Russia's Oil and Gas Complex: Problems and Development Priorities]. URL: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/i20-151> (accessed 22.04.2025). [in Russian].
2. Khuzin T.R., Zakirnichnaya M.M. *Intellektual'naya informatsionnaya sistema dlya vibrodiagnostiki nasosnykh agregatov, osnovannaya na teorii determinirovannogo khaosa* [Intelligent Information System for Pump Unit Vibrodiagnostics

Based on Determined Chaos Theory]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 2, pp. 129-138. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-129-138. EDN: HERLXA. [in Russian].

3. Gavrilin A.N., Moyzes B.B. *Diagnostika tekhnologicheskikh sistem: uchebnoye posobiye: v 2 ch.* [Diagnostics of Technological Systems: Textbook: in 2 Parts]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014. Ch. 2. 128 p. [in Russian].

4. Valishin R.G., Kornishin D.V. Razrabotka kriteriyev ochistki vibratsionnykh signalov dlya vyyavleniya osnovnykh neispravnostey tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov na ranney stadii razvitiya [Development of Criteria for Cleaning Vibration Signals to Identify the Main Malfunctions of Centrifugal Pumping Units at an Early Stage]. *Studencheskiy: elektron. nauchn. zhurn. — Studencheskiy: Electronic Scientific Journal*, 2022, No. 23 (193). URL: <https://sibac.info/journal/student/193/259610> (accessed 28.04.2025). [in Russian].

5. Kuzeev I.R., Zakirnichnaya M.M., Saburov V.K., Nafikov A.F. Vibrodiagnostika — oborudovaniya s ispol'zovaniyem osnov determinirovannogo khaosa [Vibrodiagnostics of Equipment Using the Foundations of Deterministic Chaos].

Kontrol'. Diagnostika –Kontrol'. Diagnostika, 2004, No. 12, pp. 16-23. EDN: UNEQAL. [in Russian].

6. Bulatov B.R. *Diagnostika tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov s ispol'zovaniyem metoda postroyeniya fazovykh portretov* [Diagnostics of Centrifugal Pumping Units Using the Method of Constructing Phase Portraits]. Ufa, USPTU Publ., 2019. 100 p. [in Russian].

7. Solodovnikov D.S. *Veyvlety i determinirovanny khaos pri analize vibrosignalov tsentrobezhno-kompressornykh agregatov* [Wavelets and Deterministic Chaos in the Analysis of Vibro-Signals of Centrifugal Compressor Units]. Ufa, USPTU Publ., 2000. 183 p. [in Russian].

8. *Al'ternativnyye istochniki: OneProd* [Alternative Sources: OneProd]. [Official Site]. URL: <https://www.oneprod.com/> (accessed 22.04.2025). [in Russian].

9. *Al'ternativnyye istochniki: Python* [Alternative Sources: Python]. [Official Site]. URL: <https://www.python.org> (accessed 28.04.2025). [in Russian].

10. *Al'ternativnyye istochniki: Qt Designer* [Alternative Sources: Qt Designer]. [Official Site]. URL: <https://doc.qt.io/qtforpython-6.5/overviews/qt designer-manual.html> (accessed 25.05.2025). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 02.09.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 24.09.2025.

The article was submitted 02.09.2025; approved after reviewing 17.09.2025; accepted for publication 24.09.2025.

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-101-110

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Азам Салаватович Хисматуллин****Azat S. Khismatullin**

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

**Мусса Гумерович Баширов****Mussa G. Bashirov**

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

Актуальность

Современная электроэнергетика сталкивается с внезапными вызовами: стремительный рост пиковых нагрузок, старение парка силового оборудования и интеграция нестабильных возобновляемых источников энергии. Эти факторы приводят к увеличению частоты и продолжительности работы силовых масляных трансформаторов в аварийных и предаварийных режимах, когда традиционные системы жидкостного охлаждения достигают предела своей эффективности. Перегрев трансформатора в таких условиях является одной из ключевых причин сокращения его ресурса и выхода из строя, что влечет за собой масштабные аварии, колоссальные финансовые потери и перебои в энергоснабжении целых регионов.

В данной статье рассматривается разработка перспективной системы охлаждения, основанной на элегазово-масляном теплообмене, предназначенной для работы в экстремальных режимах. Исследуются принципы работы данной системы, ее ключевые преимущества, такие как кардинальное повышение надежности и живучести энергосети, а также анализируются перспективы ее внедрения в качестве страховочной или дублирующей технологии для критически важных объектов энергоинфраструктуры.

Цель исследования

Основной целью работы является повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов в аварийных или предаварийных режимах.

Ключевые слова

силовые трансформаторы, мониторинг, безопасность, элегаз, трансформаторное масло, системы охлаждения

Методы исследования

В основе работы лежит комплекс теоретических и аналитических методов. Для формирования теоретической базы и анализа современных тенденций был проведен систематический обзор научно-технической литературы. Исследование эффективности новых методов охлаждения проводилось с помощью сравнительного анализа их ключевых характеристик (теплоотводящей способности, надежности, стоимости внедрения). Разработка и верификация алгоритмов системы автоматического контроля осуществлялась методами математического и компьютерного моделирования тепловых процессов в трансформаторе.

Результаты

Результатом работы являются обоснование необходимости использования и последующая разработка системы управления охлаждением силового масляного трансформатора, который может работать в экстренных, предаварийных, аварийных режимах и в нормальном режиме. Произведены поиск и анализ существующих аналогов, патентов и программных комплексов, осуществлен выбор средств разработки и, как итог, создана теоретическая модель охлаждения масляного трансформатора.

Для цитирования: Хисматуллин А. С., Баширов М. Г. Разработка алгоритма оптимального управления системой охлаждения силового масляного трансформатора // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 101-110. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-101-110>.

Original article

DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL CONTROL ALGORITHM FOR A POWER OIL TRANSFORMER COOLING SYSTEM

Relevance

The modern electric power industry faces sudden challenges: rapidly increasing peak loads, aging power equipment, and the integration of unstable renewable energy sources. These factors lead to increased frequency and duration of operation of oil-immersed power transformers in emergency and pre-emergency modes, when traditional liquid cooling systems reach their limits. Transformer overheating under such conditions is a key cause of reduced service life and failure, leading to large-scale accidents, colossal financial losses, and power outages across entire regions.

This article examines the development of an advanced cooling system based on gas-oil heat exchange, designed for operation in extreme conditions. The operating principles of this system and its key advantages, such as a dramatic increase in grid reliability and survivability, are explored, as well as the prospects for its implementation as a backup or redundant technology for critical energy infrastructure facilities.

Aim of research

The primary objective of this work is to improve the cooling efficiency of oil-immersed power transformers in emergency and pre-emergency modes.

Research methods

The study is based on a combination of theoretical and analytical methods. A systematic review of the scientific and technical literature was conducted to establish a theoretical foundation and analyze current trends. The effectiveness of new cooling methods was assessed through a comparative analysis of their key characteristics (heat dissipation capacity,

Keywords

power transformers, monitoring, safety, sulfur hexafluoride, transformer oil, cooling systems

reliability, and implementation costs). The development and verification of the automatic control system algorithms was accomplished using mathematical and computer modeling of thermal processes in the transformer.

Results

The study resulted in the justification of the need for use and the subsequent development of a cooling control system for a power oil transformer capable of operating in emergency, pre-emergency, and normal operating modes. Existing analogs, patents, and software packages were searched and analyzed, development tools were selected, and, ultimately, a theoretical model for oil transformer cooling was created.

For citation: Khismatullin A. S., Bashirov M. G. Razrabotka algoritma optimal'nogo upravleniya sistemoy okhlazhdeniya silovogo maslyanogo transformatora [Development of an Optimal Control Algorithm for a Power Oil Transformer Cooling System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 101-110 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-101-110>.

Введение

Силовые масляные трансформаторы являются основными элементами систем электроснабжения, выполняя функции преобразования напряжения для передачи и распределения электроэнергии. Их применение позволяет минимизировать потери энергии при транспортировке на большие расстояния и эффективно распределять мощность между потребителями [1–4]. В случае недостаточного отвода тепла происходит перегрев активной части, что ведет к необратимому старению и разрушению изоляции, и, как следствие, к выходу трансформатора из строя [5–8].

Современные энергосистемы становятся все более сложными и динамичными из-за увеличения нагрузки на сети и роста числа распределенных энергоресурсов [9, 10]. Традиционные методы управления уже не справляются с такими задачами, поэтому применение автоматизированной системы управления, например в сетях Smart Grid с интеллектуальной системой управления, позволяет:

- обрабатывать и анализировать данные в режиме реального времени;
- прогнозировать поведение систем и предотвращать аварии;

— автоматизировать управление сетью для повышения эффективности.

Алгоритм работы

Для разработки алгоритма оптимального управления автоматизированной системой охлаждения силового масляного трансформатора рассмотрим устройство охлаждения, изображенное на рисунке 1.

Предлагаемая система охлаждения трансформатора является двухконтурной. Первый контур — это традиционная масляная система самого трансформатора. Второй контур — замкнутая и изолированная от масла система, заполненная хладагентом — гексафторидом серы (элегаз).

Второй (элегазовый) контур включает последовательно соединенные:

- компрессор — для создания циркуляции элегаза;
- змеевик-охладитель, выполненный по принципу «труба в трубе»;
- фильтры: грубой и тонкой очистки.

Принцип действия теплообмена

Теплоотвод осуществляется в змеевике-охладителе. Его конструкция предусматривает циркуляцию горячего

элегаза по внутренним трубам и циркуляцию дополнительного внешнего хладагента (например воды или антифриза) по внешним трубам.

Таким образом, тепло от более нагретого масла передается к менее нагретому маслу, от масла — элегазу в охладителе-испарителе (который не указан явно, но подразумевается), а затем горячий элегаз в змеевике отдает тепло внешнему хладагенту.

Принцип сепарации частиц в масле следующий. В объеме масла элегаз находится в виде пузырьков. Всплывая, эти пузырьки увлекают за собой легкие примеси, присутствующие в масле (например, частицы волокон, продукты старения изоляции). Для их отделения в верхней части контура установлен фильтр-сепаратор. В нем происходит разделение:

очищенный элегаз (газ) движется дальше в контур, и тяжелые частицы примесей, отделенные от пузырьков, оседают обратно в масляный объем.

Принцип работы двухконтурной системы охлаждения следующий. Нагретое в процессе охлаждения активной части трансформатора масло передает избыточное тепло элегазу, находящемуся в замкнутом контуре. Нагревшись, элегаз всплывает и через расширительный бак поступает в фильтр грубой очистки.

Одним из основных элементов системы является процесс сепарации в верхней части указанного фильтра, где установлен теплообменный модуль, охлаждаемый хладагентом типа NOVEC. Условием эффективного разделения элегаза и увлеченных им частиц масла явля-

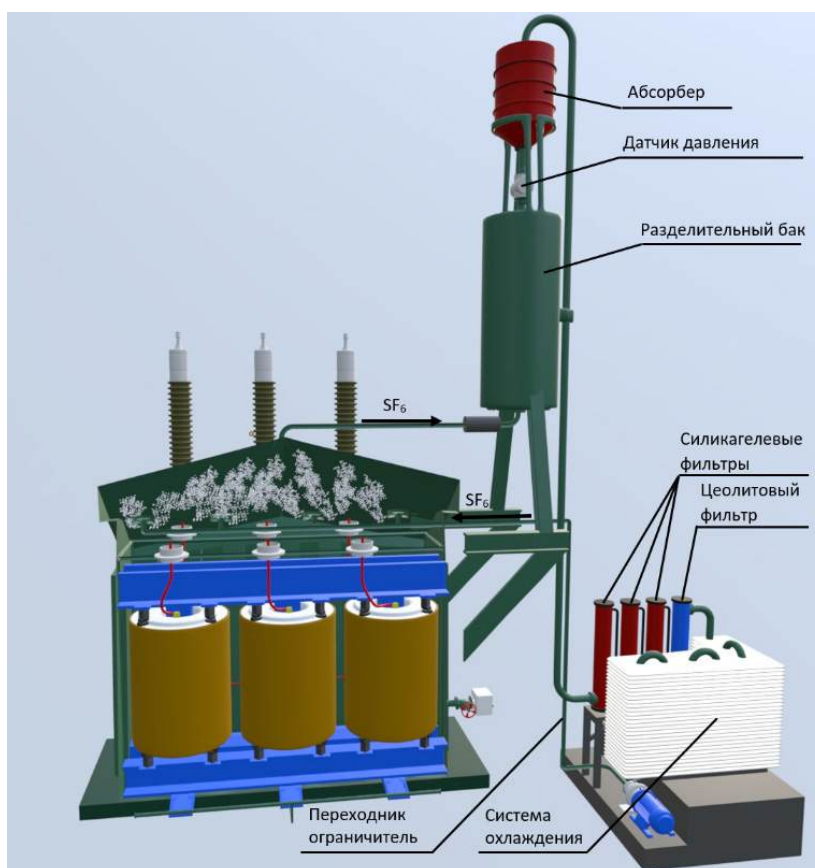


Рисунок 1. Внешний вид установки системы элегазового охлаждения трансформаторного масла

Figure 1. External view of the installation of the gas-insulated cooling system for transformer oil

ется поддержание температуры поверхности модуля ниже точки росы паров масла. При соблюдении данного условия пары масла конденсируются, а масло коалесцирует на охлажденной поверхности. После сепарации конденсированное трансформаторное масло стекает самотеком в нижнюю часть бака, а очищенный газообразный элегаз поступает в теплообменник («труба в трубе»). Здесь он, находясь в контакте через стенку с охладителем NOVEC, отдает остаточное тепло и охлаждается до заданной температуры.

Охлажденный элегаз направляется по внутренней трубке теплообменника обратно в трансформатор, замыкая таким образом циклический процесс. Циркуляцию элегаза в системе обеспечивает компрессор, который активируется по сигналу контроллера при достижении температурой масла порогового значения.

Обоснование выбора конструкции

Теплообменник выполнен по схеме «труба в трубе», так как данная конструкция является оптимальной для работы с хладагентом NOVEC в условиях высоких давлений, обеспечивая высокую механическую прочность и эффективный теплообмен.

Отвод тепловой энергии от активных частей трансформатора в окружающую среду представляет собой сложный последовательный процесс, который можно описать с помощью модели тепловой цепи. Этот путь состоит из нескольких последовательных участков, на каждом из которых возникает температурный перепад, пропорциональный величинам теплового потока и теплового сопротивления участка:

— участок 1 — теплопроводность от внутренних точек обмотки или сердечника к их наружным поверхностям, омываемым маслом;

— участок 2 — конвективный теплообмен между поверхностью обмоток/сердечника и трансформаторным маслом;

— участок 3 — конвективный перенос тепла маслом от обмоток к внутренней поверхности стенки бака;

— участок 4 — конвективный теплообмен между маслом и внутренней стенкой бака;

— участок 5 — теплопроводность через толщину стенки бака;

— участок 6 — отвод тепла от внешней поверхности бака в окружающую среду за счет конвекции.

Интенсификация теплообмена на любом из этих участков, в особенности на участках 2–4, связанных с конвекцией в масле, позволяет снизить общий тепловой перепад и температуру активных частей.

Физическая модель теплообмена основана на интенсификации теплообмена за счет барботажа — принудительной циркуляции пузырьков элегаза через объем трансформаторного масла. Данный процесс создает в жидкости сложное, нестационарное поле скоростей, что радикально усиливает перенос тепла.

Для описания механизма, выходящего за рамки классической конвекции, вводится концепция трансксилляторного переноса. Трансксиллятор (от лат. trans — через и cilla — струя) — это механизм переноса тепла и вещества, обусловленный поперечным перемешиванием и относительным смещением слоев жидкости при прохождении через нее дисперсных частиц (в данном случае — газовых пузырьков).

Рассмотрим упрощенную физическую модель (рисунок 2).

Предположим, что жидкость условно стратифицирована на горизонтальные слои, а всплывающие пузырьки газа имеют сферическую форму и постоянный объем. В начальный момент вре-

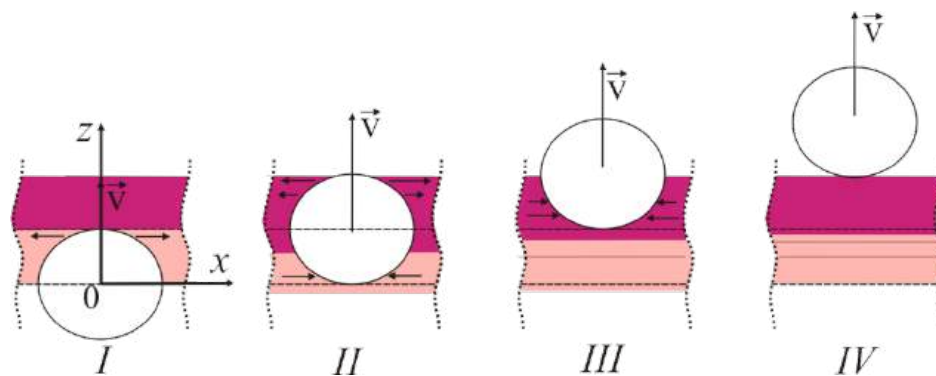


Рисунок 2. Возникновение транцилляторного переноса при всплывании пузырьков

Figure 2. The emergence of transillatory transfer during the ascent of bubbles

мени верхний слой обладает избытком тепла.

При всплытии пузырька происходит деформация и относительное смещение соседних слоев жидкости. Максимальное смещение наблюдается на уровне экватора пузырька. Это смещение приводит к интенсивному взаимодействию участков жидкости с различной температурой не только по вертикали (вдоль оси Oz), но и по горизонтали (вдоль оси Ox). В результате возникает поперечный перенос тепла (транцилляторная составляющая), скорость которого значительно превышает скорость естественной теплопроводности в неподвижной жидкости.

Таким образом, барботажа элегаза не просто создает конвективные потоки, но и генерирует механизм поперечного перемешивания, аналогичный эффекту турбулизации потока. Это резко увеличивает эффективность теплообмена на участках 2–4 тепловой цепи, обеспечивая необходимое охлаждение в экстремальных режимах работы трансформатора.

Локальное повышение температуры сверх допустимых норм оказывает негативное влияние на свойства трансформаторного масла и состояние твердой изоляции. Одним из наиболее опасных последствий перегрева является интенсификация процесса старения изоляции, которая протекает по двум основным

направлениям: образование влаги в масле и снижение механической прочности изоляции.

Непрерывный контроль температурного режима с помощью автоматизированной системы мониторинга становится не просто вспомогательной функцией, а критически важным условием обеспечения надежности и продления срока службы трансформатора.

Преимущества нашей системы: повышение эффективности и долговечности и ранняя диагностика неисправностей.

Предлагаемая автоматическая система не только решает задачу оперативного охлаждения, но и переводит эксплуатацию трансформатора на уровень предиктивного обслуживания, основанного на постоянном анализе его технического состояния.

Программная реализация

В нашей работе создана интегрированная система аварийного охлаждения с системой предиктивной аналитики, которые сейчас активно применяются на мощных трансформаторах. Если существующие системы контролируют параметры для защиты, наша система использует эти данные для активного управления новым физическим процессом охлаждения (барботажем), что и является новизной работы (рисунок 3).

Программное обеспечение АСУОМТ реализует трехуровневую логику управления, основанную на контроле температуры, давления и химического состава газовой среды: блок терморегулирования, блок контроля давления и блок диа-

гностики по газам. Система использует метод анализа растворенных в масле газов (АРГ) для предиктивной диагностики. В таблице 1 представлены основные диагностические признаки.

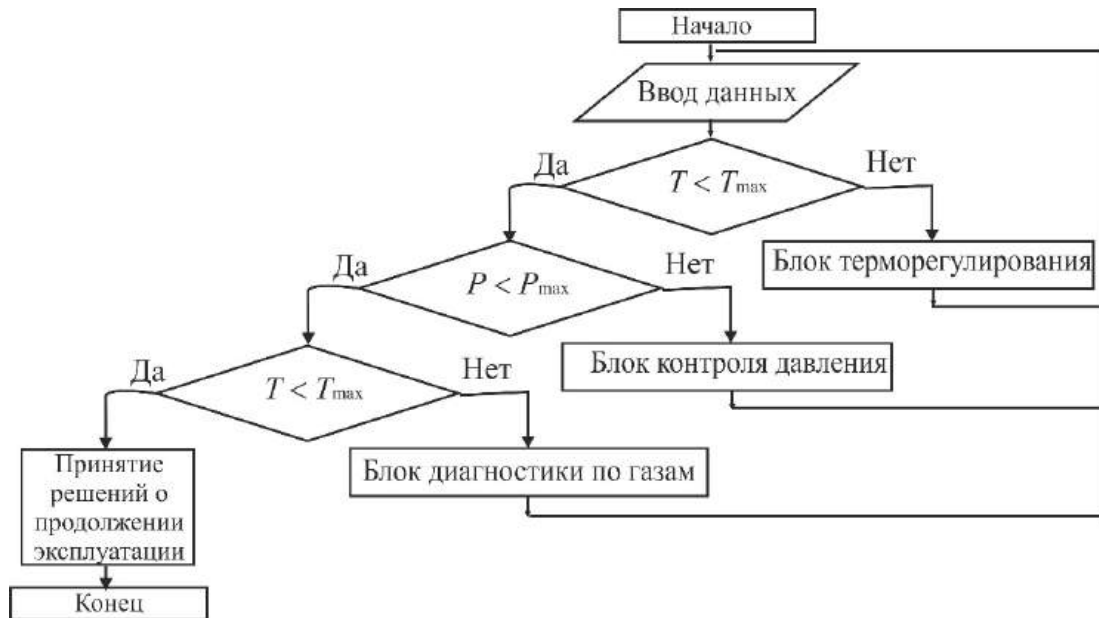


Рисунок 3. Блок-схема автоматической системы управления охлаждением

Figure 3. Block diagram of the automatic cooling control system

Таблица 1. Корреляция газов-маркеров с типами дефектов в трансформаторе

Table 1. Correlation of marker gases with types of defects in a transformer

Тип дефекта / Defect Type	Ключевые газы-маркеры / Key Marker Gases	Возможные причины / Possible Causes
Дефекты электрического характера / Electrical defects		
Частичные разряды / Partial discharges	H ₂ (основной / basic), CH ₄ , C ₂ H ₂ (следы / traces)	Пробой изоляции, корона / Insulation breakdown, corona
Дуговые разряды / Arc discharges	C ₂ H ₂ , H ₂ (основные / basic)	Замыкания витков, обрыв проводников / Short circuits of turns, breakage of conductors
Дефекты термического характера / Thermal defects		
Перегрев масла / Oil overheating (> 600 °C)	C ₂ H ₄ (основной/ basic), H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆	Нагрев контактов, вихревые токи в магнитопроводе / Heating of contacts, eddy currents in the mag- netic circuit
Перегрев масла / Oil overheating (400–600 °C)	CH ₄ (основной / basic)	Локальные перегревы / Local overheating
Старение/перегрев целлюлозной изоляции Aging/Overheating of Cellulose Insulation	CO, CO ₂ (основные / pri- mary)	Термоокислительная деструкция бумажной изоляции / Thermal- Oxidative Degradation of Paper Insulation

Повышение информативности системы мониторинга, безусловно, увеличивает достоверность диагностики. Однако существует экономический компромисс: рост надежности на проценты может привести к удорожанию системы в разы. Предлагаемая АСУОМТ оптимизирует этот баланс за счет использования стандартных промышленных компонентов и фокусировки на критически важных диагностируемых параметрах. На рисунке 4 показаны опыты с всплывающим инертным газом, в виде пузырьков диаметром 0.3–0.6 мм со скоростью 0.02 м/с. Барботер в установке установлен сразу над трансформатором, на глубине 20 см от поверхности трансформаторного масла.

Как видно из рисунка 4, благодаря барботажу температурное поле в резервуаре над трансформатором и в средней части трансформатора почти одинаково изменяется, это говорит о том, что несмо-

тря на то, что пузырьки всплывают над трансформатором, они создают конвективные потоки в трансформаторном масле не только там, где всплывает инертный газ, но и ниже, т.е. в масле образуются конвективные потоки, доходящие до средней рабочей области трансформатора, таким образом, происходит локальное охлаждение «горячих точек»;

— в момент времени эксперимента (5 ч) локальная температура в верхней и средней рабочей областях при барботаже на 1–2 °С ниже, чем без барботажа.

Результаты

1. В ходе исследования решена задача разработки и теоретического обоснования интеллектуальной системы аварийного охлаждения силовых масляных трансформаторов, предназначенной для работы в предаварийных и аварийных режимах.

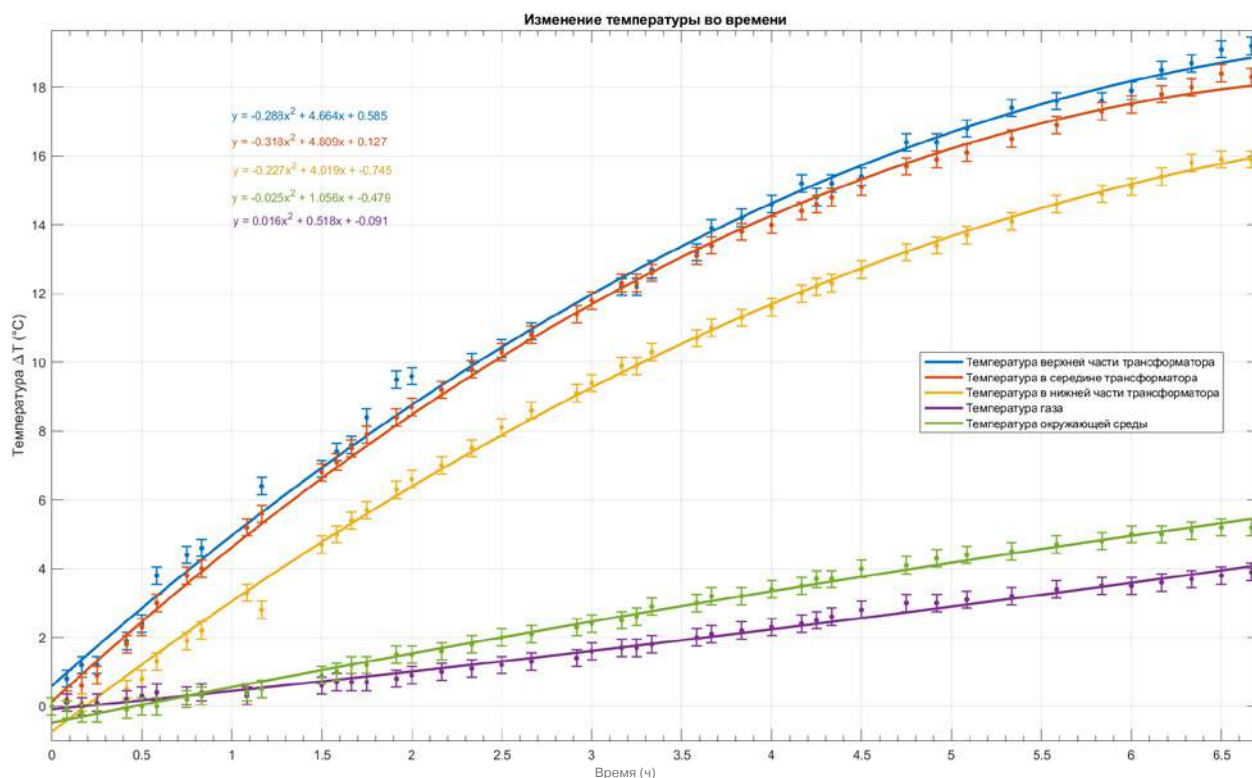


Рисунок 4. Графики температурного поля в трансформаторном масле при наличии всплывающих пузырьков

Figure 4. Graphs of the temperature field in transformer oil in the presence of floating bubbles

2. Разработана принципиальная схема двухконтурной системы охлаждения, использующей элегазово-масляный теплообмен с барботажем.

3. Теоретически обоснован механизм интенсификации теплоотвода за счет трансцилляторного переноса, возникающего при всплывании пузырьков элегаза через объем масла.

Список источников

1. Фокеев А.Е., Новоселов М.Л. Измерительный комплекс для определения режима работы силовых трансформаторов / Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 3. С. 33-40. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-33-40. EDN: XOBBRQ.

2. Khismatullin A.S. Automated Software to Determine Thermal Diffusivity of Oilgas Mixture // Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 052013. DOI:10.1088/1742-6596/1015/5/052013.

3. Хакимьянов М.И., Шабанов В.А. Входные многообмоточные трансформаторы для многоуровневых преобразователей частоты // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 5. С. 47-54. https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_8.pdf.

4. Хакимьянов М.И., Шабанов В.А. Анализ изобретений в области входных многообмоточных трансформаторов для многоуровневых инверторов // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 1. С. 159-164.

5. Пат. 183146 U1 РФ, МПК Н 01 F 27/12. Установка для трансцилляторного охлаждения масляного трансформатора элегазом / Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Сиротина Е.В. № 2018117055, Заявлено 07.05.18; Опубл. 12.09.2018. Бюл. № 2.

6. Коржов А.В., Сафонов В.И., Дзюба М.А. и др. Математическая модель прогнозирования остаточного ресурса изоляции по режимным параметрам // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23. № 1. С. 56-64. DOI: 10.14529/power230106. EDN: BRLTJQ.

7. Khismatullin A.S. Method for Increasing Oil Resources Transformers with Longterm Operation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 022058. DOI:10.1088/1757-899X/327/2/022058.

8. Пат. 2764732 C1 РФ, МПК Н 01 F 27/08, Н 02 Н 5/04. Устройство для охлаждения масляного трансформатора / Баширов М.Г., Хисма-

4. Разработан алгоритм автоматического управления для предложенной системы (АСУОМТ), интегрирующий контроль температуры, давления и данных хроматографического анализа газов.

5. Определен перечень диагностируемых дефектов (перегревы, разряды, старение изоляции) на основе корреляции с газовыми маркерами.

туллин А.С., Каримова Ш.Д. № 2021107619; Заявлено 22.03.21; Опубл. 20.01.2022. Бюл. № 2.

9. Бажанов А.Г., Бойков В.Е. Контур с пульсирующей циркуляцией жидкого теплоносителя для охлаждения масляного трансформатора // Инженерный вестник Дона. 2023. № 2 (98). С. 574-584. EDN: HOUXBW.

10. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Галлямов Р.У. Интегральный критерий оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов // Энергетик. 2016. № 7. С. 24-26. EDN: WIENDT.

References

1. Fokeyev A.E., Novoselov M.L. Izmeritel'nyy kompleks dlya opredeleniya rezhima raboty silovykh transformatorov [Measuring Complex for Determining the Operating Conditions of Power Transformers]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve — Intelligent Systems in Manufacturing*, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 33-40. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-33-40. EDN: XOBBRQ. [in Russian].

2. Khismatullin A.S. Automated Software to Determine Thermal Diffusivity of Oilgas Mixture. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, pp. 052013. DOI:10.1088/1742-6596/1015/5/052013.

3. Khakim'yanov M.I., Shabanov V.A. Vkhodnyye mnogoobmotochnyye transformatory dlya mnogourovnevnykh preobrazovateley chastoty [Input Multiwinding Transformers for Multilevel Inverters]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2012, No. 5, pp. 47-54. https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_8.pdf. [in Russian].

4. Khakim'yanov M.I., Shabanov V.A. Analiz izobreteniy v oblasti vkhodnykh mnogoobmotochnykh transformatorov dlya mnogourovnevnykh invertorov [Analysis of the Inventions Input Multiwinding Transformers for Multi-Level Inverters]. *Neftegazovoye delo —*

Petroleum Engineering, 2012, Vol. 10, No. 1, pp. 159-164. [in Russian].

5. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Siro-tina E.V. *Ustanovka dlya transtillyatornogo okhlazhdeniya maslyanogo transformatora elegazom* [Installation for Transcillatory Cooling of an Oil Transformer with SF6 Gas]. Patent RF, No. 183146, 2018. [in Russian].

6. Korzhov A.V., Safonov V.I., Dzyuba M.A. e.a. *Matematicheskaya model' prognozirovaniya ostatochnogo resursa izolyatsii po rezhimnym parametram* [A Mathematical Model for Predicting the Residual Resource of Insulation Based on the Operating Parameters]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika — Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2023, Vol. 23, No. 1, pp. 56-64. DOI: 10.14529/power230106. EDN: BRLTJQ. [in Russian].

7. Khismatullin A.S. Method for Increasing Oil Resources Transformers with Longterm Operation. *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering, 2018, pp. 022058. DOI:10.1088/1757-899X/327/2/022058.

8. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Kari-mova Sh.D. *Ustroystvo dlya okhlazhdeniya maslyanogo transformatora* [Device for Cooling of an Oil Transformer]. Patent RF, No. 2764732, 2022. [in Russian].

9. Bazhanov A.G., Boykov V.Ye. *Kontur s pul'siruyushchey tsirkulyatsiyey zhidkogo teplonositelya dlya okhlazhdeniya maslyanogo transformatora* [Pulsating Liquid Circuit for Cooling an Oil-Filled Transformer]. *Inzhenernyy vestnik Dona — Engineering Journal of Don*, 2023, No. 2 (98), pp. 574-584. EDN: HOUXBW. [in Russian].

10. Bashirov M.G., Khismatullin A.S., Gallyamov R.U. *Integral'nyy kriteriy otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh maslyanykh transformatorov* [Integral Criterion for Assessing the Technical Condition of Power Oil Transformers]. *Energetic — Energetic*, 2016, No. 7, pp. 24-26. EDN: WIENDT. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 03.10.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 17.10.2025.

The article was submitted 03.10.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 17.10.2025.

Научная статья

УДК 691.54

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-111-121

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И СРЕДНЕПОВЕРХНОСТНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦ

**Александр Николаевич Пудовкин****Alexander N. Pudovkin**

кандидат технических наук,

доцент кафедры «Строительные конструкции»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Дмитрий Анатольевич Виноградов****Dmitry A. Vinogradov**

кандидат технических наук,

доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Сергей Викторович Астраханцев****Sergey V. Astrakhancev**

старший преподаватель кафедры

«Прикладные и естественнонаучные дисциплины»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Виктория Владимировна Соколова****Victoriya V. Sokolova**

кандидат филологических наук,

доцент кафедры иностранных языков,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Игорь Вадимович Недосеко****Igor V. Nedoseko**

доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Строительные конструкции»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Актуальность

Контроль качества материалов стал неотъемлемой частью строительной отрасли, как на этапе производства, так и во время их применения. С увеличением автоматизации и механизации производственных процессов возрастает значимость лабораторного контроля как характеристик исходных материалов, так и конечной продукции, а также параметров технологических процессов. Стремительное развитие технологий измерений и лабораторных испытаний способствует увеличению их доли в общих затратах на производство и эксплуатацию продукции в строительной отрасли.

В современных строительных лабораториях, оборудованных высокотехнологичными испытательными машинами и приборами, осуществляется тестирование разнообразных материалов, отличающихся по назначению, структуре и составу. Лаборатории оснащены современными устройствами и необходимыми программными средствами.

Непрерывное расширение ассортимента строительных материалов также отражается на увеличении объема испытаний и расчетов, выполняемых строительными лабораториями.

Вышеизложенное подчеркивает необходимость повышения качества анализируемой сырьевой смеси, что достигается за счет автоматизации процесса расчета удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц.

Цель исследования

Методология определения удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц состоит из ряда последовательных этапов, целью которых является точное измерение указанных характеристик. С целью оптимизации данного процесса разработаны специализированные программные инструменты, которые значительно ускоряют вычислительные процедуры. Применение вычислительных систем для автоматизации расчетов способствует повышению точности и эффективности, что имеет особое значение в условиях современного производства.

Методы исследования

В качестве основы данного исследования использован метод оценки удельной поверхности, основанный на измерении сопротивления, оказываемого воздухом, проходящим через слой уплотненного материала. Кроме того, представлен пример автоматизированной методики расчета удельной поверхности с использованием компьютерной программы. Автоматизированный анализ полученных экспериментальных данных осуществлен с применением языка программирования Delphi, который предназначен для разработки прикладного программного обеспечения.

Результаты

Представлено решение задач, касающихся определения удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц в процессе производства дисперсных материалов с использованием обобщенного подхода. Все собранные данные по сырьевой смеси обрабатываются с помощью программы для ЭВМ. Результаты проведенных исследований позволяют применять предложенную автоматизированную методику расчёта в дальнейших исследованиях, что способствует оптимизации структуры производств в строительной отрасли. Внедрение автоматизации для обработки исходных данных позволит достичь новых ускоренных результатов исследований, что, в свою очередь, улучшит оценку эффективности принятия решений в процессе лабораторного контроля сырьевой смеси.

Ключевые слова

гильза, кювета, мерный стакан, навеска порошка, плунжер, сосуд, сырьевая смесь, удельная поверхность

Для цитирования: Пудовкин А. Н., Виноградов Д. А., Астраханцев С. В., Соколова В. В., Недосеко И. В. Автоматизация контроля качества удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 111-121. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-111-121>.

Original article

AUTOMATION OF QUALITY CONTROL OF SPECIFIC SURFACE AREA OF RAW MATERIAL MIXTURE AND AVERAGE SURFACE PARTICLE SIZE

Relevance

Quality control of materials has become an integral part of the construction industry both at the production stage and during their use. With the increase in automation and mechanization of production processes, the importance of laboratory control of both the characteristics of raw materials and final products, as well as the parameters of technological processes, increases. The rapid development of measurement technologies and laboratory tests contributes to an increase in their share in the total costs of production and operation of products in the construction industry.

In modern construction laboratories equipped with high-tech testing machines and devices, testing of various materials is carried out, differing in purpose, structure and composition. The laboratories are equipped with modern devices and the necessary software.

The continuous expansion of the range of building materials is also reflected in the increase in the volume of tests and calculations performed by construction laboratories.

The above emphasizes the need to improve the quality of the analyzed raw mixture, which is achieved by automating the process of calculating the specific surface area of the raw mixture and the average surface size of the particles.

Aim of research

The methodology for determining the specific surface area of the raw mix and the average surface size of the particles consists of a number of successive stages, the purpose of which is to accurately measure the specified characteristics. In order to optimize this process, specialized software tools have been developed that significantly speed up the computational procedures. The use of computer systems for the automation of calculations helps to increase the accuracy and efficiency, which is of particular importance in the conditions of modern production.

Research methods

The method of specific surface area estimation based on the measurement of resistance exerted by air passing through a layer of compacted material is used as the basis of this study. In addition, an example of an automated method of specific surface area calculation using a computer program is presented. Automated analysis of the obtained experimental data is carried out using the Delphi programming language, which is intended for the development of application software.

Results

The solution of problems concerning determination of specific surface of raw mix and average surface size of particles in the process of production of dispersed materials using the generalized approach is presented.

Keywords

sleeve, cuvette, measuring cup, powder sample, plunger, vessel, raw material mixture, specific surface area

All collected data on raw mix are processed using the computer program. The results of the conducted research allow to apply the proposed automated calculation method in further research, which contributes to optimization of production structure in the construction industry. Introduction of automation for processing of initial data will allow to achieve new accelerated results of research, which, in turn, will improve the assessment of efficiency of decision-making in the process of laboratory control of raw mix.

For citation: Pudovkin A. N., Vinogradov D. A., Astrakhancev S. V., Sokolova V. V., Nedoseko I. V. Avtomatizatsiya kontrolya kachestva udel'noy poverkhnosti syr'yevoy smesi i srednepoverkhnostnogo razmera chastits [Automation of Quality Control of Specific Surface Area of Raw Material Mixture and Average Surface Particle Size]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 111-121 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-111-121>.

Введение

Основой распространенного метода определения удельной поверхности является связь между воздухопроницаемостью материала и его дисперсностью. Этот метод базируется на измерении сопротивления, оказываемого воздухом при его прохождении через слой уплотненного материала с установленной толщиной и площадью поперечного сечения.

Прибор ПСХ, в свою очередь, использует другой принцип работы для оценки воздухопроницаемости. В этом устройстве воздух подается через образец с переменным давлением, что позволяет более точно измерять изменение потока в зависимости от характеристик образца. Обычно применяется система, состоящая из компрессора, регулятора давления и манометра, что обеспечивает возможность контроля и настройки параметров испытания. Для более детального анализа результаты измерений могут быть записаны и обработаны с помощью специализированного программного обеспечения, что позволяет проводить статистическую обработку данных и строить графики зависимости воздухопроницаемости от различных факторов, таких как температура, влажность и размер частиц порошка [1, 2]. Представленные приборы играют важную роль в

различных отраслях, включая строительную, химическую и фармацевтическую, где воздухопроницаемость материалов имеет критическое значение. Например, в строительстве это влияет на теплоизоляционные характеристики стеновых материалов, а в фармацевтике — на качество упаковки и срок годности препаратов.

Выбор между прибором ПСХ и прибором Товарава зависит от конкретных требований испытания, доступного оборудования и необходимых условий для измерения воздухопроницаемости. Продолжение исследований и разработка новых методов измерения позволят улучшить точность и надежность получаемых данных, что в свою очередь будет способствовать повышению качества производимых материалов.

При проведении эксперимента важно обеспечить равномерное распределение давления на слой порошка, чтобы минимизировать влияние неоднородностей на результаты. Плунжер, опускаясь, создает однородное давление на порошок, который равномерно уплотняется, что позволяет получить стабильные образцы для последующего анализа (рисунок 1). После завершения процесса уплотнения в нижней камере кюветы могут проводиться различные эксперименты, такие как измерение пористости, прочности на

сжатие или других физических характеристик материала. Для этого в нижнюю камеру могут быть подключены различные датчики и устройства, которые позволят проводить мониторинг и сбор данных в реальном времени. Кроме того, для обеспечения корректности и воспроизводимости результатов следует внимательно следить за переменными эксперимента, такими как температура и влажность воздуха, а также избегать загрязнения образца. При необходимости можно проводить серию тестов с различными видами порошков для сопоставления их характеристик и выявления закономерностей в поведении материалов при различных условиях.



Рисунок 1. Прибор ПСХ

Figure 1. Device for determining the specific surface area and average particle size of dispersed materials

Перед началом процесса определения сосуд Мариотта заполняют водой и закрывают резиновой пробкой. Далее проверяют герметичность устройства. Если все соединения надежны, то при открытии крана из сосуда выйдет неболь-

шой объем воды, эквивалентный объему воздуха в системе.

Вырезают из неплотной фильтровальной бумаги кружки диаметром 25 мм, один кружок кладут на перфорированное дно (решетку) [1].

Величину навески порошка G определяют по формуле:

$$G = \rho_{\text{и}} \cdot V \cdot (1 - \Pi), \quad (1)$$

где $\rho_{\text{и}}$ — истинная плотность материала, г/см³;

V — объем слоя материала в гильзе, см³;

Π — пористость слоя в долях единицы; $\Pi = 0,48 — 0,52$.

Пробу исследуемого порошка предварительно высушивают при температуре 105–110 °С, разрушают комочки и берут навеску с точностью до 0,01 г. Ориентировочно масса навески составляет 10–13 г. Навеску помещают в гильзу, накрывают вторым кружком фильтровальной бумаги, вставляют плунжер в гильзу и уплотняют слой нажатием руки так, чтобы высота слоя порошка в гильзе была равной 1,5–1,8 см. Высоту уплотненного слоя измеряют с точностью до 0,1 мм и записывают. Затем штуцер гильзы присоединяют к резиновой трубке измерительной части установки.

Открывают кран сосуда с водой и первые 10–15 мл воды не учитывают. После того, как течение воды установится, включают секундомер и определяют время набора определенного объема воды в мерном стакане. Опыт повторяют 3 раза и определяют среднее значение времени истечения определенного объема воды [2].

Величину удельной поверхности S_m , см²/г, определяют по формуле:

$$S_m = \frac{14}{\rho_{\text{и}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\mu_B}} \cdot \sqrt{\frac{\Pi^3 \cdot F \cdot P}{(V_{\text{ж}}/\tau) \cdot (1 - \Pi)^2 \cdot h}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{и}}$ — истинная плотность материала, г/см³;

Π — пористость слоя, отн. ед.;

G — масса, г;
 h — высота слоя материала в кювете, см;

P — гидравлическое сопротивление слоя, см вод. ст.;

$V_{\text{ж}}$ — объем жидкости, набираемой в мерный стакан, см³ (мл);

τ — время фильтрации воздуха, равное времени истечения воды, с;

F — площадь поперечного сечения слоя материала в гильзе, см²;

μ_B — вязкость воздуха, П.

По определенному значению удельной поверхности порошка рассчитывается среднеповерхностный размер его частиц:

$$П = 1 - K_T; \quad (3)$$

$$K_T = \frac{\rho_{\text{слоя}}}{\rho_{\text{и}}}; \quad (4)$$

$$\rho_{\text{слоя}} = \frac{G}{hF}, \text{ г/см}^3. \quad (5)$$

Условный среднеповерхностный размер частиц $d_{\text{ср}}$, см [3]:

$$d_{\text{ср}} = \frac{6}{S_m \cdot \rho_{\text{и}}}. \quad (6)$$

В процессе расчёта удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц возникает необходимость проведения аналитических вычислений, как видно из формул (1)–(6).

Для уменьшения времени обработки полученных данных в ходе лабораторных испытаний была разработана программа для ЭВМ «Программа расчёта сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц».

Программа предназначена для автоматизации методики расчета сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц. Функциональные возможности программы заключаются в определении: величины навески порошка; величины удельной поверхности; среднеповерхностного размера частиц порошка.

Рассмотренная программа для ЭВМ написана с помощью языка программи-

рования Delphi. Представленный язык программирования является объектно-ориентированным, со строгой статической типизацией переменных. Основная область использования — написание прикладного программного обеспечения [3–12].

Ниже представлена блок-схема программы (рисунок 2).

Программа предназначена для уменьшения времени обработки исходных данных при расчете удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц в зависимости от воздухопроницаемости слоя материала и его дисперсности. Функциональные возможности программы заключаются в автоматизированном определении сопротивления, оказываемого воздуху, просасываемому через слой уплотненного материала определенных толщины и площади поперечного сечения [13].

Оконный интерфейс программы расчета удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц представлен на рисунке 3.

Для выполнения многочисленных расчётов навесок порошка, величины удельной поверхности и условного среднеповерхностного размера частиц сырьевой смеси в процессе лабораторного контроля уходит значительное время на вычисления. В связи с этим важным аспектом является эффективная организация испытаний, применение соответствующих приборов и приспособлений, а также автоматизация методики расчётов полученных параметров.

Организация внедрения автоматизированной методики расчета для определения указанных показателей имеет большое значение, так как позволяет исключить ненужные округления (ошибки) в расчетах и, как следствие, получать более точные результаты. Это особенно актуально при организации оперативного лабораторного контроля,

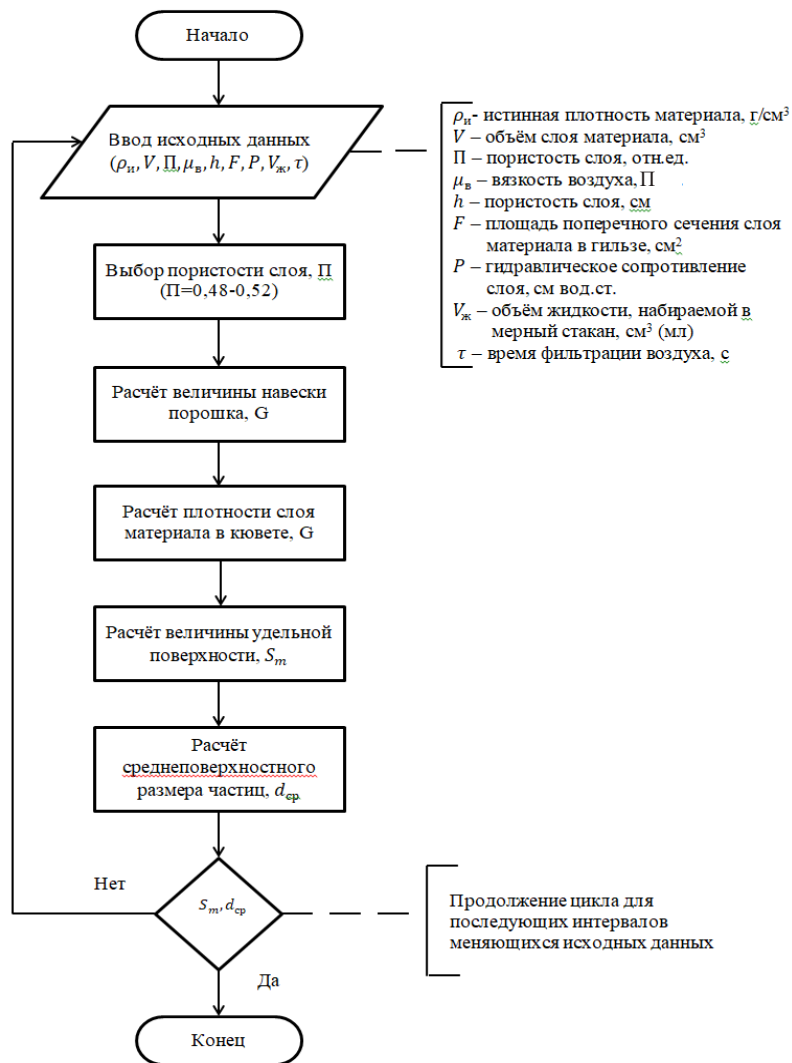


Рисунок 2. Блок-схема программы

Figure 2. Block diagram

Определение удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц

Величина навески порошка:		Величина удельной поверхности:	
Истинная плотность материала ρ_n	3 г/см ³	Вязкость воздуха μ_v	16 пуаз.
Объём слоя материала в гильзе V	8,838 см ³	Пористость слоя Π	0,48 отн. ед.
Пористость слоя Π ($\Pi = 0,48 - 0,52$)	0,48 отн. ед.	Истинная плотность материала ρ_n	3 г/см ³
Величина навески порошка G	13,78728 г	Истинная плотность материала $\rho_{\text{слоя}}$	1,56 г/см ³
Расчёт величины навески порошка		Масса G	13,78728 г
		Высота слоя материала в кювете h	1,8 см
		Площадь поперечного сечения слоя материала в гильзе F	4,91 см ²
		Гидравлическое сопротивление слоя P	30 см. вод. ст.
		Объём жидкости, набираемой в мерный стакан $V_{ж}$	50 см ³ (мл)
		Время фильтрации воздуха, равное времени истечения воды τ	8 с
		Величина удельной поверхности S_m	2,699792672 см ² /г
		Среднеповерхностный размер частиц $d_{ср}$	0,740797625 см
Расчёт удельной поверхности и среднеповерхностного размера частиц			

Рисунок 3. Окно программы с полученными результатами

Figure 3. Program window with the results obtained

например в строительных лабораториях предприятий [14–19].

Использование данных программ для ЭВМ является необходимым для исследовательских и производственных задач, связанных с оперативным контролем на строительных объектах. Это также касается передвижных лабораторий и лабораторий заводов, занимающихся производством строительных материалов, а также производственно-технических отделов строительных и проектных компаний [20–23].

Пример введенных исходных данных и полученных результатов представлен в оконном интерфейсе программы расчета удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц (рисунок 3).

Выводы

1. К числу ключевых задач эффективной организации технологического процесса относится автоматизированное определение величины удельной поверх-

ности и условного среднеповерхностного размера частиц сырьевой смеси, используемой в производстве большинства современных строительных материалов. Результаты, полученные с помощью таких расчетных программ, учитывающих определенное количество параметров, способствуют решению задач управления качеством готовой продукции.

2. Применение вычислительных программ для обработки данных обеспечит новый уровень анализа параметров. Например, станет возможным оперативное получение результатов с учетом множества переменных, таких как высота слоя материала в кювете, гидравлическое сопротивление слоя, объем жидкости и время фильтрации воздуха. Данные вычисления позволят сократить время от нескольких часов до нескольких минут, необходимое для определения технологических параметров с меняющимися исходными данными.

Список источников

1. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.
2. Шмитько Е.И., Крылова А.В., Шаталова В.В. Химия цемента и вяжущих веществ. СПб: Проспект науки, 2006. 206 с.
3. Аминов Ш.Х., Суворов Д.Н., Пудовкин А.Н. История развития структур систем автоматизированного управления (САУ) асфальтобетонными заводами // История науки и техники. 2011. № 12 (Вып. 3). С. 106–111.
4. Zhao Y., Wang X., Jiang J., Zhou L. Characterization of Interconnectivity, Size Distribution and Uniformity of Air Voids in Porous Asphalt Concrete Using X-Ray CT Scanning Images // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 213. P. 182–193. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.056.
5. Gu F., Ma W., West R.C., Taylor A.J., Zhang Y. Structural Performance and Sustainability Assessment of Cold Central-Plant and In-Place Recycled Asphalt Pavements: A Case Study //

Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 208. P. 1513–1523. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.222.

6. Yildirim Z.B., Karacasu M. Modelling of Waste Rubber and Glass Fibber with Response Surface Method in Hot Mix Asphalt // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 227. P. 117070. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117070.

7. Нуйкин Д.А., Кулакова Е.С. Эффективность работы моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 1. С. 113–119. DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-1-113-119.

8. Yuan J., Zhong L., Vakili M., Segun G.A. New Modeling Method to Simulate Asphaltenes at Oil Sands Process in Water Management // Journal of Molecular Graphics and Modelling. 2019. Vol. 91. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jmgm.2019.05.013.

9. Sivilevičius H., Vislavičius K. Simulation of Composition of Recycled Hot-Mix Asphalt Mixture Produced in Asphalt Mixing Plant // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 214. P. 17–27.

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.330.

10. Montoya M.A., Haddock J. E. Estimating Asphalt Mixture Volumetric Properties Using Seemingly Unrelated Regression Equations Approaches // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 225. P. 829-837. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.266.

11. Badretdinov I., Mudarisov S., Lukmanov R., Permyakov V., Ibragimov R., Nasyrov R. Mathematical Modeling and Research of the Work of the Grain Combine Harvester Cleaning System // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 165. P. 104966. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104966.

12. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Имитационное моделирование режимов технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты в программе MatLab // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2021. Т. 17. № 1. С. 120-130. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-120-128.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663812 от 2 ноября 2020 г. «Программа расчета удельной поверхности сырьевой смеси и среднеповерхностного размера частиц» / Синицина Е.А., Пудовкин А.Н., Салов А.С., Недосеко И.В.

14. Movilla-Quesada D., Raposeiras A.C., Silva-Klein L.T., Lastra-González P., Castro-Fresno D. Use of Plastic Scrap in Asphalt Mixtures Added by Dry Method as a Partial Substitute for Bitumen // *Waste Management*. 2019. Vol. 87. P. 751-760. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.018.

15. Ming Huang. Investigation on Production Process of Epoxy Emulsified Asphalt // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 30. P. 380-387. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.053.

16. Yu H., Leng Z., Dong Z., Tan Z., Guo F., Yan J. Workability and Mechanical Property Characterization of Asphalt Rubber Mixtures Modified with Various Warm Mix Asphalt Additives // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 175. P. 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.218>.

17. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Котлярский Э.В., Доценко А.И., Попов В.А. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 2. Практические разработки. М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2009. 608 с.

18. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Попов В.А. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 1. Теоретические основы. М.:

Изд-во Российской инженерной академии, 2009. 297 с.

19. Ostroukh A.V., Nuruev Y.E., Nedoseko I.V., Pudovkin A.N. Development of the Automated Control System for Concrete Plant with Two Units Concrete Mixing // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. No. 17. P. 37792-37798.

20. Khafizov A.R., Bulatov B.G., Pudovkin A.N., Galimov V.M., Nedoseko I.V., Sultanov M.T. Analysis and Modeling of Coating Plant Topology and Automatic Control System // *International Review of Automatic Control*. 2020. Vol. 13. No. 2. P. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v13i2.18256>.

21. Пудовкин А.Н., Салов А.С., Удалова Е.А., Габитов А.И., Лукманов А.Х. Автоматизация методики экспериментальных исследований при испытании образцов тяжелого бетона на прочность // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2023. № 1. С. 42-50. DOI: 10.25791/asu.1.2023.1411.

22. Самхарадзе Т.Г., Пудовкин А.Н., Синицин Д.А., Соколова В.В., Рязанова В.А., Парфенова А.А. Компьютерная автоматизация методики определения содержания глины в комках в песке для строительных работ // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2023. № 7. С. 16-22. DOI: 10.25791/asu.7.2023.1446.

23. Пудовкин А.Н., Удалова Е.А., Анваров Р.А., Габитов С.А., Сулейманов Т.Ф., Аспаев Н.А. Автоматизация методик определения основных характеристик песка для строительных работ // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2023. № 11. С. 21-28. DOI: 10.25791/asu.11.2023.1470.

References

1. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. *Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov* [Chemical Technology of Binders]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 472 p. [in Russian].

2. Shmit'ko Ye.I., Krylova A.V., Shatalova V.V. *Khimiya tsementa i vyazhushchikh veshchestv* [Chemistry of Cement and Binders]. Saint-Petersburg, Prospekt nauki Publ., 2006. 206 p. [in Russian].

3. Aminov Sh.Kh., Suvorov D.N., Pudovkin A.N. Istoriya razvitiya struktur sistem avtomatizirovannogo upravleniya (SAU) asfal'tobetonnyimi zavodami [The History of the Development of Structures of Automated Control Systems (ACS) Asphalt Concrete Plants]. *Istoriya nauki i tekhniki — History of Science and*

Technology, 2011, No. 12 (Issue 3), pp. 106-111. [in Russian].

4. Zhao Y., Wang X., Jiang J., Zhou L. Characterization of Interconnectivity, Size Distribution and Uniformity of Air Voids in Porous Asphalt Concrete Using X-Ray CT Scanning Images. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 213, pp. 182-193. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.056.

5. Gu F., Ma W., West R.C., Taylor A.J., Zhang Y. Structural Performance and Sustainability Assessment of Cold Central-Plant and In-Place Recycled Asphalt Pavements: A Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 2019, Vol. 208, pp. 1513-1523. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.222.

6. Yildirim Z.B., Karacasu M. Modelling of Waste Rubber and Glass Fibber with Response Surface Method in Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 227, pp. 117070. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117070.

7. Nuykin D.A., Kulakova E.S. Effektivnost' raboty modeley nadezhnosti otkazoustoychivoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya [The Efficiency of the Reliability Models of Automated Control System]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 1, pp. 113-119. DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-1-113-119. [in Russian].

8. Yuan J., Zhong L., Vakili M., Segun G.A. New Modeling Method to Simulate Asphaltenes at Oil Sands Process in Water Management. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2019, Vol. 91, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.jmgm.2019.05.013.

9. Sivilevičius H., Vislavičius K. Simulation of Composition of Recycled Hot-Mix Asphalt Mixture Produced in Asphalt Mixing Plant. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 214, pp. 17-27. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.330.

10. Montoya M.A., Haddock J. E. Estimating Asphalt Mixture Volumetric Properties Using Seemingly Unrelated Regression Equations Approaches. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 225, pp. 829-837. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.266.

11. Badretdinov I., Mudarisov S., Lukmanov R., Permyakov V., Ibragimov R., Nasyrov R. Mathematical Modeling and Research of the Work of the Grain Combine Harvester Cleaning System. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 165, pp. 104966. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104966.

12. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Imitatsionnoye modelirovaniye rezhimov tekhnologicheskogo oborudovaniya kompleksno-mekhanizirovannogo zaboya vysokoproizvoditel'noy ugol'noy shakhty

v programme MatLab [Simulation of Complex-Mechanized Downhole Technological Equipment of a High-Performance Coal Mine in the Matlab Program]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 1, pp. 120-130. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-120-128. [in Russian].

13. Sinitsina Ye.A., Pudovkin A.N., Salov A.S., Nedoseko I.V. *Programma rascheta udel'noy poverkhnosti syr'yevoy smesi i srednepoverkhnostnogo razmera chastits* [Program for Calculating the Specific Surface Area of a Raw Material Mixture and the Average Surface Size of Particles]. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2020663812 dated November 2, 2020 [in Russian].

14. Movilla-Quesada D., Raposeiras A.C., Silva-Klein L.T., Lastra-González P., Castro-Fresno D. Use of Plastic Scrap in Asphalt Mixtures Added by Dry Method as a Partial Substitute for Bitumen. *Waste Management*, 2019, Vol. 87, pp. 751-760. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.018.

15. Ming Huang. Investigation on Production Process of Epoxy Emulsified Asphalt. *Procedia Manufacturing*, 2019, Vol. 30, pp. 380-387. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.053.

16. Yu H., Leng Z., Dong Z., Tan Z., Guo F., Yan J. Workability and Mechanical Property Characterization of Asphalt Rubber Mixtures Modified with Various Warm Mix Asphalt Additives. *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 175, pp. 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.218>.

17. Vorob'yev V.A., Suvorov D.N., Kotlyarskiy E.V., Dotsenko A.I., Popov V.A. *Komp'yuternoye modelirovaniye v avtomatizatsii proizvodstva asfal'tobetonnoy smesi* [Computer Modeling in the Automation of Asphalt Concrete Mix Production]. Moscow, Izd-vo Rossiyskoy inzhenernoy akademii, 2009. *Kniga 2. Prakticheskiye razrabotki* [Book 2. Practical Development]. 608 p. [in Russian].

18. Vorob'yev V.A., Suvorov D.N., Popov V.A. *Komp'yuternoye modelirovaniye v avtomatizatsii proizvodstva asfal'tobetonnoy smesi* [Computer Modeling in the Automation of Asphalt Concrete Mix Production]. Moscow, Izd-vo Rossiyskoy inzhenernoy akademii, 2009. *Kniga 1. Teoreticheskiye osnovy* [Book 1. Theoretical Foundations]. 297 p. [in Russian].

19. Ostroukh A.V., Nuruev Y.E., Nedoseko I.V., Pudovkin A.N. Development of the Automated Control System for Concrete Plant with Two Units Concrete Mixing. *International Journal of Applied*

Engineering Research, 2015, Vol. 10, No. 17, pp. 37792-37798.

20. Khafizov A.R., Bulatov B.G., Pudovkin A.N., Galimov V.M., Nedoseko I.V., Sultanov M.T. Analysis and Modeling of Coating Plant Topology and Automatic Control System. *International Review of Automatic Control*, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v13i2.18256>.

21. Pudovkin A.N., Salov A.S., Udalova Ye.A., Gabitov A.I., Lukmanov A.KH. Avtomatizatsiya metodiki eksperimental'nykh issledovaniy pri ispytanii obraztsov tyazhelogo betona na prochnost' [Automation of the Experimental Studies when Testing Samples of Heavy Concrete for Strength Methodology]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery — Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2023, No. 1, pp. 42-50. DOI: 10.25791/asu.1.2023.1411. [in Russian].

22. Samkharadze T.G., Pudovkin A.N., Sinitin D.A., Sokolova V.V., Ryazanova V.A.,

Parfenova A.A. Komp'yuternaya avtomatizatsiya metodiki opredeleniya sodержaniya gliny v komkakh v peske dlya stroitel'nykh rabot [Computers Automation of the Procedure for Determining the Content the Clay Lumps in Sand for Construction Works]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery — Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2023, No. 7, pp. 16-22. DOI: 10.25791/asu.7.2023.1446. [in Russian].

23. Pudovkin A.N., Udalova E.A., Anvarov R.A., Gabitov S.A., Suleymanov T.F., Aspayev N.A. Avtomatizatsiya metodik opredeleniya osnovnykh kharakteristik peska dlya stroitel'nykh rabot [Automation of Methods for Determining the Main Characteristics of Sand for Construction Work]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery — Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2023, No. 11, pp. 21-28. DOI: 10.25791/asu.11.2023.1470. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 03.10.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 14.10.2025.

The article was submitted 03.10.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 14.10.2025.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 3. С. 122–129. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2025. Vol. 21. No. 3. P. 122–129. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 520.628

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-122-129

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И МИНИАТЮРИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ



Ирина Леонидовна Виноградова

Irina L. Vinogradova

доктор технических наук,
профессор кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия



Вильдан Радикович Юнусов

Vildan R. Yunusov

студент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

Актуальность

В настоящее время наблюдается немалый рост применения антенных систем различного направления. Они применимы как в гражданской деятельности для обеспечения, например, навигации, связи, радиовещания, так и применимы в военной деятельности для обеспечения связи, передачи команд и координат или создания помех при передаче информации противником. Часто для размещения антенных устройств в других устройствах или для сохранения их скрытности большую роль играют размеры.

Учитывая это, создание антенных систем с меньшими размерами при сохранении их эффективности и параметров остается актуальной проблемой. На данный момент на этапе проектирования антенн все чаще применяются различные метаматериалы, направленные на достижение вышеуказанных целей.

Цель исследования

Целью данной работы является экспериментальная верификация эффективности применения метаматериалов в антенных системах для преодоления недостатков традиционных антенн.

Методы исследования

Применены методы исследования: аналитический обзор литературы, экспериментальная верификация на основе сравнительного анализа данных.

Результаты

Установлены ключевые недостатки традиционных типов антенн, выявлена необходимость применения метаматериалов в антенных

Ключевые слова

метаматериалы,
миниатюризация,
антенная техника,
антенные системы,
показатель преломления,
магнитная реактивность,
магнитная проницаемость

системах. Приведены ключевые достоинства применения метаматериалов при производстве антенных систем, аспекты и экспериментальное доказательство эффективности метаматериалов для увеличения полосы пропускания, повышения КПД и большей миниатюризации антенны.

Для цитирования: Виноградова И. Л., Юнусов В. Р. Применение метаматериалов в антенной технике: повышение эффективности и миниатюризация устройств // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 122-129. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-122-129>.

Original article

APPLICATION OF METAMATERIALS IN ANTENNA TECHNOLOGY: INCREASING EFFICIENCY AND MINIATURE DEVICES

Relevance

Currently, there has been a significant increase in the use of antenna systems in various applications. They are used in civilian applications, such as navigation, communications, and broadcasting, as well as in military applications, such as communications, command and coordinate transmission, or jamming enemy communications. Size often plays a significant role in integrating antenna devices within other devices or maintaining their stealth.

Given this, the creation of smaller antenna systems while maintaining their efficiency and performance remains a pressing issue. Currently, various metamaterials are increasingly being used in antenna design to achieve these goals.

Aim of research

Aim of research of this study is to experimentally verify the effectiveness of metamaterials in antenna systems to overcome the shortcomings of traditional antennas.

Research Methods

The following methods were used: a literature review, experimental verification, and comparative data analysis.

Results

The key disadvantages of traditional antenna types are discussed, and the need for metamaterials in antenna systems is identified. The key advantages of using metamaterials in antenna system manufacturing are presented, along with aspects and experimental evidence of their effectiveness in increasing antenna bandwidth, efficiency, and miniaturization.

Keywords

metamaterials,
miniaturization, antenna
technology, antenna
systems, refractive index,
magnetic reactance,
magnetic permeability

For citation: Vinogradova I. L., Yunusov V. R. *Primeneniye metamaterialov v antennoy tekhnike: povysheniye effektivnosti i miniaturizatsiya ustroystv* [Application of Metamaterials in Antenna Technology: Increasing Efficiency and Miniature Devices]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 122-129 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-122-129>.

Введение

Данная работа посвящена анализу потенциала применения метаматериалов в антенной технике с целью повышения эффективности и миниатюризации размеров. Выбранная область не является частью традиционных телекоммуникационных технологий и представляет собой совокупность методов для улучшения различных характеристик антенной и радиотехники. Существенными недостатками традиционных микрополосковых антенн являются ограниченная мощность и полоса пропускания, а также низкая эффективность и потери [1]. Высокие диэлектрические потери на высоких частотах снижают КПД. Зеркальные антенны обычно имеют большие габариты и массу, а также чувствительны к деформациям, что может приводить к искажениям диаграммы направленности.

Производство широкодиапазонных специализированных антенн даёт возможность тонкой настройки их функционирования в различных частотных областях. Метаповерхности, обладающие широкими возможностями, способны эффективно работать сразу в нескольких диапазонах частот, сохраняя при этом исходную геометрию. А функция перенастройки открывает перспективы для модификации рабочей частоты и формы диаграммы излучения. По сравнению с довольно крупными параболическими отражателями, требующими значительного пространства, плоские линзы, созданные на базе метаматериалов, компактны. Кроме того, малое затухание сигнала в метаповерхностях снижает потери энергии, что сложно реализовать в классических зеркальных конструкциях. Учитывая изложенное, ключевыми ограничениями привычных антенн выступают их крупные размеры, ограниченная полоса пропускания и заметные потери мощности.

Для устранения указанных недостатков, рассмотренных в предыдущих примерах, предлагаются антенны, использующие метаматериалы в качестве искусственных сред с особыми характеристиками. Цель данного исследования заключается в анализе методов интеграции метаматериалов в антенны и проведении экспериментальной верификации их эффективности.

Теоретические основы применения метаматериалов

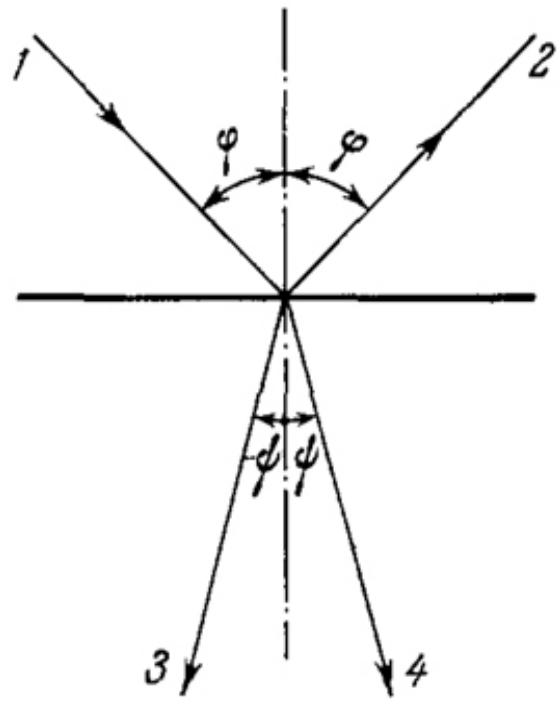
Метаматериалы характеризуются тем, что их электромагнитные характеристики во многом зависят от формы и расположения элементов, а не только от состава. Благодаря этому они проявляют уникальные эффекты, которые не наблюдаются в природных материалах, например, отрицательное значение показателя преломления, возможность воздействия на поверхностные волны и сокрытие объектов в заданных частотных областях. Отличия от обычных материалов заключаются в следующем:

- наличие отрицательного показателя преломления;
- возможность управления дисперсией и проявление резонансных явлений;
- формирование эффективной однородной среды.

Отрицательный показатель преломления. В традиционных материалах (где $\epsilon > 0$ и $\mu > 0$) фазовая и групповая скорости движутся в одном направлении. Однако в метаматериалах возможно достижение значений $\epsilon < 0$ (отрицательная диэлектрическая проницаемость) и $\mu < 0$ (отрицательная магнитная проницаемость), что приводит к возникновению отрицательного показателя преломления ($n < 0$). Для большинства материалов показатель преломления n остается положительным. При этом после пересечения границы параллельная ей компо-

нента волнового вектора световой волны (а значит, и фазовой скорости волны) остается неизменной. Так как групповая и фазовая скорости сонаправлены, то меняется лишь угол между световым лучом и нормалью к поверхности (рисунок 1). Около полувека тому назад советский физик В.Г. Веселаго предположил возможность существования материалов с отрицательными значениями диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей [2]. В них групповая скорость световой волны направлена противоположно фазовой. Если луч попадает в такой материал из «нормальной» среды, то параллельная границе раздела компонента групповой скорости световой волны поворачивается на сто восемьдесят градусов, то есть луч отклоняется от границы в другую сторону, нежели при $n > 0$, что формально эквивалентно отрицательному коэффициенту преломления (рисунок 1). Эффект Веселаго, предсказанный ранее, проявляется в метаматериалах и открывает возможности для создания так называемых линз Веселаго (или суперлинз). Они способны фокусировать световой поток, исходящий из точечного источника, в определенную точку за границей раздела, достигая разрешения, превышающего предел дифракции. Эффективная однородная среда отражает поведение метаматериала при рассмотрении его на достаточно крупных масштабах, когда детализация его микроструктуры становится несущественной по сравнению с длиной рассматриваемой волны. Такой подход существенно облегчает процесс анализа и моделирования электромагнитного взаимодействия с этими материалами.

Благодаря сложной структуре и параметрам метаматериалы демонстрируют разнообразные дисперсионные свойства, позволяющие эффективно направлять распространение волн, регулируя их скорость и траекторию [3]. Для точного кон-



3 — отрицательный показатель преломления; 4 — положительный показатель преломления

3 — negative refractive index;
4 — positive refractive index

Рисунок 1. Прохождение светового луча через границу с положительным и отрицательным показателями преломления

Figure 1. Passage of a light beam through a boundary with a positive and negative refractive indices

троля над дисперсией и формирования заданных характеристик распространения волн широко применяются конструкции с периодически расположенными элементами, такими как резонаторы [4]. Такое дисперсионное управление открывает путь к созданию «суперлинз», обеспечивающих фокусировку света в областях, меньших по размеру, чем длина волны.

В метаматериалах активно используются резонансные эффекты для интенсификации взаимодействия с электромагнитным излучением. Резонаторы, например, можно настраивать на конкретные частоты, вызывая значительное поглощение или рассеивание энергии волн [5,

6]. Резонанс может быть использован для создания «поглощающих» метаматериалов, которые эффективно поглощают электромагнитные волны на определенных частотах.

В метаматериалах дисперсионное управление и резонансные процессы неразрывно связаны между собой. Резонанс может существенно усилить эффекты дисперсии, в то время как контроль над дисперсией предоставляет возможность более точного регулирования резонансных свойств материалов. Это взаимное дополнение открывает новые перспективы в разработке передовых технологий, включая создание фильтров и линз с заданными характеристиками, разработку инновационных звукопоглощающих конструкций и улучшение параметров антенных устройств.

Применение метаматериалов в антенной технике для повышения эффективности и миниатюризации устройств

Рассмотрим электрические малые антенны (ЭМА). Электрическими малыми антеннами принято считать антенны, размеры которых существенно меньше длины волны, обозначенной как l [7]. Альтернативное определение указывает, что ЭМА — это антенна, у которой наибольшая протяженность, измеренная от входных зажимов, не превосходит величину $l/8$ [2].

Иными словами, ЭМА представляют собой антенны, которые удовлетворяют следующему требованию:

$$ka \ll l,$$

где $k = \frac{2\pi}{l}$ — волновое число;

l — длина волны;

a — радиус условной сферы, которая включает в себя наибольший размер антенны-диполя, или же радиус соответствующей полусферы, если речь идет о монополе [8] (рисунок 2).



Рисунок 2. Определение понятия ЭМА

Figure 2. Definition of the concept of small electric antennas

Поверхность сферы часто воспринимается как условная граница, разделяющая ближнее и дальнее поля, создаваемые излучающей электромагнитной волной [9]. Для описания этих границ была введена концепция фактора излучаемой мощности, который по своему физическому значению является противоположностью добротности антенны и эквивалентен полосе пропускания по импедансу. Электромагнитные антенны имеют значительные ограничения, такие как высокая реактивная составляющая импеданса и высокая добротность Q , что в свою очередь приводит к узкой полосе пропускания [10].

Импеданс ЭМА имеет вид:

$$Z_{\text{акт}} = R_{\text{изл}} + R_{\text{пот}} + iX,$$

где $R_{\text{изл}}$ — сопротивление излучения;

$R_{\text{пот}}$ — сопротивление потерь;

iX — реактивное сопротивление.

При $ka \ll 1$ $|X| \gg R_{\text{изл}}$, что приводит к низкому КПД:

$$\eta = \frac{R_{\text{изл}} + R_{\text{пот}}}{R_{\text{изл}}}.$$

Метаматериалы позволяют вводить отрицательную реактивность, что помогает устранить недостатки Х-образных

антенн [11]. Ключевой характеристикой этих материалов является наличие отрицательного реактивного сопротивления, которое может быть как ёмкостным, так и индуктивным. Именно это свойство открывает возможности для преодоления ограничений, присущих традиционным антеннам. Данный эффект обусловлен уникальными дисперсионными свойствами, которые не наблюдаются у природных материалов [12].

Для среды с $\varepsilon < 0$ или $\mu < 0$ волновое сопротивление становится комплексным:

$$Z_{\text{мета}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{\mu_{\text{eff}}}},$$

где ε_{eff} — эффективная диэлектрическая проницаемость;

μ_{eff} — эффективная магнитная проницаемость.

Если $\varepsilon_{\text{eff}} = -|\varepsilon|$ и $\mu_{\text{eff}} = -|\mu|$, то $Z_{\text{мета}}$ остается вещественным, но фазовая скорость меняет знак.

Использование метаматериалов даёт возможность обойти барьер Чу-Харрингтона. Эта концепция описывает теоретический лимит, который определяет наименьшее допустимое значение качества (и, соответственно, наибольшую ширину полосы частот) в крошеч-

ных антеннах, габариты которых значительно меньше длины волны излучаемого сигнала [13]. Данный эффект устанавливает зависимость между качеством антенны, обозначаемым Q , и её физическими характеристиками. Уменьшение размеров антенны приводит к увеличению её качества, но при этом сужается диапазон рабочих частот.

Для антенн, где поляризация линейная, минимальная добротность вычисляется следующим образом:

$$Q_{\min} = \frac{Q \geq 1}{ka^3 + \frac{1}{ka}},$$

где $ka \ll 1$;

Q — добротность;

k — волновое число;

a — радиус сферы.

Метаматериалы создают искусственную магнитную реактивность, т.е. есть имитируют магнитный отклик в тех диапазонах частот, где естественные материалы неэффективны [10]. Искусственная μ позволяет мнимо увеличить кажущийся размер антенны a . Вблизи резонанса метаматериала реактивность меняет знак, что расширяет полосу пропускания:

$$\omega = \omega_{\text{res}},$$

где ω_{res} — резонансная частота антенны.

Таблица 1. Сравнение параметров классической ЭМА и ЭМА с метаматериалом

Table 1. Comparison of parameters of classical EMA and EMA with metamaterial

Параметр	$-j1200$ Классическая ЭМА	$+j1200$ ЭМА с метаматериалом (SRR-оболочка)	Комментарий
Реактивная составляющая X (Ом)	(ёмкостной характер)	(компенсировано)	Метаматериал добавляет индуктивность
Добротность Q	≥ 300	≈ 50	Снижение в 6 раз
Полоса пропускания BW , %	0,3	2	Увеличение в 6,7 раза
КПД η , %	15	70	Уменьшение потерь
Размеры	$\frac{\lambda}{10} \cdot \frac{\lambda}{10}$	$\frac{\lambda}{12} \cdot \frac{\lambda}{12}$	Миниатюризация на 20 %

Метаматериалы с возможностью изменения реактивности демонстрируют уникальные свойства: ниже резонансной частоты они ведут себя как искусственный индуктор, а выше — как искусственная ёмкость [14]. В области перехода происходит компенсация собственной реактивности антенны, что обеспечивает ряд преимуществ по сравнению со стандартными электромагнитными аппроксимациями. Ширина рабочей полосы увеличивается в 2–5 раз по сравнению с обычными ЭМА (таблица 1). При габаритах антенны, составляющих 0.1 длины волны, достигается относительная полоса пропускания в диапазоне от 5 % до 10 %, тогда как без использования метаматериала этот показатель обычно находится в пределах 0,5–1,0 % [15].

Выводы

Проведен анализ использования метаматериалов в разработке антенн для повышения их эффективности и умень-

шения габаритов. Рассмотрены ключевые свойства метаматериалов, включая отрицательный показатель преломления, возможность управления дисперсией, резонансные эффекты и концепцию эффективной однородной среды. В результате исследования достигнуто улучшение характеристик реактивного сопротивления, добротности и полосы пропускания электрически малой антенны благодаря использованию облоочки из структурных резонаторов (SRR). Можно сделать вывод, что применение метаматериалов в антенных системах:

- уменьшает линейные размеры антенны приблизительно на 20 %;
- расширяет полосу пропускания приблизительно в 7 раз;
- снижает добротность приблизительно в 6 раз;
- повышает КПД антенны приблизительно в 5 раз.

Список источников

1. Неганов В.А. Устройства СВЧ и антенны: Проектирование, конструктивная реализация, примеры применения устройств. М.: URSS, 2022. 608 с. ISBN 978-5-9710-6987-4.
2. Белоусов О.А., Федюнин П.А. Антенны. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2022. 411 с. ISBN 978-5-507-51816-6.
3. Дементьев А.Н. Метаматериалы в радиоэлектронике: от исследований к разработкам. М.: Техносфера, 2023. 249 с. ISBN 978-5-94836-674-6.
4. Финкель М.И., Щербатенко М.Л. Терагерцовые сверхширокополосные гибридные антенны. М.: МПГУ, 2017. 73 с. ISBN 978-5-4263-0568-7.
5. Грибанов А.С. Помехозащищенность систем связи. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 365 с. ISBN 978-5-9729-1243-8.
6. Возианова А.В. Нанопотоника: учебно-методическое пособие для вузов. Санкт-Петербург: ИТМО, 2022. 92 с.
7. Шабунин С.Н. Антенны и устройства (СВЧ): расчет и измерение характеристик: учеб-

ное пособие для вузов. М.: Издательство «Юрайт», 2017. 139 с. ISBN 978-5-534-03401-1.

8. Кечиев Л.Н. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры. М.: Грифон, 2020. 482 с. ISBN 978-5-98862-530-8.
9. Аполлонский С.М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебное пособие. СПб: Издательство «Лань», 2012. 592 с. ISBN 978-5-8114-1155-9.
10. Филонов А.А. Устройства СВЧ и антенны. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. 492 с. ISBN 978-5-16-012903-7.
11. Иванов Д.А. Композиционные материалы. М.: Издательство «Юрайт», 2024. 253 с. ISBN 978-5-534-11618-2.
12. Астапенко В.А. Электромагнитные процессы в среде, наноплазманика и метаматериалы. М.: Интеллект, 2012. 243 с. ISBN 978-5-91559-111-9.
13. Григоров И.Н. Практические конструкции антенн. М.: ДМК Пресс, 2011. 353 с. ISBN 5-89818-061-3.
14. Зырянов Ю.Т. Радиоприемные устройства в системах радиосвязи: учебное пособие

для вузов. СПб: Издательство «Лань», 2022. 320 с. ISBN 978-5-507-44923-1.

15. Аветисян В.Г. Никогосян В.Г. Распространение радиоволн. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 209 с. ISBN 978-5-9729-1250-6.

References

1. Neganov V.A. *Ustroystva SVCh i antenny: Proyektirovaniye, konstruktivnaya realizatsiya, primery primeneniya ustroystv* [Microwave Devices and Antennas: Design, Constructive Implementation, Application Examples]. Moscow, URSS Publ., 2022. 608 p. ISBN 978-5-9710-6987-4. [in Russian].
2. Belousov O.A., Fedyunin P.A. *Antenny* [Antennas]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2022. 411 p. ISBN 978-5-507-51816-6. [in Russian].
3. Dement'yev A.N. *Metamaterialy v radioelektronike: ot issledovaniy k razrabotkam* [Metamaterials in Radioelectronics: From Research to Development]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2023. 249 p. ISBN 978-5-94836-674-6. [in Russian].
4. Finkel' M.I., Shcherbatenko M.L. *Tera-gertsovyye sverkhshirokopolosnyye gibridnyye anteny* [Terahertz Ultra-Wideband Hybrid Antennas]. Moscow, MPGU Publ., 2017. 73 p. ISBN 978-5-4263-0568-7. [in Russian].
5. Griбанov A.S. *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi* [Noise Immunity of Communication Systems]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2023. 365 p. ISBN 978-5-9729-1243-8. [in Russian].
6. Vozianova A.V. *Nanofotonika: uchebno-metodicheskoye posobiye dlya vuzov* [Nanophotonics: A Teaching Aid for Universities]. Saint-Petersburg, ITMO Publ., 2022. 92 p.
7. Shabunin S.N. *Antenny i ustroystva (SVCh): raschet i izmereniye kharakteristik: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Antennas and Devices (Microwave): Calculation and Measurement of Characteristics: A Textbook for Universities]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 139 p. ISBN 978-5-534-03401-1. [in Russian].
8. Kechiyev L.N. *Elektrofizicheskiye osnovy konstruirovaniya elektronnoy apparatury* [Electrophysical Foundations of Electronic Equipment Design]. Moscow, Grifon Publ., 2020. 482 p. ISBN 978-5-98862-530-8. [in Russian].
9. Apollonskiy S.M. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole: uchebnoye posobiye* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electromagnetic Field: A Textbook]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2012. 592 p. ISBN 978-5-8114-1155-9. [in Russian].
10. Filonov A.A. *Ustroystva SVCh i anteny* [Microwave Devices and Antennas]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyy universitet, 2024. 492 p. ISBN 978-5-16-012903-7. [in Russian].
11. Ivanov D.A. *Kompozitsionnyye materialy* [Composite Materials]. Moscow, Yurayt Publ., 2024. 253 p. ISBN 978-5-534-11618-2. [in Russian].
12. Astapenko V.A. *Elektromagnitnyye protsessy v srede, nanoplazmonika i metamaterialy* [Electromagnetic Processes in the Environment, Nanoplasmonics, and Metamaterials]. Moscow, Intellect Publ., 2012. 243 p. ISBN 978-5-91559-111-9. [in Russian].
13. Grigorov I.N. *Prakticheskiye konstruksii anten* [Practical Antenna Designs]. Moscow, DMK Press Publ., 2011. 353 p. ISBN 5-89818-061-3. [in Russian].
14. Zyryanov Yu.T. *Radiopriyemnyye ustroystva v sistemakh radiosvyazi: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Radio Receivers in Radio Communication Systems: a Teaching Aid for Universities]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2022. 320 p. ISBN 978-5-507-44923-1. [in Russian].
15. Avetisyan V.G. Nikogosyan V.G. *Rasprostraneniye radiovoln* [Radio Wave Propagation]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2023. 209 p. ISBN 978-5-9729-1250-6. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 01.10.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 14.10.2025.

The article was submitted 01.10.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 14.10.2025.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 3. С. 130–139. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2025. Vol. 21. No. 3. P. 130–139. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 004.655.2

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-130-139

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ



Полина Михайловна Дмитриева

Polina M. Dmitrieva

студент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Элина Ильнуровна Альмухаметова

Elina I. Almukhametova

ассистент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Рита Радиковна Переверзева

Rita R. Pereverzeva

ассистент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Актуальность

Научные конференции играют важную роль в академической жизни университетов, предоставляя площадку для обмена знаниями, обсуждения актуальных проблем и представления результатов исследований. В последние годы значение таких мероприятий возросло, и они стали неотъемлемой частью образовательного процесса. Рассмотрим несколько ключевых аспектов актуальности научных конференций в стенах университета.

Научные конференции создают уникальную возможность для студентов, аспирантов и преподавателей обмениваться знаниями и опытом. Участие в конференциях позволяет молодым ученым познакомиться с работами коллег, обсудить свои исследования и получить ценные рекомендации от более опытных специалистов. Это способствует не только профессиональному росту участников, но и формированию научного сообщества внутри университета.

Участие в научных конференциях помогает студентам развивать исследовательские навыки, такие как критическое мышление, анализ данных и умение формулировать выводы. Подготовка докладов и презентаций требует от участников глубокого понимания темы исследова-

Ключевые слова

программный модуль, редакционно-издательская деятельность, научные конференции, управление публикациями, рецензирование статей, интеграция с базами данных

ния, что способствует углублению знаний и улучшению навыков публичных выступлений.

Цель исследования

Сократить время обработки ключевых этапов подготовки и публикации научных материалов за счет разработки программного модуля для организации редакционно-издательской деятельности при проведении научных конференций.

Объекты исследования

Процесс редакционно-издательской деятельности при проведении научных конференций.

Методы исследования

Метод сбора данных.

Результаты

Разработан программный модуль для организации редакционно-издательской деятельности при проведении научных конференций. Выбраны средства разработки, благодаря которым были использованы современные технологии. Получился востребованный продукт, способствующий развитию научных конференций. Исследованы различные аналоги, которые позволяют понять текущие тенденции на рынке и выявить потребности пользователей.

В конечном итоге, разработанный программный модуль сочетает в себе удобство использования, функциональность и возможность адаптации под конкретные нужды организаторов конференций.

Для цитирования: Дмитриева П. М., Альмухаметова Э. И., Переверзева Р. Р. Разработка программного модуля для организации редакционно-издательской деятельности при проведении научных конференций // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 130-139. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-130-139>.

Original article

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE MODULE FOR ORGANIZING EDITORIAL AND PUBLISHING ACTIVITIES DURING SCIENTIFIC CONFERENCES

Relevance

Scientific conferences play a vital role in the academic life of universities, providing a platform for knowledge sharing, discussing current issues, and presenting research results. In recent years, the importance of such events has grown, and they have become an integral part of the educational process. Let's consider several key aspects of the relevance of scientific conferences at universities.

Scientific conferences create a unique opportunity for undergraduate, graduate, and faculty members to exchange knowledge and experience. Participation in conferences allows young scientists to become familiar with the work of their colleagues, discuss their research, and receive valuable advice from more experienced professionals. This not only contributes to the professional growth of participants but also to the formation of a scientific community within the university.

Participation in scientific conferences helps students develop research skills such as critical thinking, data analysis, and the ability to formulate conclusions. Preparing reports and presentations requires participants to have a deep understanding of the research topic, which contributes to a deeper understanding and improved public speaking skills.

Keywords

software module, editorial and publishing activities, scientific conferences, publication management, article review, integration with databases

Aim of research

Reduce the processing time for key stages of preparing and publishing scientific materials by developing a software module for organizing editorial and publishing activities during scientific conferences.

Research objects

Editing and publishing processes during scientific conferences.

Research methods

The method of data collection.

Results

A software module for the editorial and publishing activities of scientific conferences has been developed. The development tools have been selected, thanks to which modern technologies have been used. It turned out to be a sought-after product that promotes the development of scientific conferences. Various analogues have been studied, which allow us to understand current market trends and identify user needs. Ultimately, the developed software module combines ease of use, functionality and the ability to adapt to the specific needs of conference organizers.

For citation: Dmitrieva P. M., Almukhametova E. I., Pereverzeva R. R. Razrabotka programmnogo modulya dlya organizatsii redaktsionno-izdatel'skoy deyatel'nosti pri provedenii nauchnykh konferentsiy [Development of a Software Module for Organizing Editorial and Publishing Activities During Scientific Conferences]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 130-139 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-130-139>.

Введение

В современном мире научные конференции играют ключевую роль в распространении новых знаний, обмене опытом и установлении профессиональных связей между исследователями. Организация и проведение конференций, особенно в части редакционно-издательской деятельности, требует значительных усилий и ресурсов. Количество представляемых материалов, сложность рецензирования, необходимость форматирования и подготовки сборников тезисов и статей создают значительную нагрузку на организаторов [1].

Разработка специализированного программного модуля позволит автоматизировать рутинные операции, сократить временные затраты и повысить качество подготовки и публикации научных материалов. Модуль позволит существенно упростить процессы приема, рецензирования, редактирования и публикации материалов, повысить качество издаваемых сборников и сократить временные и

финансовые затраты на организацию конференции [2].

Организация научных конференций способствует вовлечению студентов в научную деятельность. Это может быть особенно важно для формирования интереса к науке у молодежи, а также для подготовки будущих исследователей. Награды от партнёров и сертификаты входят в портфолио студента при выпуске.

Актуальность выбранной темы доказана опросом, проведенным среди студентов и преподавателей университета, в качестве онлайн-анкеты при использовании Google Forms (рисунок 1).

Результаты опроса об актуальности проведения научных конференций в университете следующие (на основе опроса студентов и преподавателей) [3]:

— *повышение научного уровня студентов (40 %)*: Участники опроса отметили, что конференции помогают студентам быть в курсе последних научных



Рисунок 1. Результаты опроса об актуальности проведения научных конференций

Figure 1. Results of a survey on the relevance of holding scientific conferences

достижений, развивают критическое мышление и навыки анализа;

— *обмен опытом и налаживание контактов* (30 %): Конференции предоставляют платформу для обмена идеями между студентами, преподавателями и приглашенными экспертами, способствуя обмену знаниями внутри научного сообщества и установлению профессиональных связей;

— *развитие навыков презентации и публичных выступлений* (20 %): Конференции дают студентам возможность представить свои научные работы, научиться грамотно и уверенно выступать перед аудиторией, отвечать на вопросы и участвовать в дискуссиях;

— *повышение престижа университета* (10 %): Проведение научных конференций способствует повышению узнаваемости и репутации университета в научном сообществе, привлекая талантливых студентов и преподавателей.

Научные конференции в стенах университета играют ключевую роль в развитии науки и образования. Они способствуют обмену знаниями, развитию исследовательских навыков, генерации новых идей и укреплению профессиональных связей. В условиях современного мира, где наука и технологии стре-

мительно развиваются, актуальность таких мероприятий только возрастает. Поэтому университетам следует активно поддерживать организацию научных конференций, создавая тем самым благоприятную среду для научного роста и инноваций [4].

Разработка программного модуля

Разработка программного модуля для организации регистрационно-издательской деятельности научных конференций — это создание системы, которая позволяет организациям эффективно и безошибочно собирать данные участников конференции. Основные шаги, которые могут быть частью разработки программного модуля [5]:

— *анализ потребностей*: изучение необходимых требований к программному модулю;

— *проектирование архитектуры*: определение основных компонентов и функционала, которые будут включены в программный модуль, кроме того, взаимодействие пользователей с модулем;

— *разработка пользовательского интерфейса*: создание удобного и интуитивно понятного интерфейса для ввода данных, запуска тестирования и просмотра;

— *создание системы хранения данных*: реализация базы данных для хранения информации о студентах.

Разработка программного модуля для организации регистрационно-издательской деятельности при проведении научных конференций представляет собой сложный и ответственный процесс, требующий тщательного планирования [6].

Рассмотрим подробнее процесс разработки программного модуля сбора данных научно-технической документации. Стартовое окно регистрации с необходимыми полями (ФИО, место работы, должность, контактные данные, направление конференции, тема статьи и т.д.), возможность загрузки дополнительных документов.

Через аккаунт администратора можно реализовать редактирование информации о конференции; автоматизированные уведомления участников о статусах их работ, а также напоминания о сроках подачи и рецензирования; есть возможность указать максимальное и минимальное количество соавторов; возможность создания отчетов для организаторов конференции о количестве поданных работ, их статусах и рецензиях. Каждый компонент играет важную роль в обеспечении эффективного процесса подачи и рецензирования научных работ, что в конечном итоге способствует успешному проведению конференции.

После входа в систему в роли администратора можно изменить или добавить конференцию, пользователя и группу. Управление данными участников: централизованное хранение данных в структурированной базе данных, Поддержка ролей пользователей (администратор, участник) с различными правами доступа. Возможность входа в систему через администратора, где можно отклонить или принять статью. Также будет виден статус заявки (на рассмотрении, принята, отклонена). Если статью отклю-

нили, пользователь получает оповещение на почту о том, что нужно исправить ошибки в оформлении. Для того, чтобы изменить информацию о конференции, необходимо нажать на кнопку «Изменить». Далее откроется окно настройка конференции, где можно редактировать название и направления конференции.

Использование нотации BPMN (Business Process Model and Notation) приносит множество преимуществ для организаций, стремящихся оптимизировать свои бизнес-процессы. Основные плюсы применения этой нотации: BPMN предоставляет единый язык для описания процессов, который понятен как бизнес-аналитикам, так и техническим специалистам, что способствует улучшению коммуникации и снижению недопонимания между различными участниками процесса [7].

Графические диаграммы, созданные с помощью BPMN, делают процессы более понятными и легкими для восприятия. Наглядное представление позволяет быстро идентифицировать ключевые элементы и взаимодействия, что помогает в анализе и обсуждении.

Моделирование сложных процессов: нотация позволяет описывать как простые, так и сложные процессы, включая параллельные и последовательные действия, условия и исключения. Это делает BPMN универсальным инструментом для различных сценариев. Диаграмма бизнес-процесса представлена на рисунке 2.

Архитектура «клиент — сервер» для сбора данных научно-технической документации подразумевает распределенную систему, где клиенты запрашивают данные, а сервер обрабатывает запросы и предоставляет соответствующие ресурсы. Клиент-серверная архитектура — это модель взаимодействия в компьютерной сети, где задачи распре-

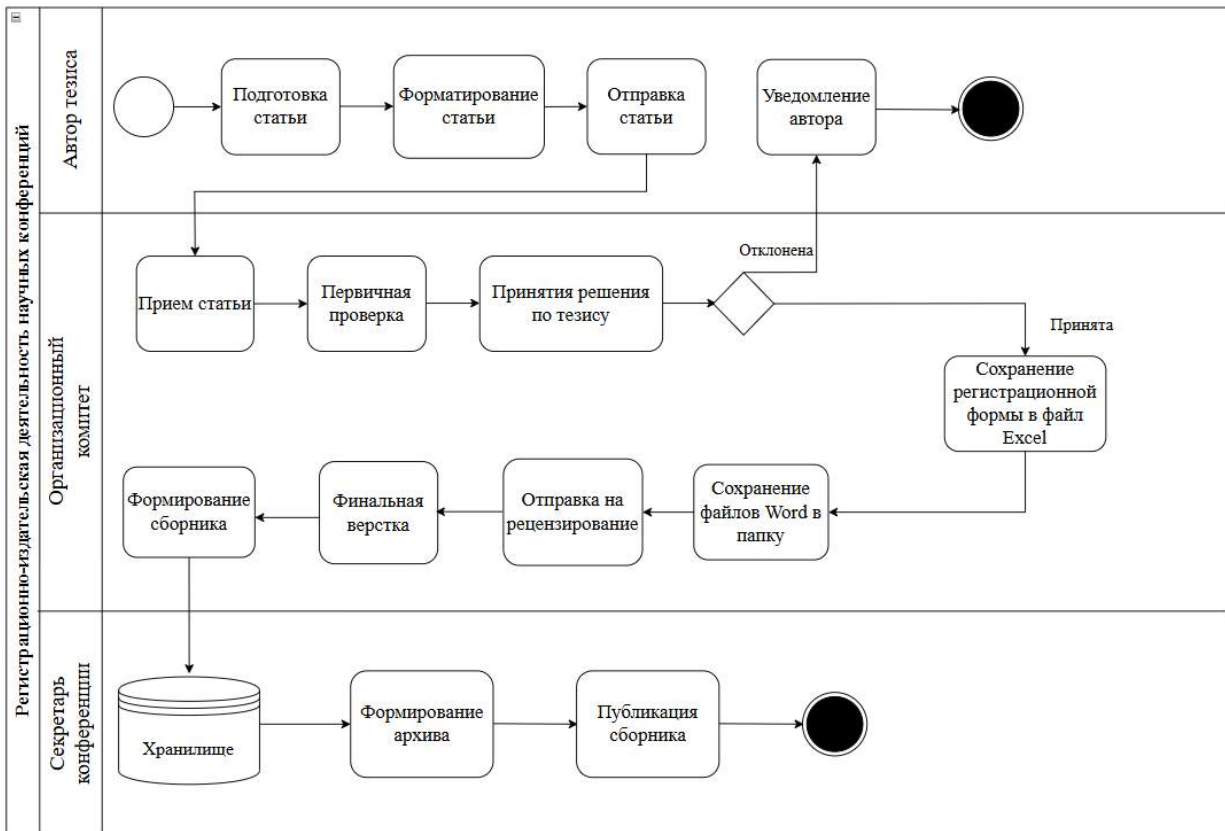


Рисунок 2. Диаграмма бизнес-процесса в нотации BPMN

Figure 2. Business process diagram in BPMN notation

лены между двумя основными компонентами: клиентами и серверами [8].

Клиент — это устройство на стороне пользователя, которое отправляет запрос на сервер о предоставлении информации или выполнении определённых действий. Сервер — это более мощный компьютер или оборудование, предназначенное для решения определённых задач по выполнению программного кода, сервисных функций по запросу клиентов, предоставления пользователям доступа к определённым ресурсам, хранения информации и баз данных.

Эта архитектура может масштабироваться и адаптироваться к различным требованиям, обеспечивая централизованное управление данными и доступ к ним (рисунок 3).

Данная архитектура программного модуля обеспечивает надёжную основу для проведения эффективного сбора дан-

ных научно-технической документации (рисунок 4).

Разработка и внедрение программного модуля сбора данных позволит организаторам конференций выйти на новый уровень эффективности и улучшить качество проводимых мероприятий.

Выбор языка программирования оправдан по нескольким причинам:

Система управления базами данных (СУБД) используется для обеспечения доступа к информации, хранящейся в базе данных. Системы управления базами данных помогают отсортировать информацию, а также связать базы данных между собой, предоставляя отчет об изменениях и зарегистрированных событиях [9].

Выбрана СУБД Microsoft SQLite для обеспечения беспрепятственной интеграции с средством разработки Visual Studio Code, поскольку известна своей надёж-

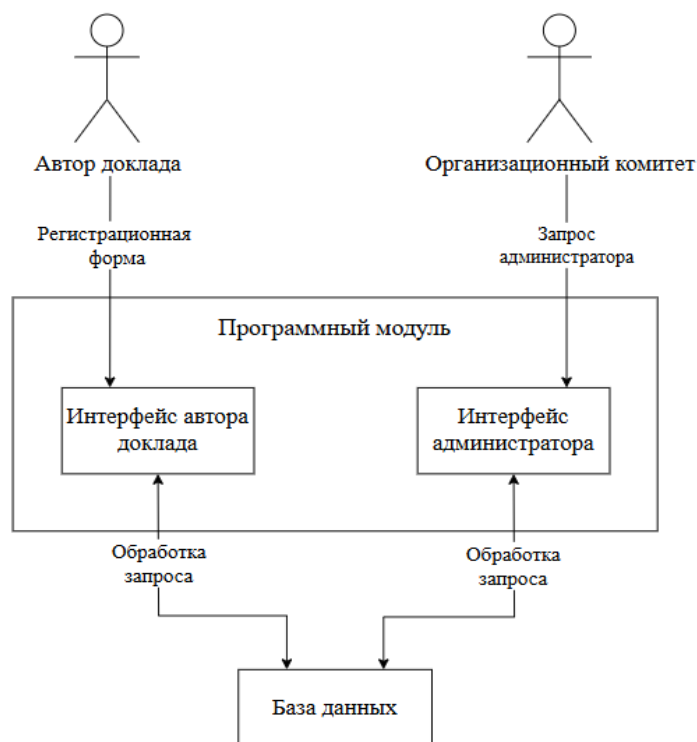


Рисунок 3. Алгоритм использования программного модуля

Figure 3. Algorithm for using the software module



Рисунок 4. Диаграмма последовательности процесса «Сбор данных научно-технической документации»

Figure 4. Sequence diagram of the process «Collection of scientific and technical documentation data»

ностью и способностью масштабироваться для поддержки баз данных.

VS Code поддерживает множество языков программирования, включая JavaScript, Python, Java, C#, PHP и многие другие. Благодаря этому разработчики могут использовать один и тот же инструмент для работы с различными проектами, что упрощает процесс разработки.

Visual Studio Code является бесплатным редактором с открытым исходным кодом. Это делает его доступным для всех разработчиков, независимо от их бюджета или уровня опыта.

Одним из самых популярных фреймворков для создания веб-приложений на языке Python является Django, высокоуровневый веб-фреймворк, который позволяет быстро разрабатывать безопасные и масштабируемые веб-приложения. Он был создан с акцентом на простоту использования, повторное

использование кода и быстрое развертывание [10].

Выводы

В условиях стремительного развития технологий и изменяющихся потребностей научного сообщества разработка программного модуля для организации регистрационно-издательской деятельности при проведении конференций актуальна и перспективна.

Разработан программный модуль, который сокращает время выполнения ключевых этапов подготовки и публикации научных материалов. Разрабатываемый программный модуль имеет такие функциональные возможности, как регистрационная форма для авторов статей, отправка статуса заявки (на рассмотрении, принята, отклонена), выгрузка в формате Word для публикации электронного сборника.

Список источников

1. ГОСТ 7.32-2017. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. М., 2017. 33 с.

2. Баширова Э.М., Ахметшина Э.И. Облачные технологии на предприятиях нефтегазовой отрасли // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2022. Передовые технологии и современные тенденции: матер. Междунар. науч.-методич. конф. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С. 301-303. EDN: TWTAIQ.

3. Головина Е.Ю., Ермолаев Е.В. Использование информационных систем для решения проблем документооборота на промышленных предприятиях // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазовой отрасли — 2020: Матер. Междунар. науч.-методич. конф., посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. С. 143-146. EDN: WQTZUH.

4. Головина Е.Ю., Титова К.А. Современное автоматизированное рабочее место на предприятии // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2024: матер. Междунар. научн.-методич. конф. / редкол.: Н.Г.

Евдокимова и др. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. С. 429-430.

5. Еременко А.Е., Минниханова Э.Э., Шарипова Г.В. Актуальные вопросы интеграции науки и образования в подготовке специалистов нефтегазовой отрасли // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2022. Передовые технологии и современные тенденции: матер. Междунар. науч.-методич. конф. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С. 135-137.

6. Левина Т.М., Гаврилов С.В., Исмагилова Д.А. Применение ЭВМ в автоматизированных технологических комплексах // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2022. Передовые технологии и современные тенденции: матер. Междунар. науч.-методич. конф. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С. 413-415. EDN: TYXYLK.

7. Цыганаш С.Е., Терещенко Д.А. Информационные технологии в образовании // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2022. Передовые технологии и современные тенденции: матер. Междунар. науч.-методич. конф. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С. 619-621. EDN: ULNSCG.

8. Бугаков П.Ю., Бугакова Т.Ю., Колесников А.А., Шарапов А.А. Разработка программной платформы для технической поддержки организации и проведения студенческой научной конференции // Интерэкспо Гео-Сибирь 2022. № 1, Т. 7. С. 175-184. EDN: TLLOHO.

9. Устюгова Ю.В., Мустафина О.В. Бухгалтерский учет и анализ затрат организации на заработную плату // Вестник науки. 2024. № 1 (70). Т. 2. С.268-272.

10. Чернова К.А. Обзор основных рисков при управлении проектом и предложения по снижению их влияния // Международный журнал гуманитарных и естественных наук International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2024. № 4-5. С. 91-96. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-4-5-218-220.

References

1. GOST 7.32-2017. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote. Struktura i pravila oformleniya* [State Standard 7.32-2017. The Research Report. Structure and Rules of Presentation]. Moscow, 2017. 33 p. [in Russian].

2. Bashirova E.M., Akhmetshina E.I. Oblachnyye tekhnologii na predpriyatiyakh neftegazovoy otrasli [Cloud Technologies in Oil and Gas Enterprises]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya — 2022. Peredovyye tekhnologii i sovremennyye tendentsii»* [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conf. «Integration of Science and Education in Universities of the Oil and Gas Profile — 2022. Advanced Technologies and Modern Trends»]. 2022, pp. 301-303. EDN: TWTAIQ. [in Russian].

3. Golovina E.Yu., Ermolayev Ye.V. Ispol'zovaniye informatsionnykh sistem dlya resheniya problem dokumentooborota na promyshlennyykh predpriyatiyakh [Using Information Systems to Solve Document Flow Problems at Industrial Enterprises]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovoy otrasli — 2020», posvyashchennaya 75-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne* [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference Dedicated to the 75th Anniversary of the VICTORY in the Great Patriotic War «Integration of Science and Education in Universities of the Oil and Gas Industry — 2020»]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2020, pp. 143-146. EDN: WQTZUH. [in Russian].

4. Golovina Ye.Yu., Titova K.A. Sovremennoye avtomatizirovannoye rabocheye mesto na predpriyatii [Modern Automated Workplace at the Enterprise]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya — 2024», redkol.: N.G. Evdokimova i dr.* [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference «Integration of Science and Education in Universities of the Oil and Gas Industry — 2024», editorial board: N.G. Evdokimova et al.]. Ufa, UNPTS «Izdatel'stvo UGNTU», 2024, pp. 429-430. [in Russian].

5. Eremenko A.Ye., Minnikhanova E.E., Sharipova G.V. *Actual issues of integration of science and education in training specialists in the oil and gas industry* *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya — 2022. Peredovyye tekhnologii i sovremennyye tendentsii»* [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conf. «Integration of Science and Education in Universities of the Oil and Gas Profile — 2022. Advanced Technologies and Modern Trends»]. 2022, pp. 135–137. [in Russian].

6. Levina T.M., Gavrilov S.V., Ismagilova D.A. Primeneniye EVM v avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksakh [Application of Computers in Automated Technological Complexes]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya — 2022. Peredovyye tekhnologii i sovremennyye tendentsii»* [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conf. «Integration of Science and Education in Universities of the Oil and Gas Profile — 2022. Advanced Technologies and Modern Trends»]. 2022, pp. 413-415. EDN: TYXYLK. [in Russian].

7. Tsyganash S.Ye., Tereshchenko D.A. Informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii [Information Technologies in Education]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya — 2022. Peredovyye tekhnologii i sovremennyye tendentsii»* [Proceedings of the International Scientific and Methodological Conf. «Integration of Science and Education in Universities of the Oil and Gas Profile — 2022. Advanced Technologies and Modern Trends»]. 2022, pp. 619-621. EDN: ULNSCG. [in Russian].

8. Bugakov P.Yu., Bugakova T.Yu., Kolesnikov A.A., Sharapov A.A. Razrabotka programmy platformy dlya tekhnicheskoy podderzhki organizatsii i provedeniya studencheskoy nauchnoy

konferentsii [Software Platform Development for Technical Support of the Organization and Holding of a Student Scientific Conference]. *Interekspo Geo-Sibir' — Inter Expo Geo-Siberia*, 2022, No. 1, Vol. 7, pp. 175-184. EDN: TLLOHO. [in Russian].

9. Ustyugova Yu.V., Mustafina O.V. Bukhgalterskiy uchet i analiz zatrat organizatsii na zarabotnuyu platu [Accounting and Analysis of Organization's Payroll Costs]. *Vestnik nauki — Science Bulletin*, 2024, No. 1 (70), Vol. 2, pp.268-272. [in Russian].

10. Chernova K.A. Obzor osnovnykh riskov pri upravlenii proyektom i predlozheniya po snizheniyu ikh vliyaniya [Overview of the Main Risks in Project Management and Suggestions for Reducing Their Impact]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i yestestvennykh nauk — International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2024, No. 4-5, pp. 91-96. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-4-5-218-220. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 21.04.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 21.04.2025; approved after reviewing 03.06.2025; accepted for publication 01.09.2025.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 3. С. 140–146. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2025. Vol. 21. No. 3. P. 140–146. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 004.005.8

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-140-146

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ: ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ



Камила Хабировна Шуматова

Kamila Kh. Shumatova

студент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Элина Ильнуровна Альмухаметова

Elina I. Almiukhametova

ассистент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Рита Радиковна Переверзева

Rita R. Pereverzeva

ассистент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Актуальность

Современные требования в сфере управления проектами диктуют необходимость создания эффективных механизмов для организации и координации ресурсов, временных рамок и задач. Управление проектами представляет собой важнейший элемент любой компании, стремящейся к успешной реализации поставленных целей и задач. Качественное управление проектами не только помогает оптимизировать использование ресурсов, но и значительно снижает риски, возникающие в процессе выполнения задач. Разработанный модуль нацелен на оптимизацию процессов, рост производительности и улучшение качества управления проектами. Кроме того, контроль за качеством становится более эффективным благодаря поэтапному подходу — промежуточные проверки и коррекции помогают избежать накопления ошибок и несоответствий в финальной версии проекта.

Цель исследования

Цель данного исследования заключается в повышении эффективности управления проектами через создание специализированного программного модуля.

Ключевые слова

управление проектами,
программный модуль,
выполнение задач,
ИТ-проект, среда
разработки, система,
оптимизация

Методы исследования

В процессе разработки применен ряд методов, включая аналитический обзор научных источников, анализ существующих аналогов и средств, используемых в области управления проектами.

Результаты

Основным результатом работы стали обоснование и последующая разработка программного модуля, который способствует оптимизации управления проектами путем контроля над выполнением задач в установленные сроки. Проведён также анализ существующих аналогов программного продукта и осуществлён выбор средств разработки, что привело к созданию нового программного модуля.

Для цитирования: Шуматова К. Х., Альмухаметова Э. И., Переверзева Р. Р. Управление проектами: пути оптимизации процессов выполнения задач // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 140-146. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-140-146>.

Original article

PROJECT MANAGEMENT: WAYS TO OPTIMIZING TASK EXECUTION PROCESSES

Relevance

Modern requirements in the field of project management dictate the need to create effective mechanisms for organizing and coordinating resources, time frames and tasks. Project management is a critical element of any company striving to successfully achieve its goals and objectives. High-quality project management not only helps to optimize the use of resources, but also significantly reduces the risks that arise in the process of completing tasks. The developed module is aimed at optimizing processes, increasing productivity and improving the quality of project management. In addition, quality control becomes more effective due to the step-by-step approach — intermediate checks and corrections help to avoid the accumulation of errors and inconsistencies in the final version of the project.

Aim of research

The main aim of this study is to improve the efficiency of project management through the creation of a specialized software module.

Research methods

A number of methods were used in the development process, including a review of scientific sources, analysis of existing analogs and tools used in the field of project management.

Results

The main result of the work was the justification and subsequent development of a software module that helps optimize project management by monitoring the completion of tasks within the established deadlines. An analysis of existing software product analogues was also conducted and development tools were selected, which led to the creation of a new software module.

Keywords

project management, software module, task execution, IT project, development environment, system, optimization

For citation: Shumatova K. Kh., Almukhametova E. I., Pereverzeva R. R. Upravleniye proyektami: puti optimizatsii protsessov vypolneniya zadach [Project Management: Ways to Optimizing Task Execution Processes]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 140-146 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-140-146>.

Введение

В последнее время отмечается существенный рост внимания к автоматизации рабочих процессов в сфере управления проектами. Это связано со стремлением оптимизировать взаимодействие в команде и повысить качество итогового результата. Важным элементом данной тенденции является создание программного обеспечения, которое обеспечивает выполнение задач проекта.

Основная цель управления проектами заключается в достижении запланированных результатов в установленные сроки при ограниченных ресурсах. Ключевые аспекты управления проектами включают в себя определение целей, разработку плана действий, распределение ресурсов и мониторинг прогресса [1, 2].

Применение методик проектного управления и правильно выбранной системы управления обеспечивает более эффективную и точную координацию проектов.

Согласно исследованию Pulse of the Profession, проведенному Институтом управления проектами (PMI), организа-

ции с работающей системой управления проектами показывают на 38 % больше успешных проектов, достигающих своих целей [3].

Использование систем управления бизнес-процессами позволяет устанавливать четкие временные рамки для каждой задачи, что, в свою очередь, определяет сроки запуска и завершения всего проекта. 61 % компаний, применяющих специализированное ПО для управления бизнес-процессами, завершают проекты в срок, в то время как без подобных инструментов такие результаты достигают лишь 38 % организаций [4].

Эффективное применение инструментов управления проектами может сократить время выполнения, однако это не всегда способствует успеху команды и организации в целом. Уменьшение сроков может негативно сказаться на распределении и использовании ресурсов. 66 % компаний, использующих системы управления проектами, придерживаются установленного бюджета, в то время как без специальных инструментов такие результаты достигаются только 45 % организаций (рисунок 1).

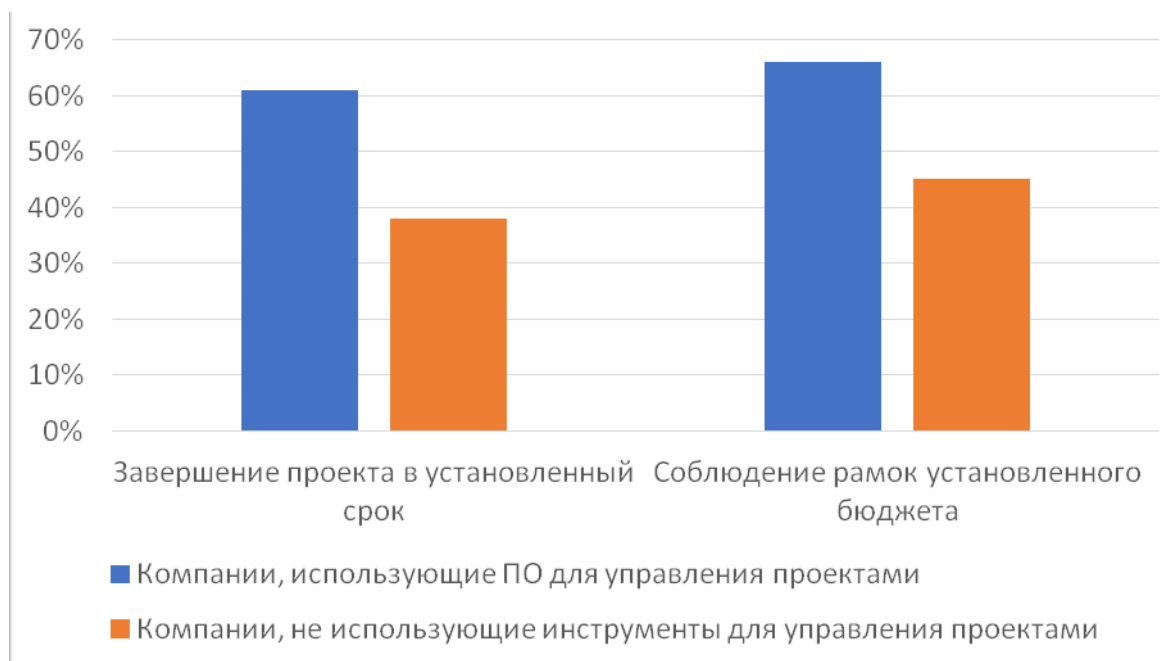


Рисунок 1. Статистика применения программного обеспечения за 2024 г.

Figure 1. Analysis of the software application 2024

Проекты могут варьироваться по сложности и масштабу, от небольших инициатив до крупных международных программ. Однако независимо от размера проекта эффективное управление им требует четкой структуры и системного подхода [5].

Уникальность разработки модуля в том, что он позволяет компаниям, использующим продукты 1С, эффективно организовывать процесс управления проектами и выполнять задачи в запланированные сроки. Разработка будет осуществляться с учетом специфики деятельности конкретной организации и её потребностей в управлении проектами [6].

Математическое моделирование

Для разработки программного модуля, который будет выполнять задачи в сфере управления проектами, необходимо четко сформулировать *математическую постановку задачи*.

1. Определим переменные

Проекты: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ — множество проектов.

Задачи: $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ — множество задач, связанных с проектами.

Ресурсы: $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ — множество ресурсов (людей, оборудования и т.д.).

Временные интервалы: $D = [d(\text{start}), d(\text{end})]$ — временные интервалы для выполнения задач.

Зависимости: $Z \subseteq T \times T$ — множество зависимостей между задачами (например задача t_i должна быть выполнена до задачи t_j).

2. Целевая функция

Целью может быть минимизация времени выполнения всех задач или максимизация использования ресурсов:

$$\text{minimize } C = \sum_{i=1}^m (t(\text{end})^i - t(\text{start})^i), \quad (1)$$

где $t(\text{start})^i$ и $t(\text{end})^i$ — время начала и окончания выполнения задачи t_i .

3. Ограничения

1) ограничения по времени:

каждая задача должна быть выполнена в пределах заданного временного интервала:

$$d(\text{start}) \leq t(\text{start})^i < t(\text{end})^i \leq d(\text{end}), \quad \forall i; \quad (2)$$

2) ограничения по ресурсам:

каждый ресурс может быть занят только одной задачей в одно время:

$$r_j(t(\text{start})^i) + r_j(t(\text{start})^k) \leq 1, \quad (3)$$

где $\forall j, \forall i, k: t_i$ и t_k пересекаются;

3) зависимости между задачами:

если задача t_i должна быть выполнена до задачи t_j :

$$t(\text{end})^i \leq t(\text{start})^j; \quad (4)$$

4) максимальная продолжительность проекта:

общая продолжительность проекта не должна превышать заданного значения:

$$C \leq T_{\max}. \quad (5)$$

Формулирование задач в виде математической модели позволяет четко установить цели и ограничения, что служит основой для разработки эффективного программного модуля в области управления проектами. Такой метод помогает автоматизировать процессы планирования и распределения ресурсов, а также повышает общую эффективность проектной деятельности [1].

Обоснование разработки программного модуля

Рассмотрим декомпозицию бизнес-процесса «Инициирование, планирование и реализация инвестиционной деятельности» в рамках ИТ-проектов в нотации IDEF0 (рисунок 2).

Стандарт 02.01-2024-ISO представляет собой внутренний организационно-нормативный документ, который регламентирует порядок инициирования, планирования, реализации, контроля и завершения проектов, связанных с внедрением новых и улучшением действующего.

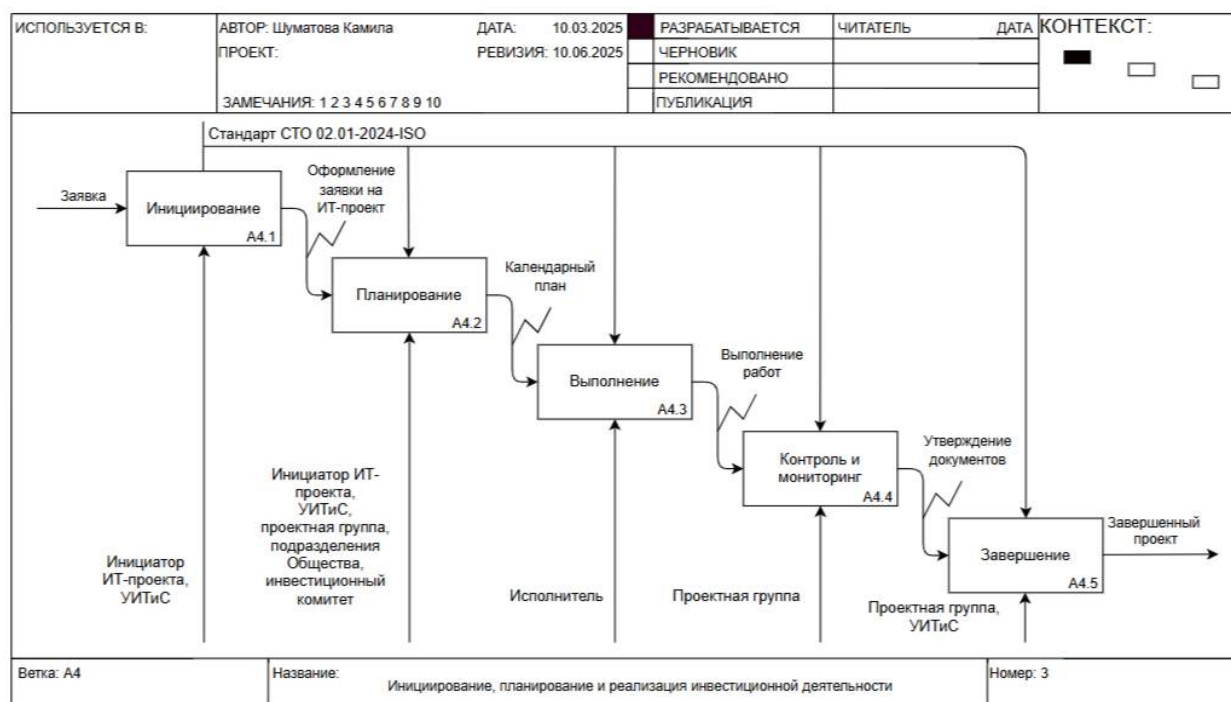


Рисунок 2. Бизнес-процесс «Инициирование, планирование и реализация инвестиционной деятельности»

Figure 2. Business process «Initiation, planning and implementation of investment activities»

ющих информационных систем (ИТ-проектов).

Входом бизнес-процесса является заявка, а выходом — завершенный проект. Участниками являются инициатор ИТ-проекта, УИТиС, проектная группа, подразделения Общества, инвестиционный комитет и исполнители.

Этапы планирования и реализации ИТ-проектов включают:

- инициирование ИТ-проекта: формирование идеи и её обоснование;
- планирование ИТ-проекта: разработка детального плана выполнения проекта;
- реализация ИТ-проекта: фактическое выполнение запланированных мероприятий;
- контроль над реализацией ИТ-проекта: мониторинг хода выполнения [7];
- завершение ИТ-проекта: закрытие и внедрение результата.

На рисунке 3 представлена архитектура разрабатываемого модуля.

Руководитель проекта получает заявку на проект и начинает взаимодействовать с программным модулем: формирует проект и назначает ответственного, который в свою очередь получает уведомление по электронной почте и выполняет задачи согласно стандарту и срокам.

При выборе инструмента разработки важно использовать специализированные решения, способствующие автоматизации процессов и контролю выполнения задач. Одним из таких решений является «1С:Предприятие», которое представляет собой универсальную отечественную платформу для автоматизации управления и учета в различных формах собственности. Широкое внедрение данной платформы в сфере управления проектами и возможность интеграции с уже существующими системами обеспечивают целостный подход к управлению проектами [3].

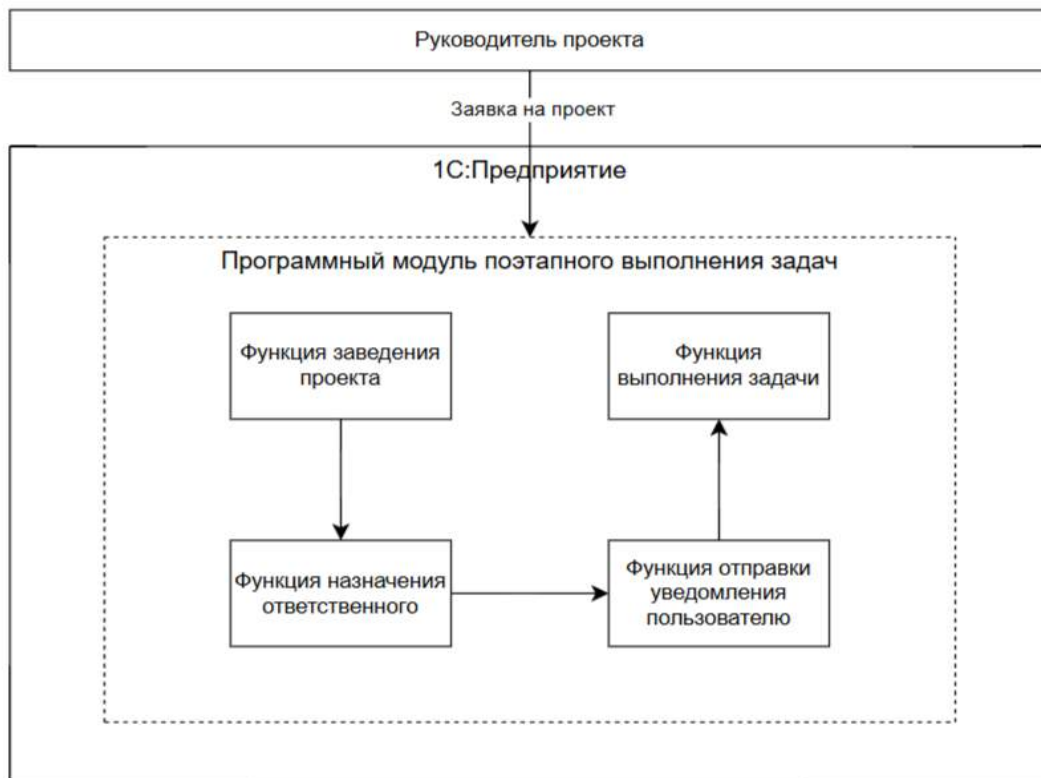


Рисунок 3. Архитектура программного модуля

Figure 3. Software module architecture

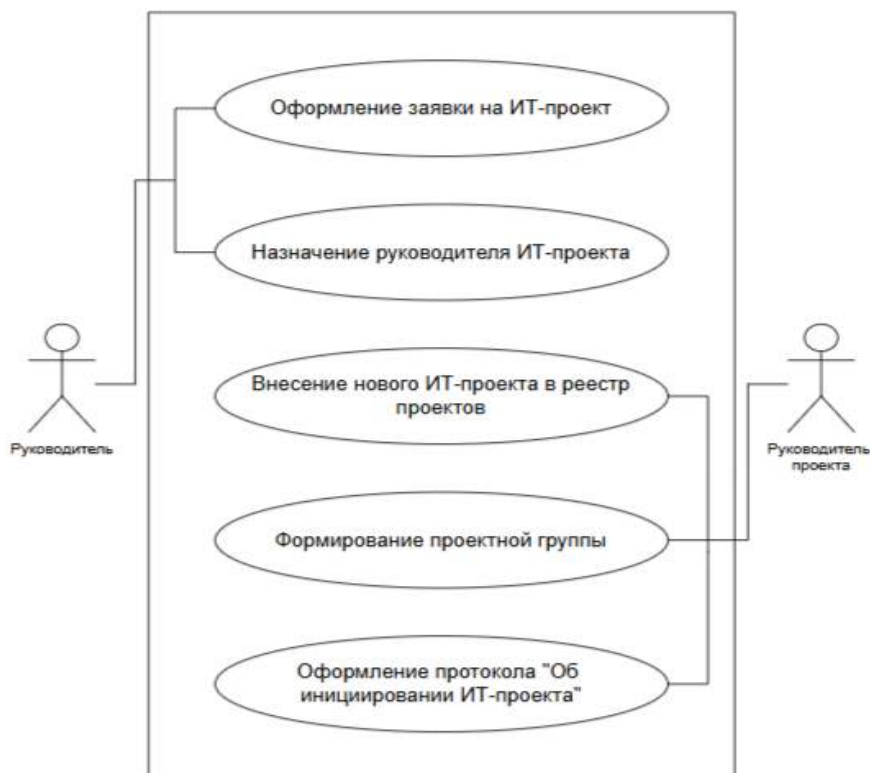


Рисунок 4. Диаграмма последовательности процесса «Реализация ИТ-проектов»

Figure 4. Sequence diagram of the process «Implementation of IT projects»

Выводы

Обоснована необходимость создания программного модуля, который способствует оптимизации процесса управления проектами путем отслеживания выполнения задач в установленные

сроки. Проведен анализ существующих аналогов программного продукта, осуществлен выбор средств разработки и выполнена разработка нового программного модуля.

Список источников

1. Дмитриева П.М., Шуматова К.Х. Разработка программного модуля сбора данных научно-технической документации // *Cifra. Информационные технологии и телекоммуникации*. 2025. № 2 (6). URL: <https://itech.cifra.science/archive/2-6-2025-april/10.60797/itech.2025.6.3> (дата обращения: 14.04.2025).
2. Грей К.Ф., Ларсон Э.У. Управление проектами: Практическое руководство: [пер. с англ.]. М.: Дело и Сервис, 2018. 688 с. ISBN 978-5-8018-0356-2.
3. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge [Electronic Resource]. 7th Ed. URL: <https://www.pmi.org/standards/pmbok> (дата обращения: 18.04.2025).
4. Аньшин В.М., Ильина О.Н. Управление проектами: фундаментальный курс. М.: ВШЭ, 2013. 620 с. ISBN 978-5-7598-0868-8. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/338068/reading> (дата обращения: 11.11.2025).
5. Управление проектами в цифрах и фактах [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.ganttpro.com/ru/upravlenie-proektami-statistika/amp/> (дата обращения: 28.04.2025).
6. Малышева О.С., Левина Т.М. Управление проектами. Уфа: УГНТУ, 2014. 68 с. ISBN 978-5-7831-1175-4.
7. Янбулатова О.В., Гордиенко С.А., Энис А.Э., Кирса Т.Г. Программное обеспечение для управления проектами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S11. С. 312-371. EDN: LACEUH.

References

1. Dmitriyeva P.M., Shumatova K.Kh. Razrabotka programmnogo modulya sbora dannykh

nauchno-tekhnicheskoy dokumentatsii [Development of a Software Module for Scientific and Technical Documentation Data Collection]. *Cifra. Informatsionnyye tekhnologii i telekommunikatsii* — *Cifra. Information Technology and Telecommunications*, 2025, No. 2 (6). URL: <https://itech.cifra.science/archive/2-6-2025-april/10.60797/itech.2025.6.3> (accessed 14.04.2025). [in Russian].

2. Grey K.F., Larson E.U. *Upravleniye proyektami: Prakticheskoye rukovodstvo: per. s angl.* [Project Management: A Practical Guide: Transl. from Engl.]. Moscow, Delo i Servis Publ., 2018. 688 p. ISBN 978-5-8018-0356-2.

3. Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* [Electronic Resource]. 7th Ed. URL: <https://www.pmi.org/standards/pmbok> (accessed 18.04.2025).

4. An'shin V.M., Il'ina O.N. *Upravleniye proyektami: fundamental'nyy kurs* [Project Management: A Fundamental Course]. Moscow, VSHE, 2013, 620 p. ISBN 978-5-7598-0868-8. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/338068/reading> (accessed 11.11.2025).

5. *Upravleniye proyektami v tsifrakh i faktakh* [Project Management in Figures and Facts] [Electronic Resource]. URL: <https://blog.ganttpro.com/ru/upravlenie-proektami-statistika/amp/> (accessed 28.04.2025).

6. Malysheva O.S., Levina T.M. *Upravleniye proyektami* [Project Management]. Ufa, USPTU, 2014. 68 p. ISBN 978-5-7831-1175-4.

7. Yanbulatova O.V., Gordienko S.A., Enis A.E., Kirsa T.G. *Programmnoye obespecheniye dlya upravleniya proyektami* [Software for Project Management]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* — *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2007, No. S11, pp. 312-371. EDN: LACEUH.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 05.05.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 01.09.2025.

Научная статья

УДК 681.121.89.082.4

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-3-147-157

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ГАЗА И ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО ТИПА



Артур Риматович Газизов

Artur R. Gazizov

магистрант кафедры электронной инженерии,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия



Николай Александрович Николаев

Nikolai A. Nikolaev

кандидат технических наук,
заместитель директора по новым разработкам и инновациям,
ООО «Линксол», Уфа, Россия



Руслан Азатович Кашапов

Ruslan A. Kashapov

магистрант кафедры вычислительной математики и кибернетики,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

Айдар Асхатович Мухамадиев



Aydar A. Mukhamadiev

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

Васих Хаматович Ясовеев



Vasikh Kh. Yasoveev

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

Актуальность

Актуальность исследования ультразвуковых расходомеров на основе времяпролетной технологии обусловлена рядом факторов. Во-первых, высокая точность измерения расхода жидкости и газа необходима для оптимизации технологических процессов в промышленности, энергетике и ЖКХ. Во-вторых, современные требования к энергоэффективности и экологической безопасности требуют точного учета потребления ресурсов. Времяпролетные расходомеры обладают преимуществами перед традиционными методами благодаря своей надежности, устойчивости к внешним воздействиям и отсутствию движущихся частей.

Однако существуют проблемы, связанные с влиянием акустических характеристик среды, геометрии трубопровода и условий эксплуатации на точность измерений. Поэтому разработка методов компенсации погрешностей и повышения точности является актуальной задачей. Это позволит создать надежные и точные приборы, соответствующие современным требованиям рынка и способствующие повышению эффективности производственных процессов.

Таким образом, исследование ультразвуковой времяпролетной технологии актуально для решения практических задач, стоящих перед промышленностью и наукой.

Цель исследования

Исследование применения времяпролетной технологии и разработка на ее основе конструкции ультразвукового расходомера с повышенной точностью и расширенным динамическим диапазоном.

Методы исследования

Рассмотрены вопросы применения нового аппаратного обеспечения для повышения качества результатов измерения ультразвуковым расходомером на основе времяпролетной технологии. Представлены элементы и архитектура устройства для измерения скорости потока и расхода газа, позволяющие улучшить технико-эксплуатационные характеристики. Показана возможность улучшить точностные характеристики и одновременно расширить динамический диапазон измерения.

Результаты

В статье представлены результаты разработки конструкции ультразвукового расходомера на основе времяпролетной технологии. Показано, что метод времени пролета (Time-of-Flight — ToF), обеспечивает высокую точность измерения скорости потока за счёт прямого определения временной разницы прохождения ультразвукового сигнала вдоль и против потока. Использование двух ультразвуковых преобразователей с различными резонансными частотами (70 и 120 кГц) позволило расширить динамический диапазон и повысить устойчивость измерений к фазовой неоднозначности.

Применение микросхемы AS6040 (производитель ScioSense), обеспечило точность измерений объёмного расхода газа и позволило компенсировать погрешности, связанные с переотражениями и шумами. Использование температурной коррекции, позволило исключить температурную зависимость скорости звука и повысить достоверность измерений до класса точности 1.0 и более.

Ключевые слова

ультразвук, измерение расхода газа, скорость потока газа, точность измерения, времяпролетная технология, Time-of-Flight (ToF)

Для цитирования: Газизов А. Р., Николаев Н. А., Кашапов Р. А., Мухамадиев А. А., Ясоев В. Х. Повышение точности и динамического диапазона измерения объёмного расхода газа и жидкости на основе ультразвуковых преобразователей времяпролетного типа // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 3. Т. 21. С. 147-157. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-147-157>.

Original article

IMPROVING THE ACCURACY AND DYNAMIC RANGE OF GAS AND LIQUID VOLUMETRIC FLOW RATE MEASUREMENTS USING TIME-OF-FLIGHT ULTRASONIC TRANSDUCERS

Relevance

The relevance of researching ultrasonic flowmeters using time-of-flight technology is driven by several factors. First, high-precision liquid and gas flow measurement is essential for optimizing industrial processes, including energy and housing and utilities. Second, modern energy efficiency and environmental safety requirements require accurate resource consumption metering. Time-of-flight flowmeters offer advantages over traditional methods due to their reliability, resistance to external influences, and the absence of moving parts. However, there are challenges associated with the influence of the acoustic characteristics of the medium, pipeline geometry, and operating conditions on measurement accuracy. Therefore, developing methods for compensating for errors and improving accuracy is a pressing issue. This will enable the creation of reliable and accurate devices that meet modern market demands and contribute to increased efficiency in production processes. Thus, research into ultrasonic time-of-flight technology is relevant for solving practical problems facing industry and science.

Aim of research

The main aim of the research is the application of time-of-flight technology and the development of an ultrasonic flow meter design based on it.

Research methods

The article discusses the application of new hardware to improve the quality of measurement results using an ultrasonic flowmeter based on time-of-flight technology. The components and architecture of a device for measuring gas flow velocity and flow rate, which can improve its performance, are presented.

Results

This article presents the results of developing an ultrasonic flowmeter design based on time-of-flight technology. It is demonstrated that the ToF method provides high flow velocity measurement accuracy by directly determining the time difference between the ultrasonic signal propagation along and against the flow. Using two ultrasonic transducers with different resonant frequencies (70 and 120 kHz) allowed for an expanded dynamic range and improved measurement robustness to phase ambiguity.

The use of the AS6040 microcircuit ensured accurate gas volumetric flow measurements and compensated for errors associated with multiple reflections and noise. Temperature correction eliminated the temperature dependence of the speed of sound and increased measurement reliability to accuracy class 1.0 or higher.

Keywords

ultrasound, gas flow measurement, gas flow rate, measurement accuracy, Time-of-Flight (ToF)

For citation: Gazizov A. R., Nikolaev N. A., Kashapov R. A., Mukhamadiev A. A., Yasoveev V. Kh. Povysheniye tochnosti i dinamicheskogo diapazona izmereniya ob'yemnogo raskhoda gaza i zhidkosti na osnove ul'trazvukovykh preobrazovateley vremyaproletnogo tipa [Improving the Accuracy and Dynamic Range of Gas and Liquid Volumetric Flow Rate Measurements Using Time-of-Flight Ultrasonic Transducers]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 3, Vol. 21, pp. 147-157 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-3-147-157>.

Введение

В последнее время технологии измерения скорости потока газа получили значительное развитие благодаря интеграции ультразвуковых методов. Ультразвуковые расходомеры позволяют измерять скорость газа за счет анализа времени прохождения звуковых сигналов через поток среды. Одним из ключевых направлений улучшения таких систем является использование время-пролетной технологии *Time-of-Flight* (*ToF*), которая позволяет точно фиксировать время прохождения сигнала, обеспечивая более высокую точность измерений. Данная статья посвящена анализу возможности интеграции *ToF* в системы ультразвуковых измерений скорости потока газа и рассмотрению преимуществ, которые эта технология может принести в нефтегазовую отрасль [1–7].

Организация преобразований ультразвуковых измерений

Ультразвуковые методы измерения [5–9] скорости потока основываются на свойствах распространения звуковых волн в жидкости или газе. Суть метода заключается в том, чтобы определить время, за которое ультразвуковой сигнал проходит расстояние между двумя датчиками, установленными с разных сторон потока. Такой подход известен как метод времени пролета (*ToF*), при котором точность измерений определяется скоростью звука в среде, а также зависит от скорости самого потока [10–12].

В системе измерения обычно используются два ультразвуковых преобразователя [3], которые функционируют как передатчик и приемник. Сигналы передаются по направлению движения потока (вниз или *downstream*) и в противоположном направлении (вверх или *upstream*). Время, которое требуется сигналу для прохождения через поток в направлении по потоку, меньше, чем

время, требуемое для прохождения против потока. Это связано с тем, что движение потока ускоряет или замедляет распространение звуковой волны. Разница во времени прохождения сигналов по потоку и против потока позволяет вычислить скорость среды.

Для получения более точных данных используется формула, которая учитывает длину пути сигнала L , скорость звука c и скорость потока v :

$$\Delta t = \frac{L}{c+v} - \frac{L}{c-v}, \quad (1)$$

где Δt — разница во времени прохождения сигналов.

Измеряя Δt , можно определить скорость потока v через известные параметры системы и условия среды.

Одним из ключевых факторов, влияющих на точность измерений, является скорость звука в среде, которая изменяется в зависимости от температуры, давления и состава газа. Чтобы компенсировать влияние этих параметров, ультразвуковые системы часто оснащаются дополнительными датчиками, например температурными. Эти датчики позволяют корректировать результаты измерений, минимизируя ошибку измерения в конкретной среде.

Для повышения точности в сложных системах применяется многолучевая конфигурация [13], при которой несколько пар ультразвуковых преобразователей размещаются вдоль трубопровода. Такой подход помогает учитывать возможные турбулентности потока и получать более детализированные данные, обеспечивая надежность и стабильность измерений даже в нестационарных (турбулентных) условиях. Например, хордовые измерения позволяют детализировано «сканировать» скорость потока по профилю канала перемещения жидкости или газа [13].

Таким образом, измерение скорости потока с помощью ультразвуковых мето-

дов основано на простом и надежном принципе — измерении времени пролета. Этот подход обеспечивает высокую точность и стабильность результатов даже при изменении внешних условий. Использование современных технологий цифровой обработки сигналов и механизмов компенсации факторов, таких как температура и давление, позволяет улучшить класс точности измерительных ультразвуковых систем до значений 1.0 и более. Эти преимущества делают ультразвуковые методы одним из эффективных и востребованных решений для задач в промышленности.

Времяпролетная технология (Time-of-Flight)

Времяпролетная технология, или технология *Time-of-Flight*, основывается на измерении времени [13], которое требуется сигналу для прохождения расстояния от источника до приемника. Сигнал может быть световым, ультразвуковым или радиоволновым. Время, за которое сигнал проходит это расстояние, используется для вычисления расстояния или скорости объекта, с которым он взаимодействует.

Технология *ToF* заключается в излучении сигнала (в нашем случае ультразвукового) от передатчика, который проходит через измеряемую среду (например газовый поток) и достигает приемника. Время, за которое сигнал прошел от источника до приемника, фиксируется. На основе этого времени вычисляется скорость сигнала, которая напрямую зависит от параметров среды (температуры, давления, движения среды и других факторов) [10]. Скорость сигнала может изменяться в зависимости от характеристик среды, применение *ToF* позволяет отслеживать изменения в параметрах потока, таких как его скорость и турбулентность [11].

ToF предоставляет несколько ключевых преимуществ, которые делают ее особенно эффективной для использования в сложных измерительных системах, таких как ультразвуковые расходомеры:

- *высокая точность измерений.* Время фиксируется с высокой точностью (до наносекунд, а разрешение составляет 22 пикосекунды), она может обеспечить более точные расчеты скорости газа или расстояния, что особенно важно в динамичных и нестабильных средах;

- *бесконтактное измерение.* Отсутствие подвижных частей снижает износ оборудования. Это в свою очередь продлевает срок службы измерительных систем;

- *широкий диапазон измерений.* Может применяться как для низких, так и для высоких скоростей потока. Подходит для работы с жидкостями, газами и даже многокомпонентными средами;

- *устойчивость к внешним факторам.* Система может корректировать показания с учетом изменений температуры и давления. Позволяет использовать *ToF*-датчики в сложных промышленных условиях [12, 14–17].

У данной технологии есть несколько важных факторов, которые следует учитывать:

- *частота излучаемого сигнала.* Для измерений в газе чаще всего используют ультразвуковые сигналы с частотой в пределах 20 кГц–2 МГц. Высокочастотные сигналы могут обеспечивать более высокую точность, но на них также сильнее влияют условия среды (например, температура и влажность);

- *задержка сигнала.* Для точных измерений важна минимизация возможных задержек в системе. *ToF* системы обычно оборудованы высокоскоростными процессорами для обработки данных в реальном времени;

- *калибровка.* Для точных измерений необходимо учитывать изменения условий среды (например, температуры или давления), так как скорость распространения сигнала зависит от этих параметров.

Реализация технологии ультразвукового расходомера на принципах ToF

Микросхема *AS6040*, разработанная компанией *ScioSense*, представляет собой полностью интегрированное решение для ультразвуковых измерений расхода газа и жидкостей методом *ToF*.

Основные характеристики:

- *полный ультразвуковой преобразователь:* включает драйвер пьезодатчиков, усилитель с программируемым усилением (PGA), аналоговый компаратор и TDC для измерения времени пролёта;
- *интегрированный 32-битный процессор и ОЗУ/ПЗУ (4 K ROM + 4 K NVRAM):* выполняет цифровую обработку, калибровку и расчёт расхода, выделяя центральный микроконтроллер STM32 лишь для задач управления и интерфейса;
- *полная интеграция:* все узлы, включая драйвер, усилитель, TDC и CPU, находятся на одном кристалле, что

позволяет сократить шум и упростить систему;

- *высокая точность ToF:* цифровой TDC обеспечивает разрешение до 22 пикосекунд, что обеспечивает измерительную точность на уровне десятых долей процента;

- *независимость от центрального контроллера:* AS6040 управляет измерительными циклами по встроенному планировщику, снижая нагрузку на STM32 и позволяя ей заниматься управлением и интерфейсами.

В данной работе микросхема AS6040 используется вместе с микроконтроллером STM32 для реализации ультразвукового расходомера газа по технологии ToF, схема устройства представлена на рисунке 1.

AS6040 функционирует в одном из режимов:

- *Flow Meter Mode* — полностью автономное измерение и расчёт;
- *Time Conversion Mode* — передача в STM32 необработанных значений *ToF* — временных меток.

В данной работе микросхема AS6040 функционирует в режиме *Time Conversion Mode* (метод передачи абсолютных временных меток перехода через ноль информационного сигнала), при котором встроенный CPU AS6040 отклю-

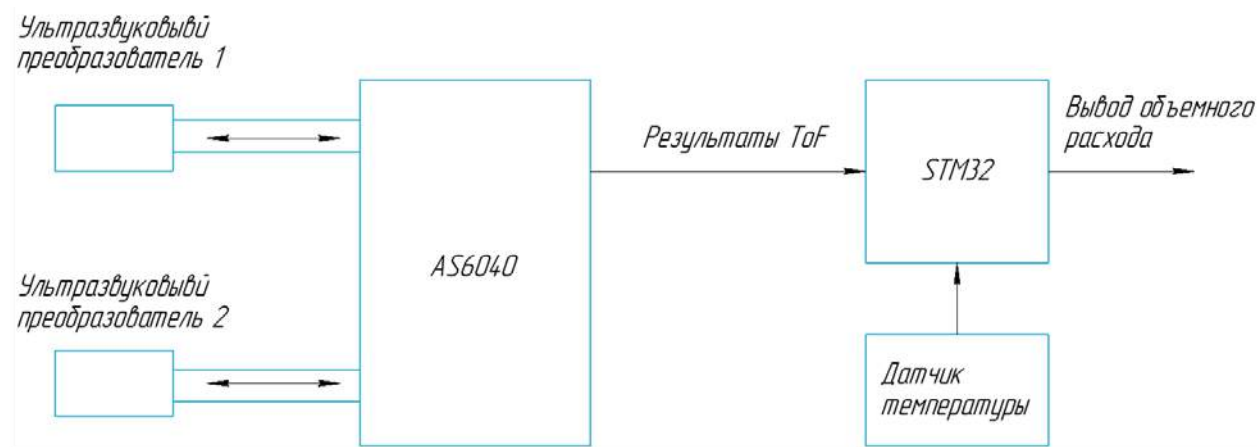


Рисунок 1. Схема реализации измерительной системы с использованием микросхемы AS6040

Figure 1. Implementation diagram of the measuring system using the AS6040 microcircuit

чён, и микросхема передаёт значения времени пролёта по интерфейсу *SPI* на внешнее устройство — в нашем случае микроконтроллер *STM32*. Это позволяет объединить высокоточные временные измерения, реализуемые *AS6040*, с возможностями *STM32* по управлению, температурной коррекции и интерфейсом.

Для повышения точности измерений скорость звука рассчитывается при фактической температуре. Данные снимаются с датчика температуры и обрабатываются *STM32*. Полученные значения используются для пересчёта *ToF* и вычисления скорости газа.

Скорость ультразвука в газе зависит от характеристик среды и температуры и может быть рассчитана по формуле:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot \frac{T}{M}}, \quad (2)$$

где c — скорость звука в газе в м/с;

γ — показатель адиабаты (например, для воздуха ≈ 1.4);

R — удельная газовая постоянная;

T — температура, К;

M — молярная масса газа.

Алгоритм *First-hit* и *Split Burst*:

– реализован *First-Hit Level Detection* (первый переход через ноль после определенного уровня информационного сигнала) — алгоритм, который настраивает порог срабатывания приёма сигнала; после обнаружения первого фронта он переводит компаратор в режим детектирования нулевых пересечений;

– *Split-Burst* (расщепление пары импульсов по фазе) — метод возбуждения с разделением фронта для предотвращения ложных срабатываний и повышения надёжности обнаружения первого принятого сигнала.

Исключается влияние шумов и отражений, что критично при измерении в загрязнённых средах. В одном отра-

женном сигнале *AS6040* может фиксировать до 31 нулевого пересечения, что позволяет улавливать слабые сигналы и учитывать вторичные отражения. Результаты формируются в регистры *FDB_US_TOF_SUM_OF_ALL_U/D*, а *Split-Burst* режим обеспечивает доступ к фазовым переходам для сложных случаев и переходов входного сигнала. Повышается устойчивость к многопутевому распространению и нестационарным условиям потока. Цифровой преобразователь *Time-to-Digital Converter (TDC)* обеспечивает разрешение 22 пикосекунды. Шум нарастающего фронта составляет менее 300 пикосекунд при использовании качественных пьезоэлементов. Микросхема позволяет измерять амплитуду сигнала и длительность первого фронта, что позволяет динамически корректировать уровень порога срабатывания. Обеспечивается возможность автонастройки при изменяющихся условиях среды, включая загрязнения или изменение температуры.

Реализуется следующий алгоритм.

– Программируемая пороговая величина (*First-Hit Level, FHL*). После запуска посылающего импульса *AS6040* устанавливает порог *FHL* (до 200 мВ) — это уровень, превышение которого фиксируется как возможный первый сигнал. После обнаружения фронта порог сбрасывается на 0 мВ.

– *Release Window (Окно задержки)*. Чтобы избежать ложных срабатываний от шумов при переключении фронта «излучение/приём», включается окно задержки, перекрывающее период переключения.

– *Zero-Cross Detection (количество переходов, до 31 нулевого перехода)*. После обнаружения первого фронта происходит переход в режим *Zero-Cross*

Detection, где фиксируются до 31 нулевого пересечения сигнала в одном приёмном импульсе. Эти данные записываются в регистры *TOF_ALL_UP/DOWN* и позволяют оценить фазу сигнала.

– *Split-Burst* и фаза. Для повышения надёжности используется режим *Split-Burst* — импульс разбивается на два фрагмента с фазовым сдвигом, что упрощает выделение нужного фронта и предотвращает пропуск из-за фазовой неоднозначности.

Алгоритм *First-Hit Detection* и *Zero-Cross Analysis* в AS6040 позволяет точно и надёжно определять момент прихода ультразвукового сигнала. Это критически важно для ToF-измерений, особенно в условиях загрязнённой среды или при отражениях. Используемый порог, *Release Window*, *Split-Burst* и детектирование последовательных нулевых переходов обеспечивают надёжное, устойчивое и точное определение времени пролёта [9].

Структурная схема разработанного ультразвукового расходомера

Рассмотрим структурную схему разработанного ультразвукового расходомера, представленную на рисунке 2.

Передающий сигнал усиливается до напряжения ± 40 В и подается на пьезопреобразователи. Сигнал, прошедший после среды, преобразуется в преобразователе и усиливается усилителем заряда. Сигнал поступает на вход микросхемы, где считается время до каждого перехода через «нуль».

Пример передающего и приемного сигналов представлен на рисунке 3. Информация о временных интервалах по интерфейсу SPI передается в вычислительное устройство на основе 32 разрядного микропроцессора ARM STM32F407 фирмы STM. Вычислительное устройство, оперируя информацией о времени пролёта, производит вычисления скорости потока и объемного расхода газа.

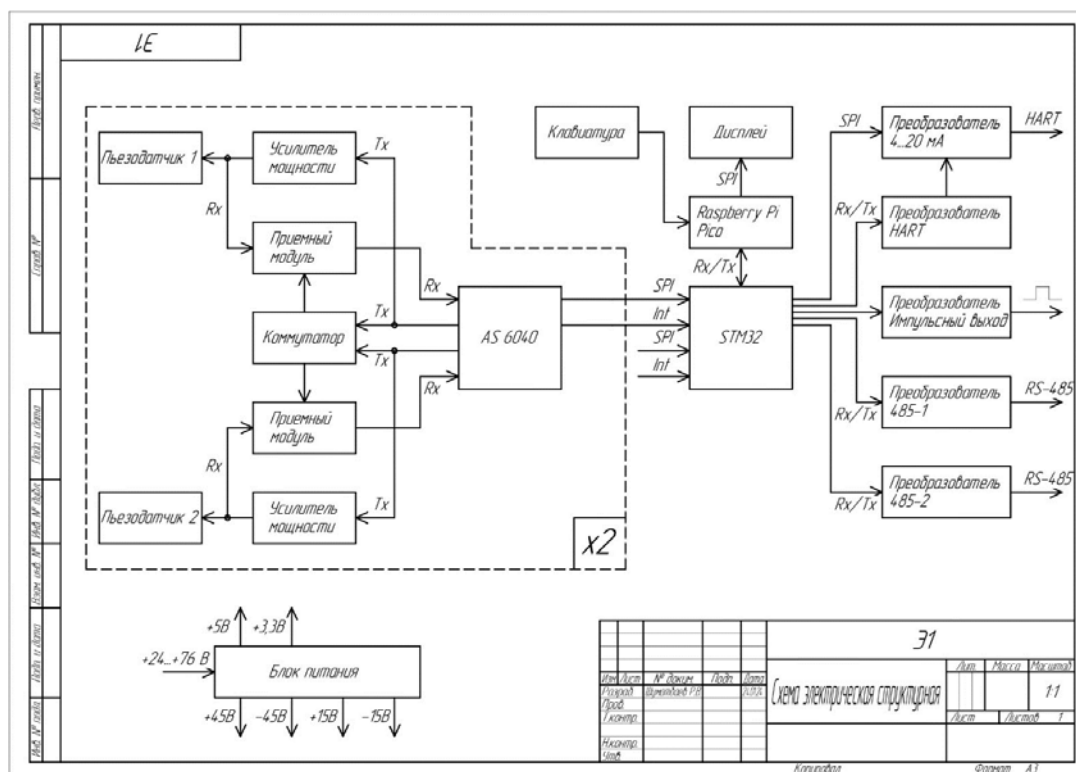


Рисунок 2. Структурная схема ультразвукового расходомера

Figure 2. Structural diagram of an ultrasonic flow meter



Рисунок 3. Пример передающего и приемного сигнала ультразвукового расходомера

Figure 3. An example of the transmitting and receiving signal of an ultrasonic flow meter

Выводы

В данной работе рассмотрен подход к реализации ультразвукового расходомера, основанного на методе измерения времени пролёта с применением специализированной микросхемы *AS6040*.

Показано, что метод *ToF* обеспечивает высокую точность измерения скорости потока за счёт прямого определения временной разницы прохождения ультразвукового сигнала вдоль и против потока.

Использование двух ультразвуковых преобразователей с различными резонансными частотами (70 и 120 кГц) позволило расширить динамический диапазон и повысить устойчивость измерений к фазовой неоднозначности.

Список источников

1. Уразаев А.Е., Ясовеев В.Х. Ультразвуковой способ измерения расхода многофазной смеси с детектированием режима течения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 1. С. 46-51.

Применение микросхемы *AS6040*, работающей в режиме *Time-Conversion*, обеспечило разрешение измерений до 22 пикосекунды, что критично для точных расчётов объёмного расхода газа. Функции обработки фазы, алгоритм *First-Hit Detection* и поддержка *Split-Burst* режимов позволяют компенсировать погрешности, связанные с переотражениями и шумами.

Проведённые теоретические и инженерные обоснования подтверждают эффективность выбранного метода и архитектуры системы. Разработанная схема может быть адаптирована под различные условия эксплуатации и модифицирована для задач промышленного учёта в нефтегазовой отрасли.

2. Деревягин Г.А. Ультразвуковой метод и устройство контроля расхода природного газа в системе управления газовыми потоками: дисс. ... канд. техн. наук. Саратов, 2010. 101 с.

3. Дробков В.П. Разработка и исследование ультразвуковых методов и информационно-измерительной системы измерения расхода

нефтеводогазового потока: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 259 с.

4. Использование ультразвуковой технологии для измерения скорости потока // URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=534315> (дата обращения: 19.12.2024).

5. Ясовеев В.Х., Уразаев А.Е. Метод и особенности технической реализации информационно-измерительной системы определения расхода, фазового состава и структуры течения многофазной смеси // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. № 1 (46). С. 172-180. EDN: PWZZFR.

6. Ильиных С.П. Методы и алгоритмы высокоразрешающих оптико-электронных систем с пошаговым фазовым сдвигом: дисс. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2021. 320 с.

7. MSP430 DataSheet. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/225/DOC000225972.pdf> (дата обращения: 20.10.2025).

8. Использование ультразвуковой технологии для измерения скорости потока. URL: <https://www.sciosense.com/as6040-ultrasonic-flow-converter/> (дата обращения: 19.12.2024).

9. AS6040 DataSheet. URL: <https://www.sciosense.com/as6040-ultrasonic-flow-converter/> (дата обращения: 20.10.2025).

10. Yu M.-G., Kim D.-S. Low-Complexity Ultrasonic Flowmeter Signal Processor Using Peak Detector-Based Envelope Detection // J. Sens. Actuator Netw. 2025. Vol. 14, No. 1. P. 12. DOI: 10.3390/jsan14010012.

11. Gao Y., Chen M., Wu Z., Yao L., Tong Z., Zhang S., Gu Y.A., Lou L. A Miniaturized Transit-Time Ultrasonic Flowmeter Based on ScAlN Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers for Small-Diameter Applications // Microsyst. Nanoeng. 2023. Vol. 9, Art. No. 49. DOI: 10.1038/s41378-023-00434-z.

12. Fang Z., Su R., Hu L., Fu X. A Simple and Easy-Implemented Time-of-Flight Determination Method for Liquid Ultrasonic Flow Meters Based on Ultrasonic Signal Onset Detection and Multiple-Zero-Crossing Technique // Measurement. 2021. Vol. 168. P. 108398. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.

13. Рычагов М.Н. Ультразвуковые измерения потоков в многоплоскостных измерительных модулях // Акустический журнал. 1998. Т. 44, № 6. С. 829-836.

14. Jiang Y., Bao Y., Ren S., Dong F., Tan C. A Time-of-Flight Estimation Method Based on Central Frequency Matching for Ultrasonic Flowmeters // Proceedings of the 2023 IEEE

International Instrumentation Conference. USA: IEEE, 2023.

15. Li L., Hu Y., Dong J., Wu Q., Hu T., Zhu F. A Novel Differential Time-of-Flight Algorithm for High-Precision Ultrasonic Gas Flow Measurement // Journal of Instrumentation. May, 2022. Vol. 17. P. 05019. DOI: 10.1088/1748-0221/17/05/P05019.

16. Ren R., Wang H., Sun X., Quan H. Design and Implementation of an Ultrasonic Flowmeter Based on the Cross-Correlation Method // Sensors (Basel). 2022. Vol. 22, Issue 19. P. 7470. DOI: 10.3390/s22197470.

17. Sunol F., Ochoa D. A., García J. E. High-Precision Time-of-Flight Determination Algorithm for Ultrasonic Flow Measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. DOI: 10.1109/TIM.2018.2869263.

References

1. Urazaev A.E., Yasoveev V.Kh. Ul'trazvukovoy sposob izmereniya raskhoda mnogofaznoy smesi s detektirovaniyem rezhima techeniya [Ultrasonic Method for Measuring the Flow Rate of a Multiphase Mixture with Flow Regime Detection]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika — Instruments and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics*, 2012, No. 1, pp. 46-51. [in Russian].

2. Derevyagin G.A. *Ul'trazvukovoy metod i ustroystvo kontrolya raskhoda prirodnogo gaza v sisteme upravleniya gazovymi potokami: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Ultrasonic Method and Device for Monitoring Natural Gas Flow Rate in a Gas Flow Management System: Cand. Sci. Engin. Diss.]. Saratov, 2010, 101 p. [in Russian].

3. Drobkov V.P. *Razrabotka i issledovaniye ul'trazvukovykh metodov i informatsionno-izmeritel'noy sistemy izmereniya raskhoda neftevodogazovogo potoka: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Development and Research of Ultrasonic Methods and an Information-Measuring System for Measuring Oil-Water-Gas Flow Rate: Dr. Sci. Engin. Diss.]. Moscow, 2007. 259 p. [in Russian].

4. *Ispol'zovaniye ul'trazvukovoy tekhnologii dlya izmereniya skorosti potoka* [Using Ultrasonic Technology to Measure Flow Velocity]. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=534315> (accessed 19.12.2024). [in Russian].

5. Yasoveev V.Kh., Urazayev A.E. Metod i osobennosti tekhnicheskoy realizatsii informatsionno-izmeritel'noy sistemy opredeleniya raskhoda, fazovogo sostava i struktury techeniya mnogofaznoy smesi [Method and Technical Performance Features of the Flow Metering, Phase Containment and Multiphase Mixture Flow Structure Determination Information-Measuring

System]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta — Vestnik UGATU*, 2012, No. 1 (46), pp. 172-180. EDN: PWZZFR. [in Russian].

6. Il'nykh S.P. *Metody i algoritmy vysokorazreshayushchikh optiko-elektronnykh sistem s poshagovym fazovym sdvigom: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Methods and Algorithms of High-Resolution Optoelectronic Systems with Step-by-Step Phase Shift: Dr. Sci. Engin. Diss.]. Novosibirsk, 2021, 320 p. [in Russian].

7. *MSP430 DataSheet*. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/225/DOC000225972.pdf> (accessed 20.10.2025).

8. *Ispol'zovaniye ul'trazvukovoy tekhnologii dlya izmereniya skorosti potoka* [Using Ultrasonic Technology to Measure Flow Velocity]. URL: <https://www.sciosense.com/as6040-ultrasonic-flow-converter/> (accessed 19.12.2024). [in Russian].

9. *AS6040 DataSheet*. URL: <https://www.sciosense.com/as6040-ultrasonic-flow-converter/> (accessed 20.10.2025).

10. Yu M.-G., Kim D.-S. Low-Complexity Ultrasonic Flowmeter Signal Processor Using Peak Detector-Based Envelope Detection. *J. Sens. Actuator Netw.*, 2025, Vol. 14, No. 1, pp. 12. DOI: 10.3390/jsan14010012.

11. Gao Y., Chen M., Wu Z., Yao L., Tong Z., Zhang S., Gu Y.A., Lou L. A Miniaturized Transit-Time Ultrasonic Flowmeter Based on ScAlN Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers for Small-Diameter Applications. *Microsyst. Nanoeng.*, 2023, Vol. 9, Art. No. 49. DOI: 10.1038/s41378-023-00434-z.

12. Fang Z., Su R., Hu L., Fu X. A Simple and Easy-Implemented Time-of-Flight Determination Method for Liquid Ultrasonic Flow Meters Based on Ultrasonic Signal Onset Detection and Multiple-Zero-Crossing Technique. *Measurement*, 2021, Vol. 168, pp. 108398. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.

13. Rychagov M.N. Ul'trazvukovyye izmereniya potokov v mnogoploskostnykh izmeritel'nykh modulyakh [Ultrasonic Flow Measurements in Multiplane Measuring Modules]. *Akusticheskiy zhurnal — Acoustic Journal*, 1998, Vol. 44, No. 6, pp. 829-836. [in Russian].

14. Jiang Y., Bao Y., Ren S., Dong F., Tan C. A Time-of-Flight Estimation Method Based on Central Frequency Matching for Ultrasonic Flowmeters. *Proceedings of the 2023 IEEE International Instrumentation Conference*. USA, IEEE, 2023.

15. Li L., Hu Y., Dong J., Wu Q., Hu T., Zhu F. A Novel Differential Time-of-Flight Algorithm for High-Precision Ultrasonic Gas Flow Measurement. *Journal of Instrumentation*, May, 2022, Vol. 17, pp. 05019. DOI: 10.1088/1748-0221/17/05/P05019.

16. Ren R., Wang H., Sun X., Quan H. Design and Implementation of an Ultrasonic Flowmeter Based on the Cross-Correlation Method. *Sensors (Basel)*, 2022, Vol. 22, Issue 19, pp. 7470. DOI: 10.3390/s22197470.

17. Sunol F., Ochoa D. A., García J. E. High-Precision Time-of-Flight Determination Algorithm for Ultrasonic Flow Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018. DOI: 10.1109/TIM.2018.2869263.

Статья поступила в редакцию 01.10.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 17.10.2025.

The article was submitted 01.10.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 17.10.2025.

ОБ АВТОРАХ

Альмухаметова Элина Ильнуровна

ассистент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Астраханцев Сергей Викторович

старший преподаватель кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Афлятунов Радмир Рифович

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

Баширов Мусса Гумерович

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

Вавилов Вячеслав Евгеньевич

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

Виноградов Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Виноградова Ирина Леонидовна

доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Воронин Сергей Григорьевич

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Передовой инженерной школы «Моторы будущего», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Газизов Артур Риматович

магистрант кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Головина Евгения Юрьевна

старший преподаватель кафедры Информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Дмитриева Полина Михайловна

студент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Закирничная Марина Михайловна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации, телекоммуникации и метрологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Зарипов Дамир Мунзирович

кандидат физико-математических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Исмагилов Флюр Рашитович

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

Кашапов Руслан Азатович

магистрант кафедры вычислительной математики и кибернетики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Клиначев Николай Васильевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Кулёва Надежда Юрьевна

кандидат технических наук, заместитель заведующего региональной молодежной лаборатории электромеханических, электронных и электрохимических систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Махиянов Артур Валерьевич

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

Мухамадиев Айдар Асхатович

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

Недосеко Игорь Вадимович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Николаев Николай Александрович

кандидат технических наук, заместитель директора по новым разработкам и инновациям, ООО «Линксол», Уфа, Россия

Переверзева Рита Радиковна

ассистент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Петушков Михаил Юрьевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Пудовкин Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Саттаров Байрас Робертович

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

Саттаров Роберт Радикович

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

Соколова Виктория Владимировна

кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Уразбахтин Руслан Рустемович

аспирант кафедры электромеханики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Хабибуллин Тимур Радикович

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

Хисматуллин Азат Салаватович

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

Хлюпин Павел Александрович

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

Шабуров Павел Олегович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты» и кафедры «Электронные вычислительные машины», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Шамсутдинова Азалия Викторовна

студент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Федькевич Даниил Владимирович

магистрант кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Шуматова Камила Хабировна

студент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Эпов Данила Алексеевич

аспирант, доцент кафедры электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Юнусов Вильдан Радикович

студент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Ясовеев Васих Хаматович

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

ABOUT THE AUTHORS

Aflyatunov Radmir R.

Assistant of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Almukhametova Elina I.

Assistant of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Astrakhantsev Sergey V.

Senior Lecturer of Applied and Natural Sciences Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Bashirov Mussa G.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Dmitrieva Polina M.

Student of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Epov Danila A.

Postgraduate Student, Assistant Professor of Electronics and Microelectronics Department, Magnitogorsk State Technical University Named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Fedkevich Daniil V.

Undergraduate Student of Automation, Telecommunications, and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Gazizov Artur R.

Undergraduate Student of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Golovina Evgenia Yu.

Senior Lecturer of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University Branch in Salavat), Salavat, Russia

Ismagilov Flur R.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Kashapov Ruslan A.

Undergraduate Student of Computational Mathematics and Cybernetics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Khabibullin Timur R.

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khismatullin Azat S.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Klinachev Nikolay V.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Aircraft Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Khlyupin Pavel A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kuleva Nadezhda Yu.

Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of the Regional Youth Laboratory of Electromechanical, Electronic and Electrochemical Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Makhiyanov Arthur V.

Assistant of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Mukhamadiev Aydar A.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Nedoseko Igor V.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Building Structures Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Nikolaev Nikolai A.

Candidate of Engineering Sciences, Deputy Director for New Developments and Innovations, Linksol LLC, Ufa, Russia

Pereverzeva Rita R.

Assistant of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Petushkov Mikhail Yu.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Pudovkin Aleksandr N.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Building Structures Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Sattarov Bayras R.

Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Ufa, Salavat, Russia

Sattarov Robert R.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Shaburov Pavel O.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Aircraft Department and Electronic Computers Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Shamsutdinova Azalia V.

Student of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Shumatova Kamila Kh.

Student of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Sokolova Victoria V.

Candidate of Philological Sciences, Assistant Professor of Foreign Languages Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Urazbakhtin Ruslan R.

Postgraduate Student of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Vavilov Vyacheslav E.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electromechanic Departments, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Vinogradov Dmitry A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Applied and Natural Sciences Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Vinogradova Irina L.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Voronin Sergey G.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Researcher of Advanced Engineering School «Motors of the Future», Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Yasoveev Vasikh Kh.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Yunusov Vildan R.

Student of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zakirnichnaya Marina M.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automation, Telecommunications, and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zaripov Damir M.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Acting Head of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Список опечаток в № 2, т. 21, 2025

List of errata in No. 2, vol. 21, 2025

Исправление автора

Страница	Напечатано	Следует читать
21	Надежда Юрьевна Кулёва Nadezhda Yu. Kuleva старший преподаватель кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия	Надежда Юрьевна Кулёва Nadezhda Yu. Kuleva кандидат технических наук, заместитель заведующего региональной молодежной лаборатории электромеханических, электронных и электрохимических систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
153	Кулёва Надежда Юрьевна старший преподаватель кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия	Кулёва Надежда Юрьевна кандидат технических наук, заместитель заведующего региональ- ной молодежной лаборатории элек- tromеханических, электронных и электрохимических систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
157	Kuleva Nadezhda Yu. Senior Lecturer of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia	Kuleva Nadezhda Yu. Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of the Regional Youth Laboratory of Electromechanical, Electronic and Electrochemical Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Страница 23 добавить

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Челябинской области за счет гранта в форме субсидии № 184/3 от 25.12.2024 на создание региональной молодежной лаборатории.

Страница 24 добавить

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Chelyabinsk Region through a grant in the form of subsidy No. 184/3 dated December 25, 2024 for the creation of a regional youth laboratory.

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 interested 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.