

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 1, т. 21, 2025

Electrical and data processing facilities and systems

№ 1, 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

№ 1, 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: 28.03.2025 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 18.14.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 26.

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. 1, 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 28.03.2025. Paper format 60×84/8.
Offset printing. 18.14 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 26.

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

Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г., Терезулов Т. Р.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ
ЗАЖИГАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ
МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ 9

Саттаров Р. Р., Махиянов А. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДВУХ ПЯТИФАЗНЫХ
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ
НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СКОРОСТИ ВЕТРА 16

Калитка В. С., Васильков Н. Д.

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН 26

Попов Е. И.

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ПЕРЕВОДА НЕФТЯНЫХ
СКВАЖИН В ПРЕРЫВИСТЫЕ РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ 41

Хузияхметов Б. А., Соловьев Б. А., Иванов М. Д., Хазиева Р. Т.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
МАЛОЙ МОЩНОСТИ 51

Кантюков Н. Р., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СХЕМ
ДЛЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА 61

Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Гвилава Л. Р., Загидуллин Б. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯ ПЕЛЬТЬЕ 77

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Баскаков В. В.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА НА ВЕРТОЛЁТЕ 85

Зайцева А. А., Култаев Д. Р.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНФУЗОРА В СИСТЕМЕ
ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ВЕРТОЛЁТА 93

Краснов А. Н., Аль-Кадаси О. Х.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ВЫНОСА ЖИДКОСТИ ИЗ ГАЗОСБОРНОЙ СЕТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПАДЕНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ	101
--	-----

Коловертнов Г. Ю., Аль-Кадаси О. Х.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ВЫНОС ЖИДКОСТНЫХ СКОПЛЕНИЙ ИЗ ГАЗОСБОРНОЙ СЕТИ	115
--	-----

Кабиров Д. М., Денисова О. А.

ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ СОБЕСЕДОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	130
---	-----

Левина Т. М., Альмухаметова Э. И., Кобзева П. С., Трошина М. В., Гафаров А. В.

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ РЕЗЮМЕ СОИСКАТЕЛЕЙ	141
---	-----

Об авторах	149
-------------------	-----

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

Gizatullin F. A., Gabidullina Z. G., Teregulov T. R.

EVALUATION OF PARAMETERS OF DESIGNED CAPACITIVE OSCILLATING
DISCHARGE IGNITION SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT
THE PECULIARITIES OF THE MECHANISM OF ELECTROSPARK FLAME
STABILIZATION 9

Sattarov R. R., Makhiyanov A. V.

MODELING A WIND TURBINE BASED ON TWO FIVE-PHASE
MAGNETOELECTRIC GENERATORS WITH VOLTAGE STABILIZATION
AT CHANGING WIND SPEED 16

Kalitka V. S., Vasilkov N. D.

ON THE ISSUE OF USING HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS
TO CREATE ADVANCED ELECTRIC MACHINES 26

Popov E. I.

ABOUT AN IMPROVING ESP ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS
IN CONDITIONS OF OIL WELL CONVERSION TO PERIODIC OPERATING
MODES 41

Khuziakhmetov B. A., Solovev B. A., Ivanov M. D., Khazieva R. T.

SIMULATION OF AN AUTONOMOUS LOW-CAPACITY WIND ELECTRIC
PLANT 51

Kantyukov N. R., Kirillov R. V., Khazieva R. T.

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF CONVERSION CIRCUITS
FOR ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS 61

Solovev B. A., Gamisonia G. K., Gvilava L. R., Zagidullin B. I.

STUDY OF ELECTRICITY PRODUCTION USING PELTIER MODULE 77

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Baskakov V. V.

ALGORITHM DEVELOPMENT FOR CHECKING THE OPERABILITY
OF A HELICOPTER RADAR SYSTEM 85

Zaitseva A. A., Kultaev D. R.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE OPTIMAL
GEOMETRIC PARAMETERS OF A CONFUSER IN THE COOLING SYSTEM
OF A HELICOPTER POWER PLANT 93

Krasnov A. N., Al-Qadasi O. Kh.

ENSURING THE OPTIMAL MODE OF LIQUID REMOVAL
FROM THE GAS GATHERING NETWORK OF FIELDS
UNDER CONDITIONS OF FORMATION PRESSURE DROP 101

Kolovertnov G. Yu., Al-Qadasi O. Kh.

EVALUATION OF THE GAS FLOW VELOCITY, PROVIDING REMOVAL
OF LIQUID ACCUMULATIONS FROM THE GAS GATHERING NETWORK 115

Denisova O. A., Kabirov D. M.

A PLATFORM FOR AUTOMATING INTERVIEWS USING ARTIFICIAL
INTELLIGENCE 130

Levina T. M., Almukhametova E. I., Kobzeva P. S., Troshina M. V., Gafarov A. V.

SOFTWARE MODULE FOR PROCESSING JOB APPLICANTS' RESUMES 141

About the Authors 149

Научная статья

УДК 621.45.044

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-9-15

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ

**Фарит Абдулганеевич Гизатуллин****Farit A. Gizatullin**

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

**Зульфия Газинуровна Габидуллина****Zulfiya G. Gabidullina**

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

**Тагир Рафаэлевич Терезулов****Tagir R. Teregulov**

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

Актуальность

Проектирование емкостных систем зажигания газотурбинных двигателей (ГТД) проводится, как правило, без учета особенностей процессов воспламенения топливовоздушных смесей и особенностей возможных механизмов стабилизации пламени в пусковых воспламенителях и камерах сгорания. При этом проектирование связано с большим объемом испытаний и доводочных работ в условиях конкретных двигателей. Современные достижения в области исследования процессов искрового воспламенения горючих смесей позволяют сократить затраты времени и средств на проектирование систем зажигания. Исследования в статье направлены на решение данной актуальной задачи.

Цель

Расчетное определение величины емкости накопительного конденсатора в емкостной системе зажигания на основе совместного рассмотрения разрядных процессов и особенностей электроискровой стабилизации пламени в устройствах горения.

Ключевые слова

емкостная система
зажигания
колебательного разряда,
электроискровая
стабилизация пламени,
емкость накопительного
конденсатора

Методы исследования

Исследования проведены на основе методов математического анализа применительно к развитию нового подхода к проектированию разрядных цепей с полупроводниковыми свечами, заключающегося в использовании критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания с учетом механизма электроискровой стабилизации пламени в пусковых воспламенителях и камерах сгорания ГТД.

Результаты

Показана взаимосвязь параметров емкостных систем зажигания с характеристиками смеси в процессе воспламенения и электроискровой стабилизации пламени; получено расчетное выражение для определения необходимой величины емкости накопительного конденсатора емкостной системы зажигания по заданным параметрам разрядной цепи и топливовоздушной смеси в устройствах горения.

Для цитирования: Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г., Терегулов Т. Р. Оценка параметров проектируемых емкостных систем зажигания колебательного разряда с учетом особенностей механизма электроискровой стабилизации пламени // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 9-15. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-9-15>.

Original article

EVALUATION OF PARAMETERS OF DESIGNED CAPACITIVE OSCILLATING DISCHARGE IGNITION SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE PECULIARITIES OF THE MECHANISM OF ELECTROSPARK FLAME STABILIZATION

Relevance

As a rule, the design of capacitive ignition systems for gas turbine engines (GTE) is carried out without taking into account the peculiarities of ignition processes of fuel-air mixtures and peculiarities of possible mechanisms of flame stabilization in starting igniters and combustion chambers. In this case, the design is associated with a large amount of testing and finalization work in the conditions of specific engines. Modern achievements in the field of research of spark ignition processes of combustible mixtures allow to reduce the time and money spent on the design of ignition systems. The research in this article is aimed at solving this urgent problem.

Aim of research

Calculated determination of the storage capacitor capacitance value in the capacitive ignition system based on the joint consideration of discharge processes and peculiarities of electrospark flame stabilization in combustion devices.

Research methods

The research was carried out on the basis of mathematical analysis methods in relation to the development of a new approach to the design of discharge circuits with semiconductor candles, which consists in the use of the criterion of the ignition capacity of capacitive ignition systems taking into account the mechanism of electrospark flame stabilization in starting igniters and combustion chambers of GTE.

Results

The relationship between the parameters of capacitive ignition systems and the characteristics of the mixture in the process of ignition and

Keywords

capacitive oscillating discharge ignition system, electrospark flame stabilization, storage capacitor capacity

electrospark flame stabilization is shown; a calculation expression for determining the necessary value of the capacitance of the storage capacitor of the capacitive ignition system according to the given parameters of the discharge circuit and the fuel-air mixture in combustion devices is obtained.

For citation: Gizatullin F. A., Gabidullina Z. G., Teregulov T. R. Otsenka parametrov proyektiruyemykh yemkostnykh sistem zzhiganiya kolebatel'nogo razryada s uchetom osobennostey mekhanizma elektroiskrovoy stabilizatsii plameni [Evaluation of Parameters of Designed Capacitive Oscillating Discharge Ignition Systems Taking into Account the Peculiarities of the Mechanism of Electrospark Flame Stabilization]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 9–15 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-9-15>.

Введение

При запуске газотурбинных двигателей (ГТД) последовательность процессов в камерах сгорания является следующей: образование искровых разрядов в свечах зажигания; воспламенение топливовоздушной смеси; стабилизация пламени [1]. Аэродинамическая стабилизация пламени основана на едином принципе, состоящем в образовании зон обратных потоков воспламенившейся смеси для поджигания свежей смеси после выключения зажигания. В камерах сгорания ГТД при высотных запусках возможен другой принцип стабилизации — электроискровой, происходящий при постоянно включенном зажигании [2, 3]. Данный принцип стабилизации пламени реализуется, как правило, в пусковых воспламенителях ГТД и при смещении границы циркуляционной зоны к оси камеры сгорания с подъемом на высоту [2].

Очевидно, что аэродинамическая стабилизация пламени напрямую не зависит от эффективности системы зажигания, а определяется организацией газодинамических процессов в камерах сгорания. Электроискровая стабилизация пламени в отличие от аэродинамической зависит от параметров искровых разрядов в свечах.

На основании изложенного подходы к проектированию систем зажигания должны зависеть от принципа стабилизации пламени. При аэродинамической

стабилизации газодинамика камер сгорания при проектировании систем зажигания в прямом виде не учитывается. Область использования расчетных методов проектирования при этом распространяется практически только на электрические цепи систем зажигания с учетом опытных данных при определении параметров зарядно-разрядных цепей. Газодинамические процессы в камерах сгорания и пусковых воспламенителях могут учитываться при проектировании систем зажигания с использованием условия электроискровой стабилизации пламени, связывающего параметры искровых разрядов со скоростью потока смеси, скоростью распространения пламени и конструктивным параметром устройства горения. В такой постановке задачи проектирования емкостных систем зажигания рассмотрены в [4] применительно к апериодическому типу разрядов.

Постановка задачи и решение

В статье решается задача оценки параметров емкостных систем зажигания колебательного разряда с учетом особенностей процесса электроискровой стабилизации пламени в пусковых воспламенителях ГТД и камерах сгорания при высотных запусках двигателей, когда на свечу зажигания воздействуют прямые потоки смеси вне циркуляционной зоны.

Для обоснования существа предлагаемого подхода к расчету параметров

систем зажигания проанализируем условие электроискровой стабилизации пламени.

Механизм электроискровой стабилизации пламени в упрощенном виде представляется следующим образом. Ядро пламени, образующееся в результате воздействия искрового разряда на смесь, движется со скоростью потока смеси, увеличиваясь в объеме со скоростью горения. При этом непрерывное горение смеси возможно, если в пределах камеры успевает происходить слияние отдельных ядер пламени, создаваемых следующими друг за другом разрядными импульсами в свече. Взаимосвязь длительности искровых разрядов и частоты следования разрядов с характеристиками смеси в камере, через которую протекает поток смеси, выражается известной формулой, представляющей условие электроискровой стабилизации пламени [5]:

$$t_{\text{и}} \geq \frac{\left[\frac{1}{2f} \left(\frac{S^2}{V} - V \right) - l \right] V}{S(V_t - V)}, \quad (1)$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность искровой стадии разряда в полупроводниковой свече;

f — частота следования разрядных импульсов;

S — скорость потока смеси;

V — скорость распространения пламени;

V_t — скорость пламени во время действия искрового разряда;

l — длина камеры.

Примем следующие допущения:

1. поток смеси является ламинарным однородным, при стабилизации пламени зона обратных потоков не образуется;

2. скорость потока смеси и скорость распространения пламени постоянные во времени и по сечению камеры;

3. физико-химические свойства смеси, определяющие скорость распространения пламени, не учитываются.

Наиболее неопределённой величиной в (1) является скорость распространения пламени во время действия источника зажигания V_t , которая должна определяться, в том числе, параметрами искрового разряда. Как показано в работах [3, 6], начальная скорость процесса воспламенения однозначно определяется значением критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания, представляющего собой функцию следующих параметров: энергии искровых разрядов $W_{\text{св}}$, амплитуды разрядного тока $I_{\text{м}}$, длительности разрядов $t_{\text{и}}$, начальной энергии накопительного конденсатора W_0 , причём скорость развития процесса воспламенения обратно пропорциональна величине критерия воспламеняющей способности. На основании результатов исследований, изложенных в работах [3, 6], можно записать:

$$V_t - V = \frac{A}{K}, \quad (2)$$

где A — коэффициент, учитывающий физико-химические свойства смеси;

K — критерий воспламеняющей способности емкостных систем зажигания, равен

$$K = \frac{W_{\text{св}}}{I_{\text{м}} t_{\text{и}} W_0}. \quad (3)$$

Запись формулы (3) для критерия воспламеняющей способности отличается от формулы в [6]. В (3) не входит частота следования разрядов f , так как она учтена в условии электроискровой стабилизации пламени (1).

С учётом (2) преобразуем (1) к виду

$$\frac{K}{t_{\text{и}}} = \frac{AS_{\text{max}}}{\left[\frac{1}{2f} \left(\frac{S_{\text{max}}^2}{V} - V \right) - l \right] V}, \quad (4)$$

где S_{max} — максимально допустимая скорость потока смеси, при которой ещё возможна электроискровая стабилизация пламени.

Таким образом, отношение $K/t_{\text{и}}$, входящее в (4) и характеризующее систему

зажигания, может быть рассчитано по следующим заданным величинам: параметрам смеси $S_{\max}$, V , конструктивному параметру l и частоте разрядов в свече f .

С другой стороны, отношение $K/t_{\text{и}}$ на основании (3) запишется в виде

$$\frac{K}{t_{\text{и}}} = \frac{W_{\text{св}}}{I_{\text{м}} t_{\text{и}}^2 W_0}. \quad (5)$$

Величины $I_{\text{м}}$, $t_{\text{и}}$, $W_{\text{св}}$, W_0 , входящие в (5), зависят от параметров элементов разрядных цепей систем зажигания следующим образом [6]:

$$I_{\text{м}} = \sqrt{\frac{C}{L}} U_{\text{и}}; \quad (6)$$

$$t_{\text{и}} = \frac{2L}{R} \ln \left| \frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{ост}}} \right|; \quad (7)$$

$$W_{\text{св}} = CU_{\text{м}} \frac{1+e^{-\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}R}}{1-e^{-\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}R}} (U_{\text{и}} - |U_{\text{ост}}|); \quad (8)$$

$$W_0 = \frac{CU_0^2}{2}, \quad (9)$$

где C — емкость накопительного конденсатора емкостной системы зажигания;

L — индуктивность разрядной цепи;

R — активное сопротивление разрядной цепи;

U_0 — напряжение заряда накопительного конденсатора;

$U_{\text{и}}$ — напряжение на накопительном конденсаторе в момент перехода подготовительной стадии разряда в искровую;

$U_{\text{ост}}$ — остаточное напряжение на накопительном конденсаторе после погасания разряда в свече;

$U_{\text{м}}$ — амплитудное значение падения напряжения в свече в течение искровой стадии разряда.

Подставив (6)–(9) в (5), получим

$$\frac{K}{t_{\text{и}}} = \frac{U_{\text{м}} R^2 \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}R} \right) (U_{\text{и}} - |U_{\text{ост}}|)}{2U_0^2 U_{\text{и}} L \sqrt{LC} \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}R} \right) \left(\ln \left| \frac{U_{\text{ост}}}{U_{\text{и}}} \right| \right)^2} \quad (10)$$

Выражение (10) является основой для приближенной оценки требуемой величины емкости накопительного конденсатора, исходя из заданного отношения $K/t_{\text{и}}$, определяемого по (4).

В (10) обозначим

$$B = \frac{U_{\text{м}} R^2 (U_{\text{и}} - |U_{\text{ост}}|)}{2U_0^2 U_{\text{и}} L \sqrt{L} \left(\ln \left| \frac{U_{\text{ост}}}{U_{\text{и}}} \right| \right)^2}; \quad (11)$$

$$\sqrt{C} = x. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12) уравнение (10) преобразуется к виду

$$\frac{K}{t_{\text{и}}} = \frac{B}{x} \left(\frac{e^{\frac{\pi R x}{2\sqrt{L}}} + 1}{e^{\frac{\pi R x}{2\sqrt{L}}} - 1} \right). \quad (13)$$

Для решения (13) относительно x разложим $\exp\left(\frac{\pi R x}{2\sqrt{L}}\right)$ в ряд Тейлора [7]:

$$\varphi(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi^{(n)}(0)}{n!} x^n. \quad (14)$$

Находя значения последовательных производных при $x=0$ от функции $\varphi(x) = \exp\left(\frac{\pi R x}{2\sqrt{L}}\right)$ и ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получим

$$\exp\left(\frac{\pi R x}{2\sqrt{L}}\right) \approx 1 + \frac{\pi R x}{2\sqrt{L}}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (13), получим

$$\frac{K}{t_{\text{и}}} \approx \frac{B}{x} \left(\frac{4\sqrt{L} + \pi R x}{\pi R x} \right). \quad (16)$$

Решая (16) относительно x , запишем:

$$x = \frac{\pi BR + \sqrt{\pi^2 B^2 R^2 + 16\pi(K/t_n)BR\sqrt{L}}}{2\pi(K/t_n)R}. \quad (17)$$

С учётом введённого обозначения (12) искомая величина ёмкости накопительного конденсатора C будет равна

$$C = \left(\frac{\pi BR + \sqrt{\pi^2 B^2 R^2 + 16\pi(K/t_n)BR\sqrt{L}}}{2\pi(K/t_n)R} \right)^2, \quad (18)$$

где коэффициент B определяется по (11), а параметры U_m , U_0 , U_n , $U_{ост}$, R , L , входящие в (11), задаются и определяются при проектировании систем зажигания на основании общих рекомендаций, изложенных в [6].

Таким образом, получена формула для оценки требуемой величины ёмкости накопительного конденсатора, исходя из заданного отношения критерия воспламеняющей способности ёмкостных систем зажигания к длительности разряда K/t_n (4), причём это отношение находится по заданным максимальной скорости потока смеси в камере, скорости распространения пламени, частоте разрядов, конструктивному параметру камеры и характеристикам топливовоздушной смеси.

Дальнейшее определение параметров системы зажигания, в том числе расчет преобразователя напряжения бортовой сети в высоковольтные импульсы для заряда накопительного конденсатора, проводится по известным алгоритмам, изложенным в работах, посвященных проектированию систем зажигания [8, 9].

Список источников

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 566 с.
2. Гизатуллин Ф.А., Байбури И.Х. Особенности определения параметров ёмкостных систем зажигания для ГТД с высотным запуском // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2004. № 2. С. 44-46. EDN: HKYGOX.

Следует отметить, что расчётные возможности предложенного подхода к определению параметров проектируемых систем зажигания являются на данном этапе ограниченными в силу следующих причин. Во-первых, коэффициент A , входящий в выражение (2) и зависящий от физико-химических свойств смеси, является величиной достаточно неопределённой. Во-вторых, предложенный подход ориентирован на частный случай воспламенения смеси и распространения пламени без образования циркуляционной зоны, т.е. применим только при электроискровой стабилизации пламени в пусковых воспламенителях, а также камерах сгорания ГТД в условиях высотных запусков двигателей.

Выводы

Рассмотренные соотношения позволяют в качественном плане представить взаимосвязь параметров систем зажигания с характеристиками смеси в процессе воспламенения и электроискровой стабилизации пламени. Значимость предложенного подхода обосновывается тем, что в реальных устройствах горения, как известно, процесс воспламенения смеси неотделим от процесса стабилизации пламени. Дальнейшее развитие предложенного подхода к оценке параметров проектируемых систем зажигания с учётом особенностей процессов в камерах сгорания позволит, в конечном итоге, значительно сократить временные и материальные затраты на доводку ёмкостных систем зажигания двигателей.

3. Гизатуллин Ф.А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в ГТД // Авиационная промышленность. 2000. № 1. С. 56-60.
4. Гизатуллин Ф.А., Байбури И.Х. Расчет параметров систем зажигания аperiodического разряда с учетом характеристик смеси в процессе искрового воспламенения и стабилизации пламени // Вестник Уфимского государственного

ного авиационного технического университета. 2001. № 1. С. 195-198. URL:<http://journal.ugatu.su/index.php/Vestnik/article/view/2631/2311>.

5. Вахитов Р.Ш. Системы запуска авиационных газотурбинных двигателей. Уфа: Изд-во УАИ, 1977. 120 с.

6. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с. ISBN 5-86911-376-8.

7. Пчелин Б.К. Специальные разделы высшей математики. М.: Высшая школа, 1973. 461 с.

8. Гизатуллин Ф.А. Методика проектирования емкостных систем зажигания. Уфа: УАИ, 1992. 59 с.

9. Гизатуллин Ф.А. Расчет индукционных катушек с электромагнитным прерывателем. Уфа: УГАТУ, 2003. 53 с. ISBN 5-86911-412-8.

References

1. Lefebvre A. *Protsessy v kamerakh sgoraniya GTD: per. s angl.* [Processes in GTE Combustion Chambers: Transl. from Engl.]. Moscow, Mir Publ., 1986, 566 p. [in Russian].

2. Gizatullin F.A., Baiburin I.Kh. Osobennosti opredeleniya parametrov emkostnykh sistem zazhiganiya dlya GTD s vysotnym zapuskom [Features of Determining the Parameters of Capacitive Ignition Systems for Gas Turbine Engines with High-Altitude Start]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika — News of Higher Educational Institutions. Aviation Engineering*, 2004, No. 2, pp. 44-46. EDN: HKYGOX. [in Russian].

3. Gizatullin F.A. K teorii iskrovogo vosplamneniya toplivovozdushnykh smesei v GTD [On the Theory of Spark Ignition of Fuel-Air Mixtures

in Gas Turbine Engines]. *Aviatsionnaya promyshlennost' — Aviation Industry*, 2000, No. 1, p. 56-60. [in Russian].

4. Gizatullin F.A., Baiburin I.Kh. Raschet parametrov sistem zazhiganiya aperiodicheskogo razryada s uchetom kharakteristik smesi v protsesse iskrovogo vosplamneniya i stabilizatsii plameni [Calculation of Parameters of Ignition Systems of Aperiodic Discharge Taking into Account Characteristics of the Mixture during Spark Ignition and Flame Stabilization]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*, 2001, No. 1, pp. 195-198. URL:<http://journal.ugatu.su/index.php/Vestnik/article/view/2631/2311>. [in Russian].

5. Vakhitov R.Sh. *Sistemy zapuska aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* [Starting Systems of Aviation Gas Turbine Engines]. Ufa, Izd-vo UAI, 1977, 120 p. [in Russian].

6. Gizatullin F.A. *Emkostnye sistemy zazhiganiya* [Capacitive Ignition Systems]. Ufa, USATU, 2002. 249 p. ISBN 5-86911-376-8. [in Russian].

7. Pchelin B.K. *Spetsial'nye razdely vysshei matematiki* [Special Sections of Higher Mathematics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 461 p. [in Russian].

8. Gizatullin F.A. *Metodika proektirovaniya emkostnykh sistem zazhiganiya* [Methodology for designing capacitive ignition systems]. Ufa, UAI, 1992. 59 p. [in Russian].

9. Gizatullin F.A. *Raschet induktsionnykh katushek s elektromagnitnym preryvatelem* [Calculation of Induction Coils with Electromagnetic Interrupter]. Ufa, USATU, 2003. 53 p. ISBN 5-86911-412-8. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 30.01.2025; одобрена после рецензирования 04.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 30.01.2025; approved after reviewing 04.02.2025; accepted for publication 11.02.2025.

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДВУХ ПЯТИФАЗНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СКОРОСТИ ВЕТРА

**Роберт Радирович Саттаров****Robert R. Sattarov**

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

**Артур Валерьевич Махиянов****Arthur V. Makhyanov**

аспирант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, Россия

Актуальность

Ветроэнергетика в Республике Башкортостан, как и в любом другом регионе, имеет свои недостатки. Башкортостан не относится к регионам с высоким уровнем ветровой энергии. Согласно данным метеорологических станций, среднегодовая скорость ветра на высоте до 10 м варьируется от 1,6 до 4,4 м/с. Номинальная скорость ветра, при которой ветрогенератор вырабатывает максимальную мощность, находится в диапазоне 12–15 м/с.

Для преодоления проблемы выработки электроэнергии в районах с пониженной скоростью ветра, где потенциал ветровой энергии невелик, необходимы новые технические решения. Одно из них предложено в данной статье в виде ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов со стабилизацией напряжения.

Цель исследования

Исследовать возможность стабилизации выходного напряжения при низких скоростях ветра в ветроустановке на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов.

Методы исследования

Моделирование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов в пакете прикладных программ Matlab (Simscape).

Ключевые слова

ветровой поток,
ветроэнергетическая
установка, пятифазный
магнитоэлектрический
генератор,
реконфигурация

Результаты

Проведено исследование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов в пакете прикладных программ Matlab (Simscape). Подобный метод регулирования напряжения может обеспечить возможность стабилизировать напряжение и сохранять высокую эффективность на приемлемом уровне в более широком диапазоне низких и нормальных скоростей ветра.

Для цитирования: 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. № 1. Т. 21. С. 16-25. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25>.

Original article

MODELING A WIND TURBINE BASED ON TWO FIVE-PHASE MAGNETOELECTRIC GENERATORS WITH VOLTAGE STABILIZATION AT CHANGING WIND SPEED

Relevance

Wind power in the Republic of Bashkortostan, as in any other region, has its drawbacks. Bashkortostan is not a region with a high level of wind energy. According to meteorological stations, the average annual wind speed at a height of up to 10 m varies from 1.6 to 4.4 m/s. The nominal wind speed at which the wind generator produces maximum power is in the range of 12–15 m/s.

To solve the problem of generating electricity in areas with low wind speed, where the potential of wind energy is small, new technical solutions are needed. One of them is proposed in this article in the form of a wind turbine based on two five-phase magnetoelectric generators with voltage stabilization.

Aim of research

To investigate the possibility of stabilizing the output voltage at low wind speeds in a wind turbine based on two five-phase magnetoelectric generators.

Research methods

Modeling of operating modes at low and normal wind speeds of a wind turbine based on two five-phase magnetoelectric generators in the Matlab (Simscape) software package.

Results

A study was conducted of the operating modes at low and normal wind speeds of a wind turbine based on two five-phase magnetoelectric generators in the Matlab (Simscape) software package. Such a method of voltage regulation can provide the ability to stabilize the voltage and maintain high efficiency at an acceptable level in a wider range of low and normal wind speeds.

Keywords

wind flow, wind power plant, five-phase magnetoelectric generator, reconfiguration

For citation: Sattarov R. R., Makhyanov A. V. Modelirovaniye vetrustanovki na baze dvukh pyatifaznykh magnitoelektricheskikh generatorov so stabilizatsiyey napryazheniya pri izmenyayushcheysya skorosti vetra [Modeling a Wind Turbine Based on Two Five-Phase Magnetoelectric Generators with Voltage Stabilization at Changing Wind Speed]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 16-25 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-16-25>.

Введение

По прогнозам Международного энергетического агентства (IEA) к 2050 году доля энергии ветра в мировом энергобалансе может составить 35 %. Однако, согласно оценкам Европейского совета по возобновляемым источникам энергии, этот показатель может быть достигнут уже к 2030 году [1]. В настоящее время Китай лидирует в производстве ветряной энергии [2]. Установленная мощность всех ветроэнергетических установок Китая в конце октября 2024 года достигла 486,17 ГВт, и скоро этот показатель превысит 500 ГВт [3]. На рисунке 1 показана доля возобновляемых источников энергии в энергобалансе России и Китая за период с 1990 г. по 2023 г. [4].

В настоящее время в России функционирует 37 ветроэлектростанций. Крупнейшая из них расположена в

Ставропольском крае в непосредственной близости от города Невинномыска. В её состав входят 84 ветрогенератора, каждый из которых способен вырабатывать 2,5 МВт энергии. Таким образом, общая установленная мощность ветроэлектростанции составляет 210 МВт. Государственная корпорация «Росатом» ставит перед собой цель увеличить мощность ветроэнергетики в России до 5 ГВт в течение следующих десяти лет [5].

Рассмотрим субъект Российской Федерации — Республику Башкортостан. Ветроэнергетика в Республике Башкортостан, как и в любом другом регионе, имеет свои недостатки. Башкортостан не относится к регионам с высоким уровнем ветровой энергии. Согласно данным метеорологических станций, среднегодовая скорость ветра на высоте до 10 м варьируется от 1,6 до 4,4 м/с [6]. Номинальная скорость ветра, при кото-

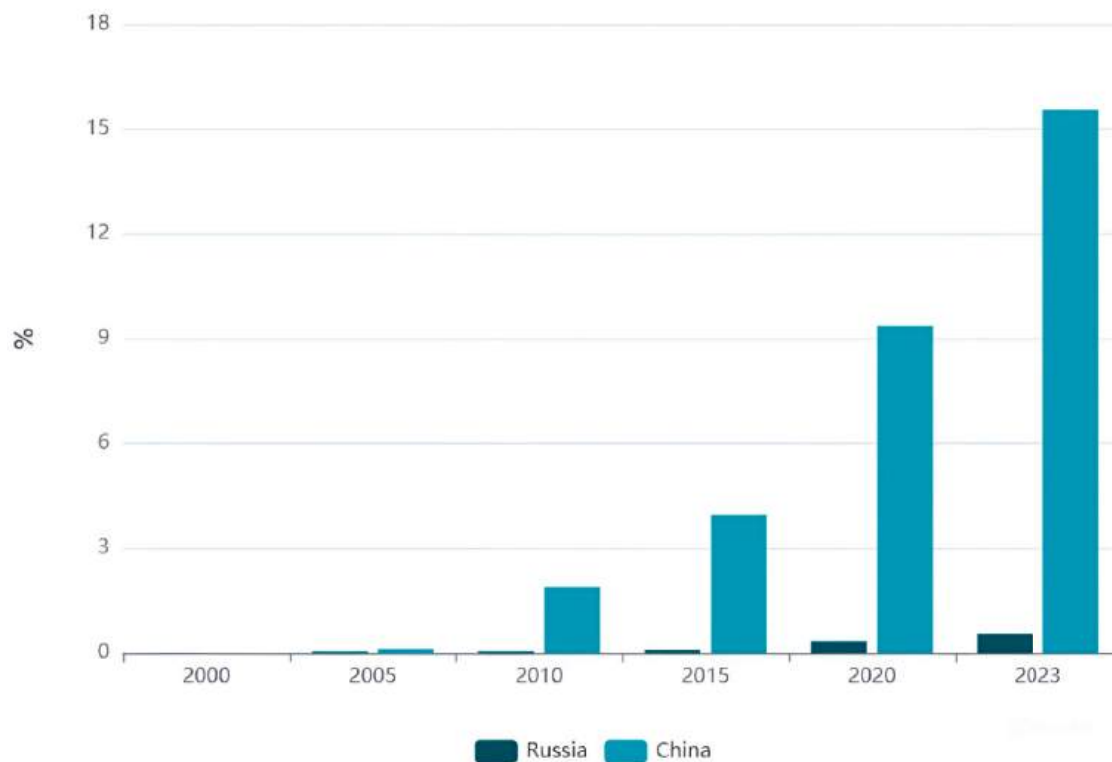


Рисунок 1. Доля возобновляемых источников энергии в энергобалансе России и Китая за период с 1990 г. по 2023 г. [4]

Figure 1. The share of renewable energy sources in the energy balance of Russia and China for the period since 1990 to 2023 [4]

рой ветрогенератор вырабатывает максимальную мощность, находится в диапазоне 12–15 м/с.

Ветроэнергетика — это перспективная область альтернативной энергетики, которая имеет ряд преимуществ, включая возобновляемость ресурсов, экологичность и относительно невысокую стоимость получаемой энергии. Однако существуют и некоторые ограничения, связанные с изменчивостью скорости и направлении ветра [7]. Для преодоления проблемы выработки электроэнергии в районах с пониженной скоростью ветра, где потенциал ветровой энергии невелик, необходимы новые технические решения, которые обеспечат стабильную работу ветроэлектростанций [1]. К числу систем, которые характеризуются высокой энергетической эффективностью и стабильностью работы, можно отнести многофазные генераторы.

Экспериментальный стенд ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов

Рассмотрим экспериментальный стенд ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов, показанный на рисунке 2, по аналогии с [8, 9].

Экспериментальный стенд содержит частотный преобразователь, электрически связанный с двухвальный асинхронным двигателем IM1082, который при помощи муфт соединен с роторами пятифазных магнитоэлектрических генераторов МГ1 и МГ2. Выводы генераторов МГ1 и МГ2 электрически соединены с пятифазными мостовыми выпрямителями VD1 и VD2, а те, в свою очередь, с контактором с двумя нормально открытыми контактами С1 и С2 и одним нормально закрытым С3. Сам контактор подключен к электронной нагрузке.

Рассмотрим принцип действия данного стенда. При имитации нормальной скорости ветра асинхронный двигатель с помощью частотного преобразователя вращает с нормальной скоростью пятифазные магнитоэлектрические генераторы МГ1 и МГ2. Вырабатываемое переменное напряжение преобразуется в постоянное при помощи пятифазных мостовых выпрямителей VD1 и VD2, выводы которых соединяются параллельно при помощи контактора: контакты К1 и К2 замкнут, а контакт К3 разомкнут. Далее с электронной нагрузки снимаются основные характеристики, выходное напряжение имеет нормальное значение, а ток равен удвоенному нормальному току одного выпрямителя. При таком режиме обеспечивается максимальная мощность данной установки при сохранении нормального значения напряжения.

При имитации минимальной пороговой пониженной скорости ветра происходит снижение выходного напряжения, вырабатываемого выпрямителями VD1 и VD2. Их выводы при помощи контактора подключаются последовательно: контакты К1 и К2 разомкнут, а контакт К3 замкнут. Это приводит к повышению выходного напряжения до нормального значения, ток при этом уменьшается, оказавшись равным току одному выпрямителя. Мощность снижается, но является максимально возможной при данной сниженной скорости ветра.

При имитации обратного повышения скорости ветра обеспечивается обратное переключение выводов выпрямителей VD1 и VD2 на параллельную работу.

Таким образом, с помощью данного экспериментального стенда происходит исследование работы ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов в зависимости от скорости ветра.

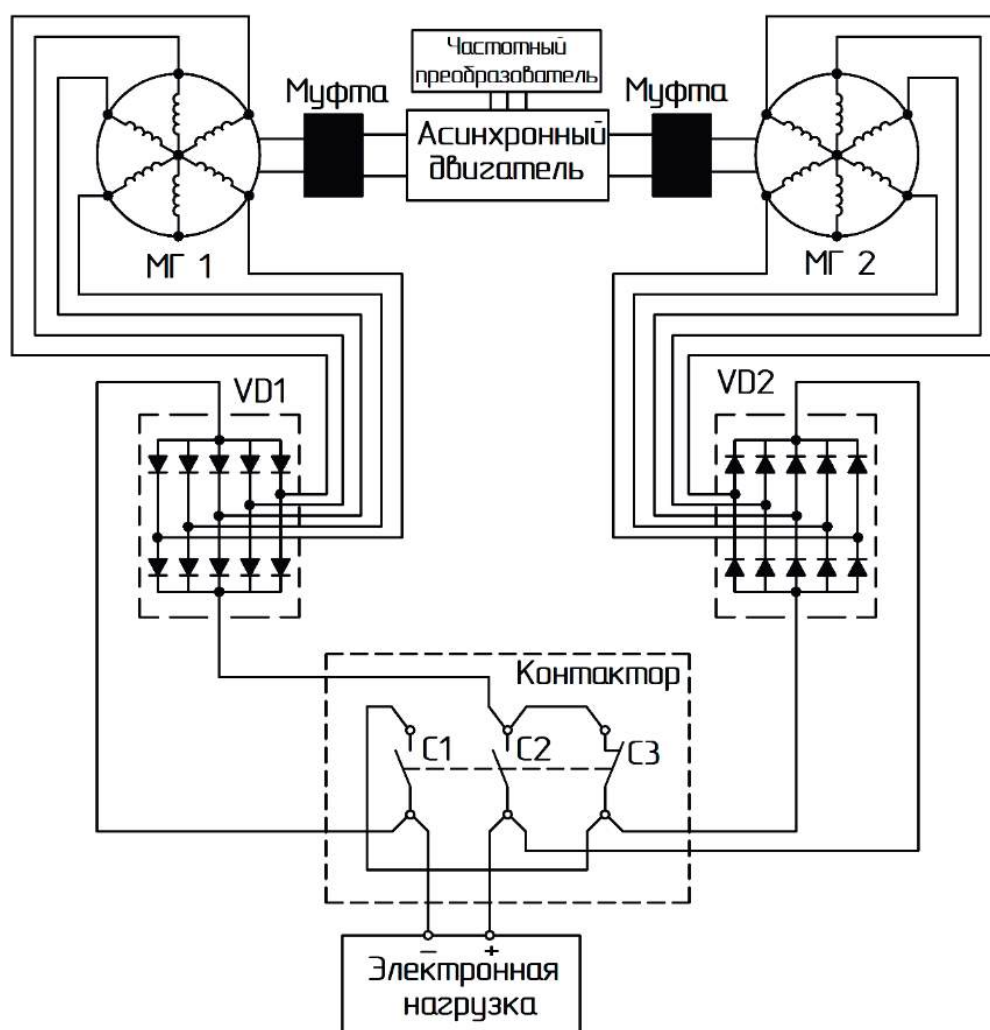


Рисунок 2. Экспериментальный стенд ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов

Figure 2. Experimental stand of a wind turbine based on two five-phase magnetoelectric generators

Моделирование ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов

Для компьютерного моделирования пятифазного синхронного генератора используется библиотека SimScape/Matlab. Модель трех- и пятифазного магнитоэлектрического генератора реализуется на основе хорошо известной математической модели во вращающейся системе координат [10].

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

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{d1} = \frac{1}{L} u_{d1} - \frac{R}{L} i_{d1} + \frac{L_q}{L} p \omega_m i_{q1} \\ \frac{d}{dt} i_{q1} = \frac{1}{L} u_{q1} - \frac{R}{L} i_{q1} + \frac{L_d}{L} p \omega_m i_{d1} - \frac{\lambda p \omega_m}{L} \\ \frac{d}{dt} i_{d2} = \frac{1}{L} u_{d2} - \frac{R}{L} i_{d2} \\ \frac{d}{dt} i_{q2} = \frac{1}{L} u_{q2} - \frac{R}{L} i_{q2} \\ T_e = 2,5 \lambda p i_{q1} \end{cases}, \quad (1)$$

где L — индуктивность якоря;

L_d, L_q — индуктивность статора по осям d и q ;

R — сопротивление обмоток статора;

i_{d1}, i_{q1} — проекции токов на оси $d1$ и $q1$;

u_{d1}, u_{q1} — проекции напряжений на оси $d1$ и $q1$;

i_{d2}, i_{q2} — проекции токов на оси $d2$ и $q2$;

u_{d2}, u_{q2} — проекции напряжений на оси $d2$ и $q2$;

ω_r — угловая частота вращения ротора;

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

p — число пар полюсов;

T_e — электромагнитный момент.

Все параметры ротора и его переменные приведены к статору.

Механическая часть модели описывается следующей системой уравнений [10]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m) \\ \frac{d}{dt} \theta = \omega_r \end{cases}, \quad (2)$$

где J — суммарный момент инерции ротора и нагрузки;

F — коэффициент трения;

θ — угол положения ротора;

T_m — момент сопротивления.

Рассмотрим упрощенную компьютерную модель в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab (Simscape) исследуемой ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов, показанной на рисунке 3. Подобные исследования были проведены в [1, 11, 12]. Блоки «Permanent Magnet Synchronous Machine» используются в качестве пятифазных магнитоэлектрических генераторов, действующее значение напряжения которых фиксируется блоком «RMS» в связке с блоком «Three-Phase V-I Measurement», измеряющим трехфазное напряжение. Каждый пятифазный мостовой выпрямитель реализован с помощью десяти блоков «Diode». Частоты вращений (об/мин) генераторов задаются блоками «Gain» и «Constant».

В первом режиме работы имитируются два случая, показанные на рисунке 3, *b*:

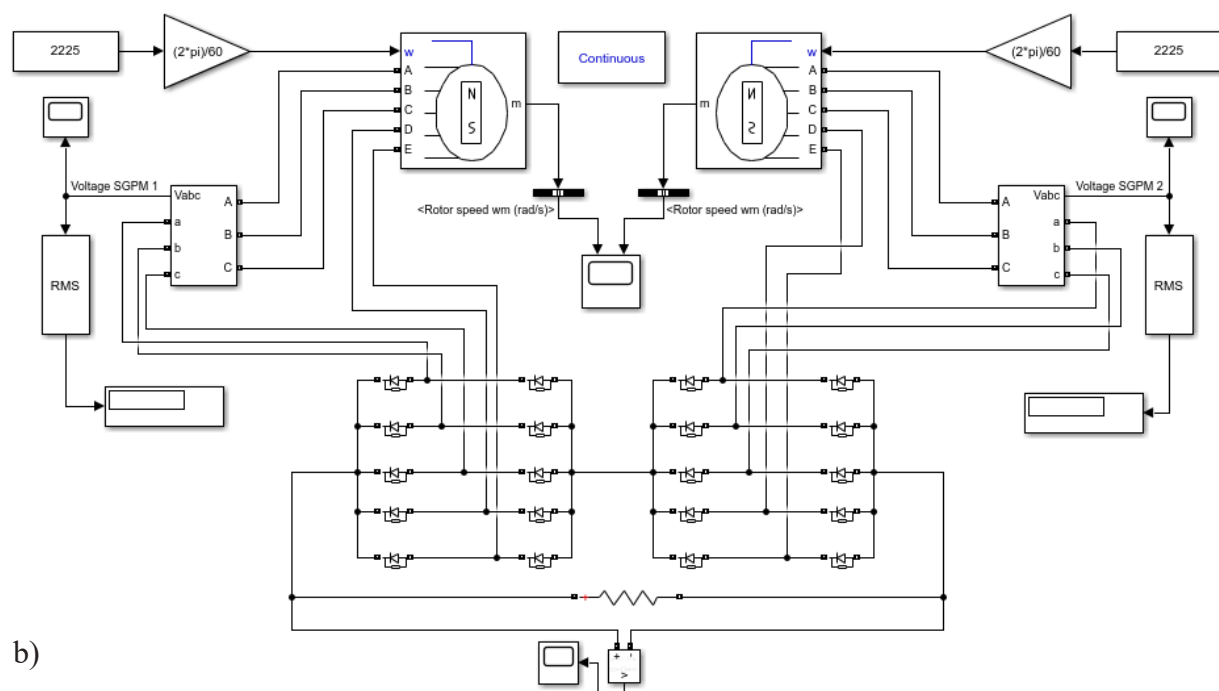
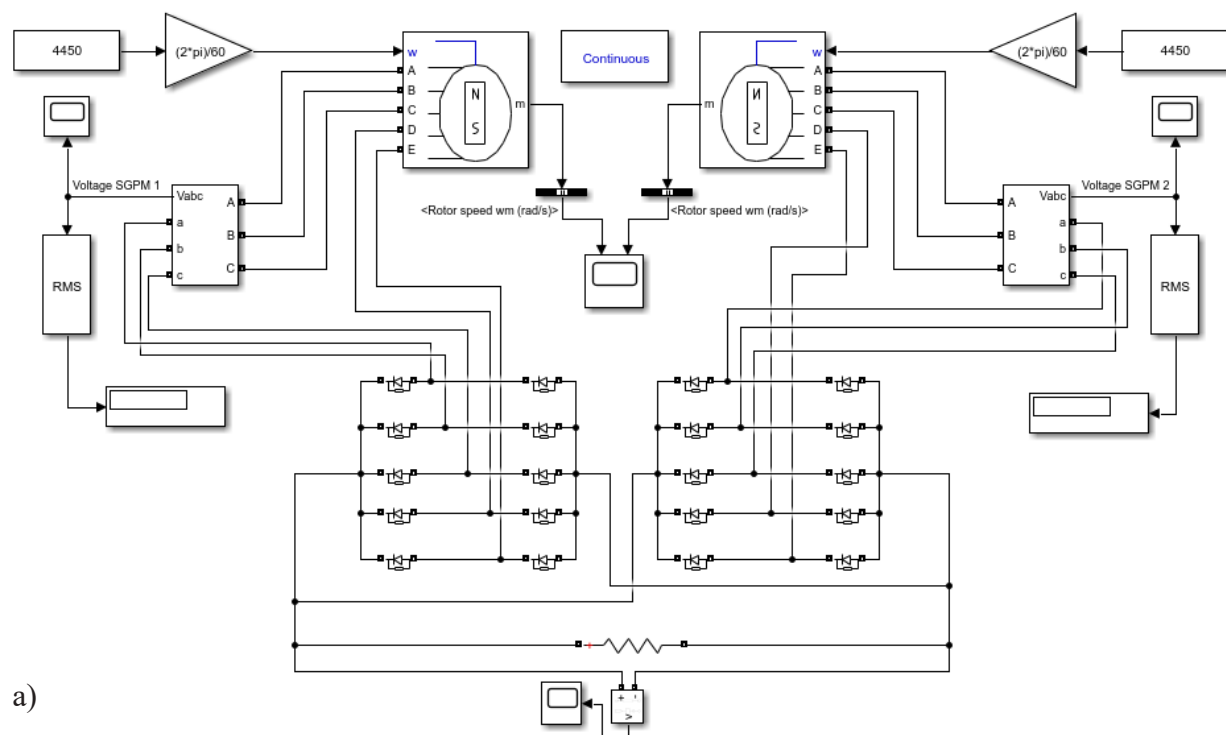
1) ветровой поток обеспечивает вращение роторов пятифазных магнитоэлектрических генераторов со скоростью 4450 об/мин, пятифазные мостовые выпрямители при этом соединены параллельно, выходное напряжение составляет 412 В;

2) ветровой поток обеспечивает вращение роторов пятифазных магнитоэлектрических генераторов с пониженной скоростью 2225 об/мин, пятифазные мостовые выпрямители при этом соединены параллельно, выходное напряжение составляет 206 В.

Во втором режиме работы имитируется пониженная скорость ветрового потока, обеспечивающая вращение роторов генераторов со скоростью 2225 об/мин, пятифазные мостовые выпрямители при данном опыте соединены последовательно, выходное напряжение равно 412 В. Напряжение магнитоэлектрических генераторов снижается пропорционально частоте вращения роторов.

Как видно из результатов моделирования, представленных на рисунке 4, в этом идеальном случае, когда скорость снижается в 2 раза, переход на последовательное соединение пятифазных мостовых выпрямителей позволяет суммировать напряжение магнитоэлектрических генераторов и получить среднее постоянное напряжение, близкое к номинальному.

Для снижения пульсаций выпрямленного напряжения дополнительно используются фильтры. На рисунке 5 показаны результаты моделирования при добавлении сглаживающего конденсатора емкостью 1 мФ, обеспечивающего практиче-



а) параллельное соединение; б) последовательное соединение

a) parallel connection; b) series connection

Рисунок 3. Моделирование ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов в Matlab (Simscape)

Figure 3. Modeling a wind turbine based on two five-phase magnetoelectric generators in Matlab (Simscape)

ски постоянное выходное напряжение. Амплитуда колебаний выходного напряжения снизилась с 26,0 до 0,2 В.

Таким образом, переключение обмоток в синхронном генераторе может использоваться в ветроэнергетических установках для стабилизации их напря-

жения при существенном снижении скорости ветра. Во всех режимах работы сохраняется нормальный уровень напряжения и выдается максимально возможная мощность при данной скорости ветра.

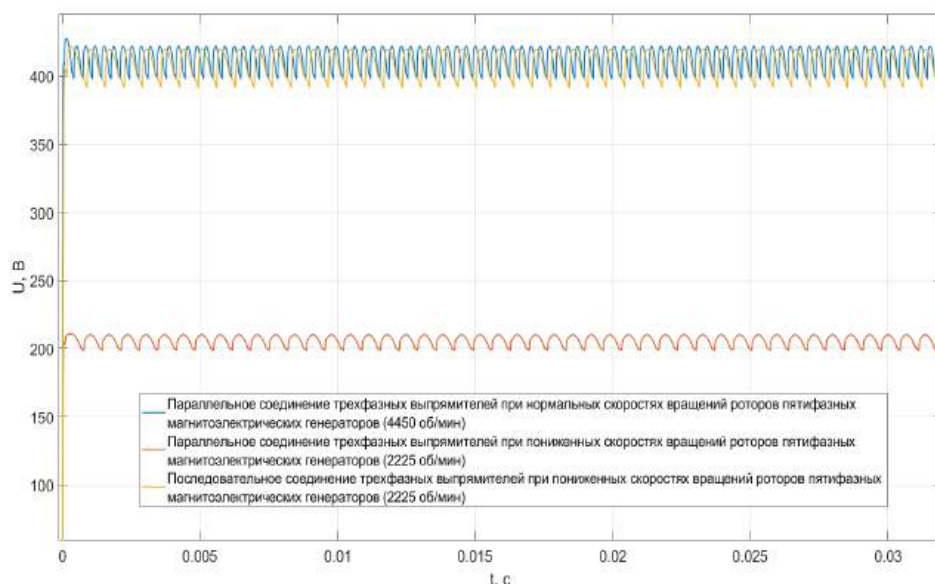


Рисунок 4. Напряжения нагрузки при параллельном и последовательном включении пятифазных мостовых выпрямителей для нормальной и пониженной скорости ветра

Figure 4. Load voltages for parallel and series connection of five-phase bridge rectifiers for normal and reduced wind speed

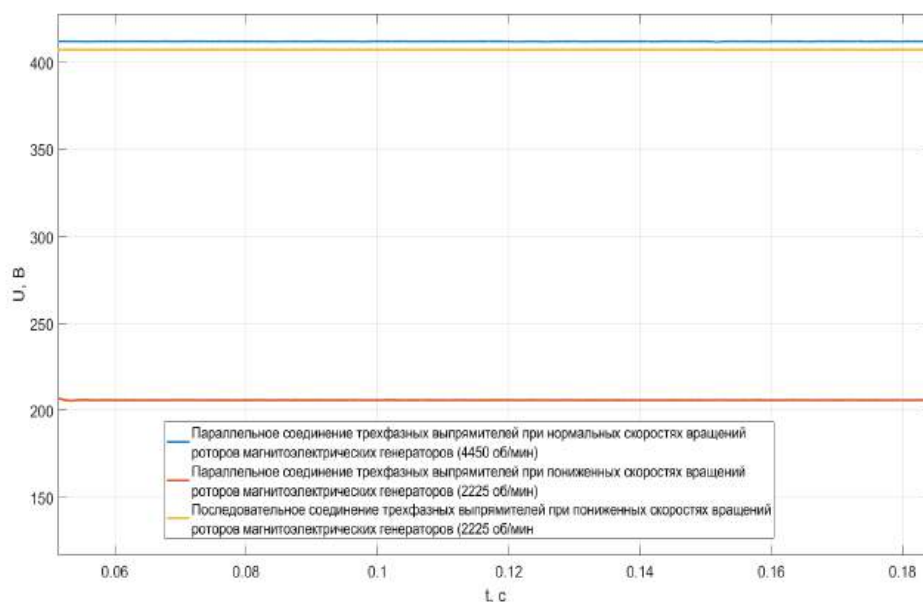


Рисунок 5. Напряжения нагрузки при параллельном и последовательном включении пятифазных мостовых выпрямителей при использовании сглаживающего конденсатора

Figure 5. Load voltages for parallel and series connection of five-phase bridge rectifiers using a smoothing capacitor

Выводы

Проведено исследование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроустановки на базе двух пятифазных магнитоэлектрических генераторов в пакете прикладных программ Matlab (Simscape). Подобный метод регулирования напряжения может обеспечить возможность стабилизировать напряжение и сохранять высокую эффективность на приемлемом уровне в более

широком диапазоне низких и нормальных скоростей ветра. Однако требуются дальнейшие исследования подобной модели, в которых будут проанализированы условия работы АС-DC-АС инверторов, обмоток генераторов и нейтралей энергосистемы. Наличие переключаемых обмоток будет обеспечивать лучшие условия для регулирования выходного напряжения ветроэнергетической установки при снижении скорости ветра.

Список источников

1. Алексеенко В.А. Научно-технические аспекты разработки и функционирования автономных вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок для сельскохозяйственных потребителей: дисс. д-ра техн. наук. Ставрополь, 2021. 377 с.
2. Global Enrgy Monitor. China Continues to Lead the World in Wind and Solar, with Twice as Much Capacity under Construction as the Rest of the World Combined. URL: <https://globalenergymonitor.org/report/china-continues-to-lead-the-world-in-wind-and-solar-with-twice-as-much-capacity-under-construction-as-the-rest-of-the-world-combined/> (дата обращения: 02.02.2025).
3. Установленная мощность ветроэнергетики Китая превысила 500 ГВт. URL: https://www.c-o-k.ru/market_news/ustanovlennaya_moschnost_vetroenergetiki-kitaya-prevysila-500-gvt (дата обращения: 02.02.2025).
4. World Energy & Climate Statistics — Yearbook 2024. Share of Wind and Solar in Electricity Production. URL: <https://yearbook.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html> (дата обращения: 03.02.2025).
5. Росатом рассчитывает довести мощность в ветроэнергетике до 5 ГВт за 10 лет. URL: <https://smotrim.ru/article/4256663> (дата обращения: 03.02.2025).
6. Опыт монтажа и эксплуатации ветроэнергетических установок [Электронный ресурс]. URL: <http://windturbines.ru/article/77-opit-montaga-windturbines.html> (дата обращения: 04.02.2025).
7. Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Саттаров Р.Р., Игнатьев С.Г., Городских А.А. Расчет магнитной системы магнитоэлектрических генераторов мощностью до 10 кВА для ветроэнергетических установок // Электротехнические и

информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14, № 1. С. 27-33. EDN: XXSEOL.

8. 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, Заявл. 26.03.2024; Оpubл. 16.08.2024.

9. 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, Заявл. 11.04.2024; Оpubл. 26.11.2024.

10. MathWorks. Help Centre. Permanent Magnet Synchronous Machine URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/permanent-magnetsynchronousmachine.html> (дата обращения: 04.02.2025).

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., Мини-ахметова 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.

References

1. Alekseenko V.A. *Nauchno-tekhicheskie aspekty razrabotki i funktsionirovaniya avtonomnykh vertikal'no-osevykh rotornykh vetroenergeticheskikh ustanovok dlya sel'skokho-*

zyaistvennykh potrebitelei: diss. d-ra tekhn. nauk [Scientific and Technical Aspects of the Development and Operation of Autonomous Vertical-Axis Rotor Wind Power Plants for Agricultural Consumers: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Stavropol, 2021. 377 p. [in Russian].

2. *Global Enrgy Monitor. China Continues to Lead the World in Wind and Solar; with Twice as Much Capacity under Construction as the Rest of the World Combined*. URL: <https://globale-nergymonitor.org/report/china-continues-to-lead-the-world-in-wind-and-solar-with-twice-as-much-capacity-under-construction-as-the-rest-of-the-world-combined/> (accessed 02.02.2025).

3. *Ustanovlennaya moshchnost' vetroenergetiki Kitaya prevysila 500 GVt* [China's Installed Wind Power Capacity Exceeds 500 GW]. URL: https://www.c-o-k.ru/market_news/ustanovlennaya-moshchnost-vetroenergetiki-kitaya-prevysila-500-gvt (accessed 02.02.2025). [in Russian].

4. *World Energy & Climate Statistics — Yearbook 2024. Share of Wind and Solar in Electricity Production*. URL: <https://yearbook.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html> (accessed 03.02.2025).

5. *Rosatom rasschityvaet dovesti moshchnost' vetroenergetike do 5 GVt za 10 let* [Rosatom Expects to Increase Wind Power Capacity to 5 GW in 10 Years]. URL: <https://smotrim.ru/article/4256663> (accessed: 03.02.2025). [in Russian].

6. *Opyt montazha i ekspluatatsii vetroenergeticheskikh ustanovok* [Experience in Installation and Operation of Wind Turbines] [Electronic Resource]. URL: <http://windturbines.ru/article/77-opit-montaga-windturbines.html> (accessed 04.02.2025). [in Russian].

7. Evdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R., Ignat'ev S.G., Gorodskikh A.A. Raschet magnitnoi sistemy magnitoelektricheskikh generatorov moshchnost'yu do 10 kVa dlya vetroenergeticheskikh ustanovok [The Calculation of the Magnetic System of Magneto-Electric Generators up to 10 kVa for Wind Turbines]. *Elektro-*

tekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems, 2018, Vol. 14, No. 1, pp. 27-33. EDN: XXSEOL. [in Russian].

8. Sattarov R.R., Makhyanov A.V., Krylov D.N. *Gorizonta'l'no-turbinnyi devyatifaznyi vetrogenerator* [Horizontal-Turbine Nine-Phase Wind Generator]. Patent RF, No. 228169, 2024. [in Russian].

9. Sattarov R.R., Makhyanov A.V. *Aerostatnoe vetroenergeticheskoe ustroystvo s devyatifaznym generatorom* [Balloon Wind Power Device with a Nine-Phase Generator]. Patent RF, No. 230315, 2024. [in Russian].

10. *MathWorks. Help Centre. Permanent Magnet Synchronous Machine* URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/permanent-magnetsynchronousmachine.html> (accessed 04.02.2025).

11. Sattarov R.R., Makhyanov A.V. Uproshchennaya komp'yuternaya model' vetroenergeticheskoi sistemy na osnove dvukh magnitoelektricheskikh generatorov s rekonfiguriruemymi obmotkami [Simplified Computer Model of a Wind Power System Based on Two Magnetolectric Generators with Reconfigurable Windings] *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye 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., Miniakhmetova S.O. Komp'yuternoe modelirovanie vetroustanovki na osnove dvukh sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami [Computer Simulation of a Wind Turbine Based on Two Synchronous Generators with Permanent Magnets]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye 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].

Статья поступила в редакцию 23.01.2025; одобрена после рецензирования 04.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 23.01.2025; approved after reviewing 04.02.2025; accepted for publication 11.02.2025.

Научная статья

УДК 621.313.17

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-26-40

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Владислав Сергеевич Калитка****Vladislav S. Kalitka**

кандидат химических наук,

директор проектного комплекса «Электродвижение»,

ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского»,

Москва, Россия

**Никита Дмитриевич Васильков****Nikita D. Vasilkov**

главный специалист

проектного комплекса «Электродвижение»,

ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского»,

Москва, Россия

Актуальность

Прогресс в сфере электроэнергетики определил общемировую тенденцию внедрения во все виды транспорта технологий электродвижения. В рамках национальных проектов и федеральных программ Российской Федерации ставятся задачи достижения технологического суверенитета и превосходства, что определяет необходимость развития прорывных технологий, одной из которых для систем электродвижения является высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП).

Цель исследования

Определение приоритетного вектора научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в интересах промышленного комплекса Российской Федерации по созданию перспективных систем электродвижения, а также электроэнергетики по созданию крупных электрических машин для электростанций, ветрогенераторов и прочего.

Методы исследования

Для раскрытия темы исследования применялись методы системного анализа и синтеза, основанные на информации по существующим агрегатам, а также результатам математического моделирования и проектирования перспективных ВТСП-электрических машин.

Результаты

В статье рассмотрен вопрос об использовании ВТСП-технологий при создании перспективных электрических вращающихся машин. Рассмотрены различные компоновки электрических ВТСП-машин, а также методы криогенного охлаждения. В частности, проанализиро-

Ключевые слова

высокотемпературная сверхпроводимость, электродвижение, гибридная силовая установка, электродвигатель, электрогенератор, обмотка

ваны особенности применения ВТСП для обмоток переменного и постоянного токов. Представлен обзор глобальных исследований и инноваций в области использования ВТСП для силовых систем перспективных транспортных средств. С учётом информации о реализуемых проектах и значениях параметров, которые достигаются в современных электродвигателях без криогенного охлаждения, сделан вывод о том, что использование ВТСП-машин может быть эффективным в определённых нишах. Кроме того, поставлен вопрос о развитии программно-аппаратной базы расчета технических характеристик перспективных силовых установок, включая ВТСП-системы.

Для цитирования: Калитка В. С., Васильков Н. Д. К вопросу использования высокотемпературных сверхпроводников для создания перспективных электрических машин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 26-40. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-26-40>.

Original article

ON THE ISSUE OF USING HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS TO CREATE ADVANCED ELECTRIC MACHINES

Relevance

Progress in the electric power industry has determined the global trend of introducing electric propulsion technologies into all types of transport. National projects and federal programs of the Russian Federation have set the tasks of achieving technological sovereignty and superiority, which determines the necessity to develop disruptive technologies, one of which for electric propulsion systems is high-temperature superconductivity (HTS).

Aim of research

To determine the priority vector of the research and development works in the interests of the industrial complex of the Russian Federation on designing advanced electric propulsion systems; as well as in the interests of the electric power industry on designing large electric machines for power plants, wind turbines, and others.

Research methods

To reveal the research topic, the authors have applied methods of system analysis and synthesis based on the information on the existing units, as well as on the results of mathematical modeling and design of advanced HTS electric machines.

Results

The article discusses the use of HTS technologies in the design of advanced electric rotating machines. Various layouts of electric HTS machines, as well as cryogenic cooling methods, have been considered. In particular, the features of the use of HTS for AC and DC windings have been analyzed. The overview of the global research and innovations in the field of the use of HTS for power systems of advanced vehicles have been presented. Considering the information about the current projects and the values of the parameters that are achieved in modern electric engines without cryogenic cooling, it has been concluded that the use of HTS machines can be effective in certain niches. In addition, the article has raised the question of the development of the hardware and software base that calculates the technical characteristics of advanced powertrains, including HTS systems.

Keywords

high-temperature superconductivity, electric propulsion, hybrid powertrain, electric motor, electric generator, winding

For citation: Kalitka V. S., Vasilkov N. D. K voprosu ispol'zovaniya vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov dlya sozdaniya perspektivnykh elektricheskikh mashin [On the Issue of Using High-Temperature Superconductors to Create Advanced Electric Machines]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 26-40 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-26-40>.

Введение

Примерно 60–70 % от общего мирового количества всей вырабатываемой электроэнергии идет на преобразование в механическую электродвигателями, в том числе в составе различных механизмов, станков и транспортных средств [1]. И это количество будет только расти ввиду общемировой тенденции проникновения технологий электродвижения во все виды транспортных средств, включая воздушные и морские суда, автомобильный и железнодорожный транспорт. Развитые западные страны уже давно ведут целенаправленную, так называемую «зеленую», политику по трансформации глобальной экономики, важной особенностью которой станет альтернативный топливно-энергетический баланс. Несмотря на имеющиеся у Российской Федерации богатейшие запасы углеводородного сырья не может не учитываться тот факт, что транспорт как один из основных потребителей энергии развивается в направлении сокращения его потребления. Важнейшей причиной изменений в этом процессе стало увеличение производства электромобилей, являющихся драйвером развития всего направления электродвижения. В 2024 году в России стартовал Национальный проект «Промышленное обеспечение транспортной мобильности», рассчитанный до 2030 года и посвященный в том числе инновационным видам транспорта, включая гибридные, водородные и полностью электрические. Крупнейшее финансирование в рамках нацпроекта приходится на федеральную программу «Самолето- и вертолетостроение». Это логичный шаг, учитывая, что количество завершенных и текущих

мировых проектов «более электрического самолета» и других летательных аппаратов, гибридных и полностью электрических силовых установок исчисляется в тысячах.

Технологии высокотемпературной сверхпроводимости

В этой связи актуальным становится вопрос развития технологий, способных обеспечить технологическое лидерство Российской Федерации на рынке электрических машин. Одной из таких перспективных технологий являются технологии на базе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и системы на их основе. ВТСП представляют собой группу материалов, которые обладают схожими свойствами и демонстрируют снижение электрического сопротивления до нуля при относительно высоких температурах, называемых критическими. В отличие от низкотемпературных сверхпроводников, у которых критическая температура исторически составляет меньше 30 К, у ВТСП-материалов критическая температура должна быть больше этой величины. Однако чаще всего под ВТСП подразумевают материалы, у которых критическая температура превышает температуру кипения азота, составляющую 77 К.

Сейчас существуют два поколения технологии производства проводов из ВТСП-материалов: первое — ВТСП-провод на основе соединений Bi-2212 и Bi-2223 с серебряным покрытием, второе — ВТСП-ленты на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с подложками из никелевых сплавов. Объем сверхпроводника составляет лишь небольшую часть от общего объема провода: в проводах I-го поколения

эта величина обычно не более 40 %, а в лентах II-го поколения — менее 5 %, при этом ВТСП представляет собой тонкое покрытие на поверхности ленты. Чтобы не допустить химического взаимодействия между металлической лентой-подложкой и ВТСП, а также обеспечить текстурированный рост, используется буферный слой. Это один из основных элементов технологии. Поверх слоя ВТСП наносится серебряный защитный слой, который обеспечивает электрический контакт и защищает ВТСП от воздействия водяных паров и углекислого газа из воздуха, а также от химического взаимодействия с шунтирующим материалом — медью.

Проводники из ВТСП I-го поколения уже обладают высокой токонесущей способностью, благодаря чему из них изготавливают обмотки электрических машин и магнитов, а также кабели. В частности, уже удалось создать силовые ВТСП-кабели длиной до 2500 м, которые используются в реальных энергосетях. Проводники из ВТСП II-го поколения хоть и несколько дороже в производстве, но имеют токонесущую способность существенно выше. В обоих случаях можно использовать жидкий азот для охлаждения. Криогенные системы на жидком азоте стоят меньше, чем на жидком гелии или водороде, к тому же сам азот доступен и недорог. Но при температуре жидкого гелия или водорода можно значительно увеличить токонесущую способность ВТСП-провода. Если охладить его до 77 К, плотность тока в ВТСП-ленте II-го поколения превысит $0,5 \text{ кА/мм}^2$, а при температуре 20 К эта величина достигнет более 5 кА/мм^2 .

Кроме того, уже сегодня стоимость ВТСП-ленты II-го поколения составляет 100 долл. США/(кА·м) (при 77 К) или даже меньше, что всего лишь в 3 раза больше стоимости меди 30 долл. США/(кА·м), полученной

исходя из ее текущей биржевой стоимости (около 9000 долл. США/т или 9 долл. США/кг), а также значения предельно допустимого длительного тока согласно Правилам устройства электроустановок (около 0,3 кА для медного провода длиной 1 м, массой 1 кг и, соответственно, сечением $\approx 112 \text{ мм}^2$). А к 2030 году при условии увеличения объемов производства на порядок прогнозируется падение цены ВТСП-ленты II-го поколения ниже 10 долл. США/(кА·м) [2], что сделает большие ВТСП-машины дешевле традиционных с медными обмотками, так как разница в цене проводника перекроет стоимость криостатов и криосистемы.

Функциональные возможности ВТСП-лент определяются такими параметрами, как критический ток, температура и внешнее магнитное поле. Критический ток снижается при увеличении индукции, но уменьшение температуры позволяет не только компенсировать это снижение, но и значительно увеличить величину критического тока. В традиционных электрических машинах индукция магнитного поля достигает 1 Тл, а в ВТСП-машинах её можно увеличить до $2\div 3$ Тл и более. Чтобы достичь высоких плотностей тока, ВТСП-машину необходимо охладить ниже 77 К. На рисунке 1 продемонстрировано, что с понижением температуры ВТСП-ленты плотность тока растёт, и, вместе с тем, ток меньше падает с ростом величины индукции магнитного поля [3].

Для создания магнитного поля с индукцией $2\div 3$ Тл в воздушном зазоре электрической машины магнитная индукция в области ВТСП-лент должна достигать $5\div 10$ Тл, что приведет к падению критического тока практически до нуля при температуре жидкого азота. Кроме того, для создания поля в $2\div 3$ Тл необходимо многократно повысить число ампер-витков в обмотке возбужде-

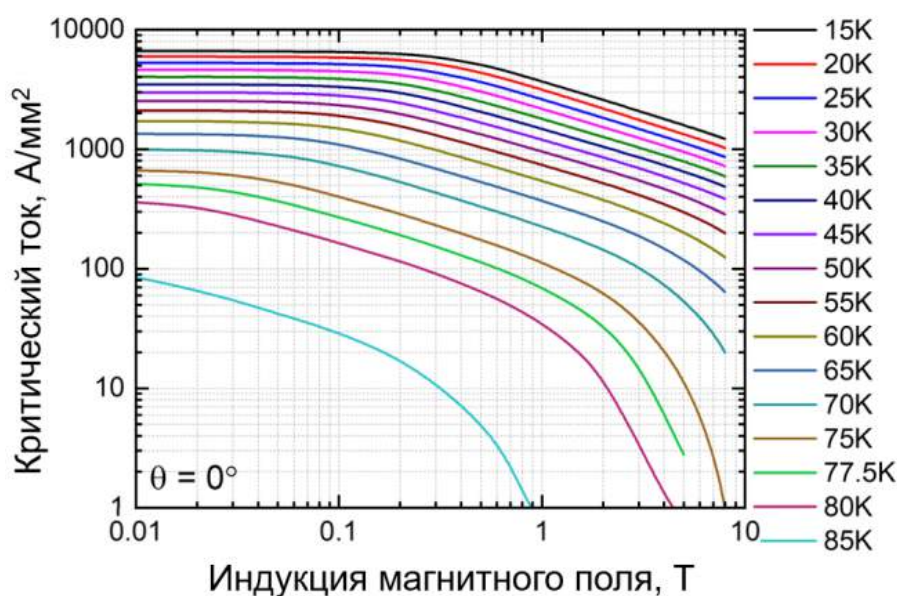


Рисунок 1. Влияние внешнего магнитного поля и температуры на критический ток в сверхпроводнике

Figure 1. Influence of the external magnetic field and temperature on the critical current in a superconductor

ния, таким образом, потребуется обеспечить плотность тока от нескольких сотен до $1000 A/mm^2$. Для обеспечения таких характеристик температура ВТСП-лент должна быть не выше 50 К, а оптимальная — 20–30 К. Именно возможность достигать плотности тока порядка $1 kA/mm^2$ позволяет существенно повысить поле в зазоре электрической машины и уменьшить её массогабаритные характеристики.

Применение высокотемпературной сверхпроводимости в электрических машинах

В общем случае, крутящий момент электродвигателя, а также мощность при фиксированной частоте вращения, зависят от произведения трёх параметров: линейной нагрузки статора, магнитной индукции и габаритов активной части (квадрата диаметра ротора, умноженного на линейную длину статора машины) [4]. Увеличить линейную нагрузку статора можно, заменив обмотку переменного тока на ВТСП. Повысить магнитную индукцию позволит замена обмотки воз-

буждения постоянного тока на ВТСП. Очевидно, что при этом наибольшей удельной мощностью (кВт/кг) будут обладать полностью ВТСП электрические машины, в которых обмотки возбуждения и якоря выполнены из ВТСП.

Несмотря на то, что криогенное охлаждение статорной обмотки кажется более простой задачей по сравнению с охлаждением вращающейся обмотки ротора, технологии ВТСП-катушек и криостатов для обмотки переменного тока на сегодняшний день имеют ряд сложно устранимых ограничений, которые будут подробнее описаны ниже. С использованием имеющихся на сегодняшний день технологий существенное повышение линейной нагрузки статора за счет использования ВТСП неминуемо приводит к возрастанию тепловой нагрузки на криогенную систему, и, соответственно, росту её массогабаритных характеристик.

В сверхпроводниках II-го рода, в том числе и в ВТСП, магнитное поле проникает в толщу материала в виде вихревых токов. В результате сверхпроводник

«намагничивается» внешним полем. В переменном магнитном поле возникают гистерезисные потери, которые существенно влияют на эффективность ВТСП-машин. Начиная с индукции магнитного поля по нормали к ленте более 0,1 Тл, гистерезисные потери становятся значительными и экспоненциально растут с увеличением поля. При значениях более 0,3 Тл гистерезисные потери критичны для охлаждения азотом [5]. С точки зрения обеспечения работоспособности ВТСП-обмоток якоря необходимо стремиться к тому, чтобы ВТСП-ленты были расположены параллельно силовым линиям магнитного поля, как показано на рисунке 2 [6]. При этом для обеспечения заданной температуры обмоток должна быть использована эффективная система охлаждения.

Ещё одна сложность при создании ВТСП-статора – несовершенство технологии криостата. Обычно для изготовле-

ния его стенок применяют нержавеющую сталь, а в качестве теплоизолятора используют вакуум. Однако при таком методе переменные магнитные поля вызывают десятки киловатт нагрева из-за наведённых токов, что не подходит для ВТСП-электродвигателей.

Чтобы решить эту проблему, требуется изготовить холодную ёмкость из композитного материала. Для создания вакуумной теплоизоляции важно сохранить герметичность соединения композитных стенок с металлическими элементами при термоциклировании до криогенных температур, что сложно обеспечить из-за разности коэффициентов теплового расширения и охрупчивания связующего при низких температурах. Альтернативой может стать композитный невакуумный криостат со стенками из того же материала, но с использованием аэрогеля или пенопласта в качестве теплоизоляции. Однако у этих материа-

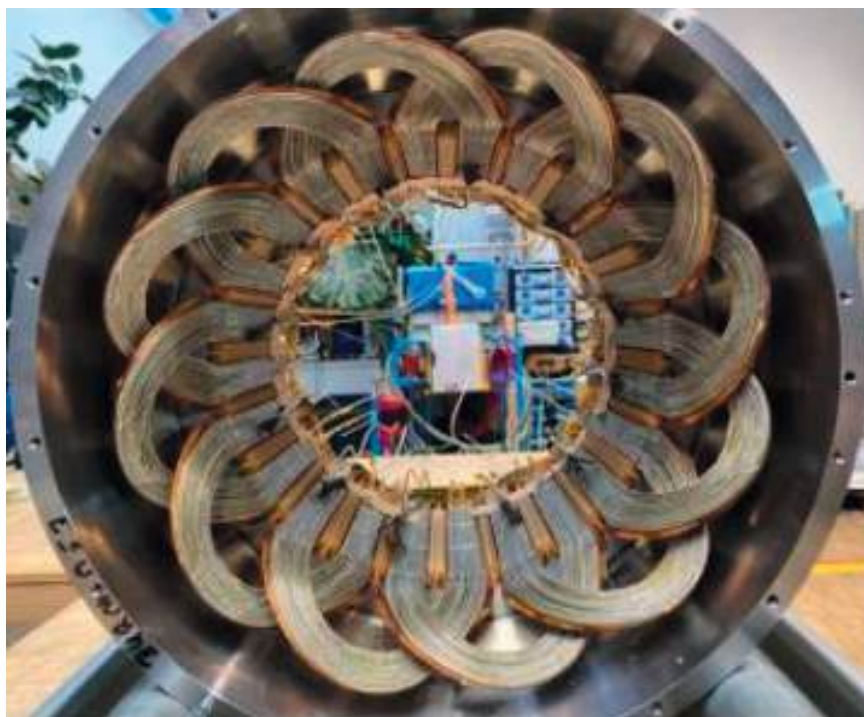


Рисунок 2. Статор ВТСП-электродвигателя из проекта Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator (ASuMED)

Figure 2. Stator of HTS electric motor from the Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator (ASuMED) project

лов теплоизолирующие свойства хуже, чем у вакуума, поэтому закладывают дополнительную холодильную мощность на низкое качество теплоизоляции. Кроме того, все композитные криостаты обычно имеют практически неразборную конструкцию, что обуславливает низкую ремонтпригодность двигателя.

В 2016 году исследования по созданию системы электродвижения на основе ВТСП-технологий профинансировал Фонд перспективных исследований. По его заказу российская инновационная компания ЗАО «СуперОкс» реализовала проект «Контур». В рамках этого проекта совместно с ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова» и ФАУ «СибНИА имени С.А. Чаплыгина» был разработан и испытан электродвигатель со статорной ВТСП-обмоткой (рисунок 3) на основе ВТСП-лент II поколения отечественного производства компании ООО «С-Инновации». Кроме того, была разработана инженерная методика предварительной оценки технических характеристик гибридной силовой установки, спроектированной с использованием ВТСП. Указанная инженерная методика обеспечивала проведение расчета региональ-

ного самолета с гибридной или полностью электрической силовой установкой, а также, в ее дальнейшем развитии в ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского», экспериментальных расчетов для средне- и дальнемагистральных самолетов, беспилотных авиационных систем, вертолетов и прочих летательных аппаратов.

Основные проблемы, связанные с технологиями изготовления обмоток и композитного криостата, в проекте «Контур» были решены. Однако на производительность демонстратора системы в целом негативно сказались потери от воздействия переменных магнитных полей. При мощности ВТСП-электродвигателя 0,5 МВт, массе 200 кг, скорости вращения 2800 мин^{-1} и КПД 98 %, гистерезисные потери в ВТСП составили около 2 кВт. Компенсация указанных потерь при работе двигателя достигалась за счет большого расхода жидкого азота [7]. Теплоприток через криостат и токовводы для статорной ВТСП-обмотки при этом составляет не менее 1 кВт. Также следует учесть потери от 0,5 до 1 кВт в криогенной системе, которая обеспечивает циркуляцию. Таким образом, общие кри-

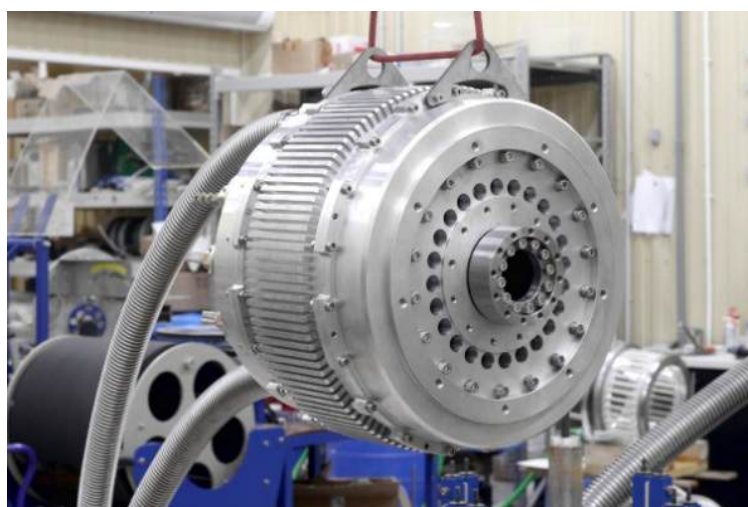


Рисунок 3. ВТСП-электродвигатель российской компании ЗАО «СуперОкс»

Figure 3. HTS electric motor by the Russian company SuperOx

огенные потери составляют 4 кВт, то есть тепловыделения в криогенном объёме создают потребность в тяжёлой криогенной системе. Зачастую это нивелирует преимущества ВТСП-решения в плане массогабаритных характеристик и эффективности. Однако в случае применения конструктивных решений, описанных в данной статье, можно достичь существенного снижения криогенных потерь в системе.

Применение ВТСП в катушках обмотки возбуждения способствует увеличению магнитной индукции внутри устройства в 1,5–2 раза. При увеличении поля в воздушном зазоре зубцы магнитопровода становятся перенасыщенными по индукции и перестают работать. Следовательно, от них можно отказаться, заложив в статорную обмотку примерно вдвое больше медных проводников. Таким образом, линейная нагрузка статора также вырастает в 2 раза и мощность, соответственно, в 3–4 раза (рисунок 4) [8].

Кроме того, электродвигатель с ВТСП-обмоткой возбуждения, учитывая отсутствие зубцов, имеет ряд преимуществ: низкое реактивное сопротивление, высокая устойчивость к перегрузкам и снижение гармонических искажений тока. Так как ВТСП-обмотка функционирует в

постоянном магнитном поле, потери в ней практически отсутствуют. Также возможно использование вращающихся металлических вакуумных криостатов. Это позволит достичь низкого теплопритока в криостат и применить криогенную систему замкнутого цикла более компактного размера. В результате снизится масса всей системы. Одно из главных достоинств ВТСП-обмотки возбуждения заключается в том, что она позволяет использовать основное преимущество сверхпроводника — высокую плотность тока без омического нагрева.

Отечественные и зарубежные проекты электродвижения с применением высокотемпературной сверхпроводимости

В качестве примеров использования ВТСП в проектах электрических силовых установок можно привести проект сверхпроводящего криогенного экспериментального прототипа силовой установки Advanced Superconducting and Cryogenic Experimental powertrain Demonstrator (ASCEND), запущенный в 2021–2022 годах в подразделении UpNext французского Airbus [6]. Хладагентом в данном прототипе выступает жидкий азот, мощность электродвига-

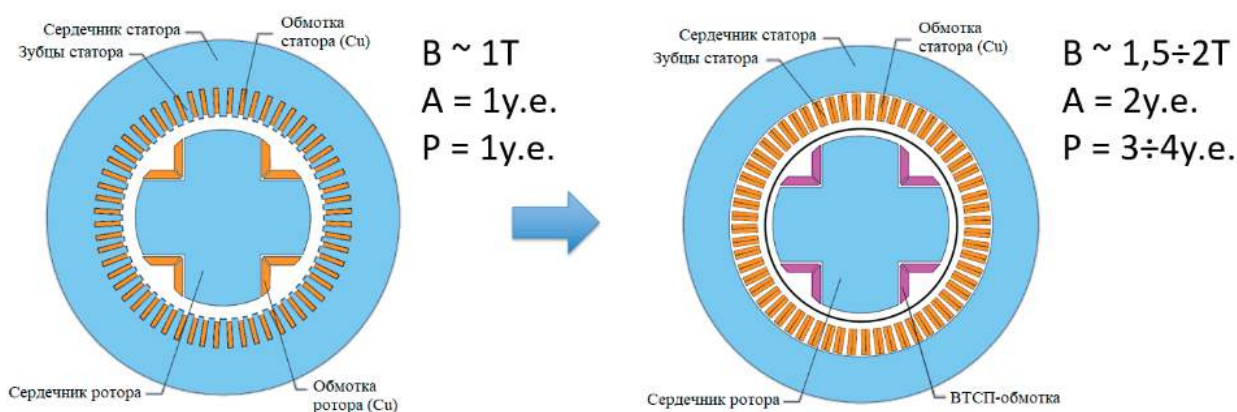


Рисунок 4. Применение ВТСП для обмотки возбуждения электрической машины

Figure 4. Application of HTS for the excitation winding of an electric machine

теля со статорной ВТСП-обмоткой составляет 0,5 МВт, а удельная мощность — порядка 5 кВт/кг при 5000 мин⁻¹ и КПД 99,3 %.

В 2024 году результаты этой работы нашли логичное продолжение в проекте под наименованием Cryoprop, когда Airbus UpNext объявили о подписании соглашения на совместную разработку с подразделением Energy Systems & Solutions японской корпорации Toshiba (далее — Toshiba ESS), которая уже имеет опыт в создании ВТСП-двигателей: в 2022 году они разработали прототип компактного 2 МВт ВТСП-электродвигателя весом 200 кг при наружном диаметре всего 50 см и длине 70 см без учета вала [9]. Вместе две команды планируют найти способ интегрировать использование жидкого водорода в качестве хладагента для ВТСП-компонентов силовой установки в систему Cryoprop с учетом разработок Toshiba ESS. Кроме того, в данной силовой установке водород будет поступать в топливные элементы для выработки электричества, заряжающего аккумуляторы или напрямую вращающего электродвигатели. Концепт совместного проекта представлен на рисунке 5. На 2027 год Airbus UpNext и Toshiba ESS запланировали наземные испытания, на

2028 год — лётные, с 2030 года планируют начать производство [10].

Во Франции помимо Airbus активно развивает ВТСП компания Safran. С 2019 года был разработан ряд прототипов [11]: RESUM (REalisation of a Superconducting Motor), FROST (Flux-barrier Rotating Superconducting Topology) и SCRYPT (Cryogenic copper armature for the 50 kW Prototype). В первых двух проектах использовались ротор со вставками из объемной сверхпроводниковой керамики и стек кольцевых ВТСП-катушек (в RESUM из ВТСП-проводов I-го поколения, в FROST — II-го поколения) в криостате для создания поля возбуждения (рисунок 6). Ротор за счет диамагнитных свойств сверхпроводниковой керамики модулирует внешнее магнитное поле, создаваемое набором внешних кольцевых катушек, что позволяет контролировать возбуждение только стационарной обмоткой, без подвода тока к вращающемуся криостату, но масса ВТСП-катушек получилась довольно большой ($\approx 50\%$ массы всей машины в сборе). Таким образом, ротор за счет суперпозиции постоянного магнитного поля стека катушек и собственного поля диамагнитных вставок формирует полюса, которые впоследствии притяги-

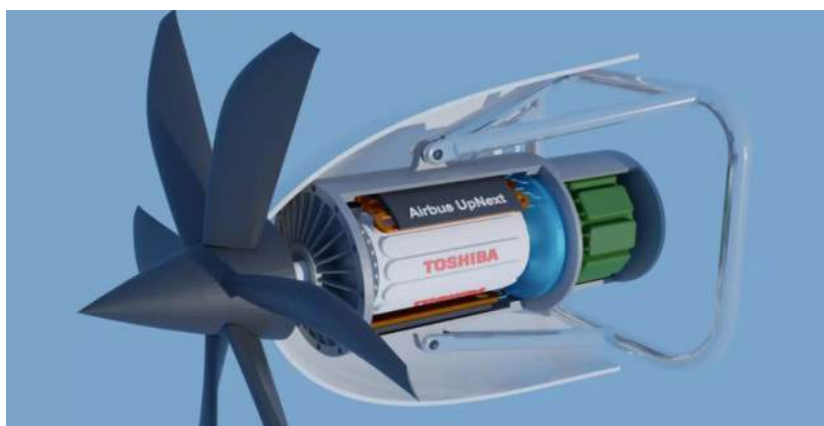


Рисунок 5. Концепт ВТСП-электродвигателя компаний Airbus и Toshiba

Figure 5. Concept of HTS electric motor by Airbus and Toshiba

ваются полем статора. Обмотку переменного тока статора при этом использовали медную с жидкостным (масляным или криогенным) охлаждением. В проекте FROST была получена удельная мощность 2,1 кВт/кг и КПД 95,3 % с перспективой увеличения до 8 кВт/кг и 96,4 %. При текущем исполнении показатели удельных характеристик и эффективности не превосходят аналогичные машины без применения ВТСП, однако при использовании ВТСП для обмотки статора прогнозируется эффективность 99 %.

В США разработкой систем электродвижения с применением ВТСП занимается, например, корпорация Raytheon Technologies Corporation (RTX). В её подразделении Collins Aerospace в рамках совместного проекта SOARING с агентством Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) разрабатывается полностью ВТСП-электродвигатель с мощностью 3 МВт и удельной мощностью более 40 кВт/кг при охлаждении до температуры 20 К (рисунок 7). Кроме того, в рамках SOARING разрабатывается силовой инвертор с удельной мощно-

стью более 50 кВт/кг при охлаждении до 77 К [12]. Уровень готовности этих технологий на уровне 6 ожидается после 2027 года.

В последние годы в Новой Зеландии, благодаря государственной программе по развитию передовых энергетических технологий (АЕТР), активно развиваются, в том числе, и ВТСП-технологии для электродвижения. К 2023 году на базе Исследовательского института Робинсона Веллингтонского университета Виктории (далее — VUW-RRI) был разработан и собран прототип ВТСП униполярного мотор-генератора переменного тока (рисунок 8, а), а также спроектирован концепт ВТСП синхронного электродвигателя (рисунок 8, б) для последовательной схемы авиационной гибридной силовой установки [13]. Мощность генератора составляет 22 кВт при 30000 мин⁻¹ и 20 К, а предполагаемая мощность электродвигателя — 100 кВт при 4500 мин⁻¹ и той же температуре. Обе электрические машины разработаны как первая ступень для проектирования полномасштабного демонстратора мощностью 3 МВт с ВТСП-обмотками как

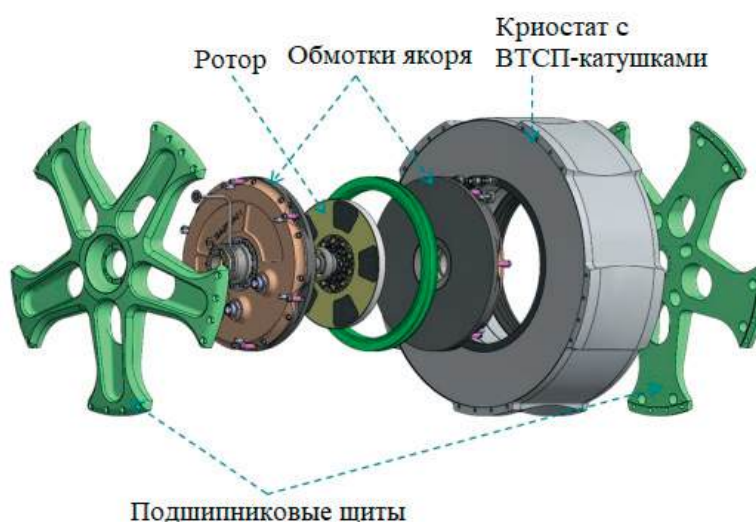


Рисунок 6. Схема ВТСП-электродвигателя французской компании Safran

Figure 6. Scheme of HTS electric motor by the French company Safran

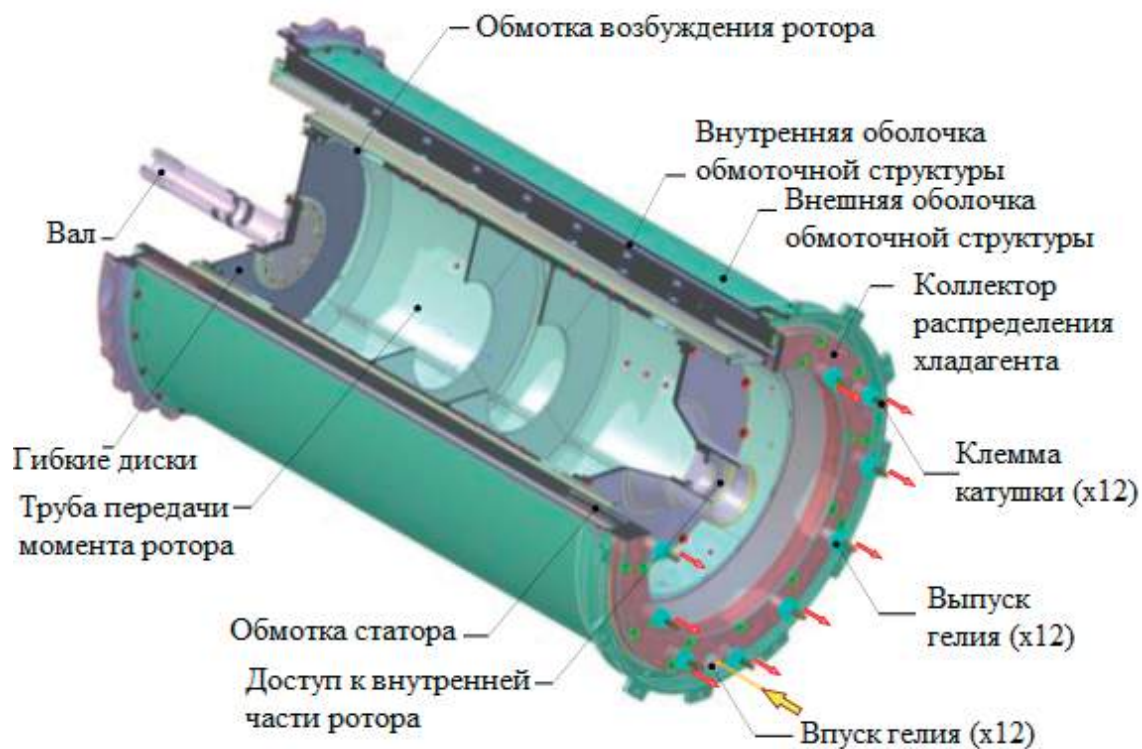
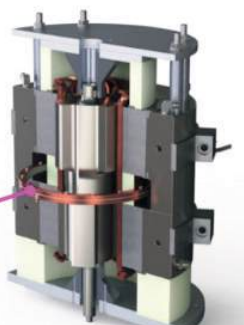


Рисунок 7. Схема ВТСП-электродвигателя американской компании RTX

Figure 7. Scheme of HTS electric motor by the US company RTX



a)



b)

a) прототип генератора; b) концепт электродвигателя

a) generator prototype; b) electric motor concept

Рисунок 8. ВТСП-проекты новозеландского VUW-RRI

Figure 8. HTS projects by the VUW- RRI (New Zealand)

ротора, так и статора (на данный момент обмотка из ВТСП-лент II-го поколения применяется только на роторе).

Активное развитие ВТСП-машин ведется и для применения в системах электродвижения кораблей. Известен проект ВТСП-электродвигателя от японской компании Kawasaki, представленный на рисунке 9 [14]. Прототип разра-

ботали еще в 2010 году, мощность этого двигателя с ВТСП-обмоткой ротора составляет 3 МВт при частоте вращения 160 мин^{-1} и охлаждении гелием до 30 К. При изготовлении обмотки использовали ВТСП-провод I-го поколения японской компании Sumitomo Electric Industries.

В России помимо компании «СуперОкс» прикладной сверхпроводимостью занимаются в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) (МАИ). Специалисты МАИ разработали фундаментальные принципы расчёта и определили основные подходы к созданию энергетических систем на основе ВТСП-технологий. Один из последних проектов МАИ — демонстратор ВТСП-системы с генератором, у которого обмотка якоря сделана из ВТСП-лент

II-го поколения компании «С-Инновации», способным выдавать мощность 90 кВт при частоте вращения 6000 мин⁻¹ и температуре кипения жидкого азота [15]. 3D-модель этой машины представлена на рисунке 10. Реализация этого проекта позволила не только освоить технологии создания компонентов системы: ВТСП-генератора, ВТСП-кабеля, криогенной системы и преобразовательной техники с криогенным охлаждением, но и изучить особенности их совместного функционирования.



Рисунок 9. ВТСП-электродвигатель японской компании Kawasaki

Figure 9. HTS electric motor by the Japanese company Kawasaki

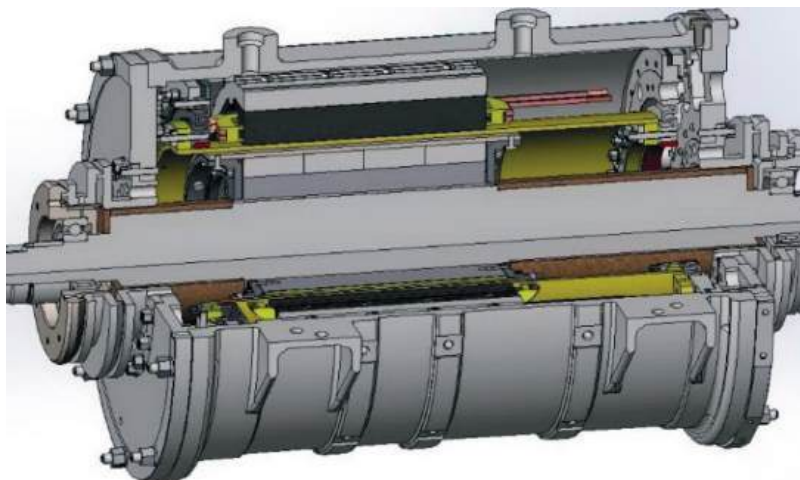


Рисунок 10. 3D-модель ВТСП-генератора МАИ

Figure 10. 3D model of HTS generator by Moscow Aviation Institute (National Research University)

Заключение

Внедрение ВТСП в обмотку переменного тока сопряжено с определёнными трудностями и, вероятно, потребует значительного количества энергии для охлаждения от криогенной системы. Более перспективным представляется использование ВТСП для обмотки возбуждения, так как в криогенном контуре отсутствуют прямые источники тепла, а также нет ограничений на увеличение индукции магнитного поля в зазоре электрической машины.

Тем не менее, в реализованных проектах по разработке электрических машин с использованием ВТСП результаты получаются сравнимыми по характеристикам с традиционными [16]. В большинстве случаев разработчики не учитывают массогабаритные характеристики криосистемы и вопросы надёжности, связанные с ней. Это, конечно, определяется тем, что в основном реализуются исследовательские и пилотные проекты, а многие технологии ещё не совершенны. Но в то же время традиционные электрические машины, разработанные с акцентом на снижение массогабаритных характеристик, уже достигают удельной мощности порядка 5 кВт/кг, а рекордные — до 17 кВт/кг (хотя и с рядом ограничений) [17].

Выводы

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что драйверами для внедрения ВТСП-машин могут быть:

- отсутствие необходимости в установке дополнительного криогенного оборудования. Например, при перекачке

криогенных жидкостей или в транспортных средствах с криогенным топливом;

- невозможность получения компактных массогабаритных характеристик электрических машин даже при условии использования продвинутых традиционных технологий. Например, в ветрогенераторах или судовых двигателях;

- меньшая стоимость ВТСП-решений в изготовлении и эксплуатации. Например, в генераторах на электростанциях или в приводах дробилок, то есть в крупных электрических машинах мощностью более 10 МВт, где невозможно обеспечить высокую плотность тока в обмотке возбуждения из-за ограничений системы охлаждения. В таких машинах, даже без учёта улучшения массогабаритных характеристик и повышения эффективности, только стоимость медной обмотки может быть сравнима со стоимостью ВТСП-системы.

Для того, чтобы внедрение ВТСП-машин в этих областях было оправдано, необходимо подкрепить данное предположение инженерными и экономическими расчетами. Для этого необходимо произвести оценку массогабаритных характеристик и стоимости как отдельных компонентов, так и всей системы в целом. Кроме того, решение задач по созданию инновационных видов транспорта (гибридных и полностью электрических, включая водородные и сверхпроводниковые технологии) также требует развития программно-аппаратной базы расчета технических характеристик перспективных силовых установок, которыми будут комплектоваться создаваемые транспортные системы.

Список источников

1. Кацман М. Электрические машины. Справочник. М.: Кнорус, 2023. 480 с. ISBN 978-5-406-11275-5.
2. Matias V., Moeckly B. Price of 2G HTS Wire: Plenty of Room to Go down [Electronic Resource] // 2020 Snowmass Letter of Interest.

2020. August, 30. URL: https://snowmass21.org/docs/files/summaries/AF/SNOWMASS21-AF7_AF0_Vladimir_Matias-251.pdf.

3. Figshare: научный онлайн-репозиторий. URL: https://figshare.com/articles/dataset/Critical_current_characterisation_of_SuperOx_YBCO_2G_

HTS_superconducting_wire/13708690/1 (дата обращения: 13.12.2024).

4. Reis T., deWaele A.T.A.M., Oswald J., Oswald B., Berberich E. Cryogenic Challenges for Different Superconductive Motor Topologies // 2nd International Workshop on Cooling Systems for HTS Applications, Karlsruhe, Germany, September 13-15, 2017. 2017.

5. Калитка В., Васильков Н.Д. Высоко-температурные сверхпроводники для вращающихся машин // Энергетика будущего: сб. матер. Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию проф. Ф.Р. Исмагилова, 30 октября – 1 ноября 2024. Уфа, 2024. С. 109-115. <https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2024/197.pdf>.

6. Ybanez L., Colle A., Nilsson E., Berg F., Galla G., Tassisto M., Rivenc J., Kapau F., Steiner G. ASCEND: The First Step towards Cryogenic Electric Propulsion // EFATS – Emissions Free Air Transport through Superconductivity Conference, June 9-10, virtual). URL: file:///C:/Users/User/Downloads/ASCEND_The_first_step_towards_cryogenic_electric_p.pdf. DOI: 10.1088/1757-899X/1241/1/012034.

7. Kalitka V. Development of 500 kW Superconducting Motor and Its Test on Flying Laboratory // EUCAS 2021 – 15th European Conference on Applied Superconductivity, September 12-17, virtual. 2021.

8. Wolfgang N. HTS Rotating Machines. Siemens AG, Corporate Technology, Power & Sensor Systems – European Summer School, Pori, Finland. June, 2008.

9. Toshiba: официальный сайт. URL: <https://www.global.toshiba/ww/news/energy/2022/06/news-20220623-01.html> (дата обращения 13.12.2024).

10. Nilsson E. Cryogenic and Superconductivity Development for Future Electric Aircraft Propulsion at Airbus // EFATS 2024 – 4th International Workshop on Emissions Free Air Transport through Superconductivity, October 16-17, University of Twente, Enschede, The Netherlands. 2024.

11. Dorget R., Gning P., Dirahoui W. et al. Superconducting Flux Modulation Machine for Aircraft Applications // MEA 2024 – More Electric Aircraft, February 7-8, Toulouse, France. 2024.

12. Murphy A. Electrification and Sustainability // Bulletin Aerospace Europe. 2024. No. 3. P. 14-16.

13. Badrock R. A., Caughley A., Heffernan B. et al. Performance of a High Speed Superconducting Synchronous Machine // EFATS 2023 – 3rd International Workshop on Emissions Free Air

Transport through Superconductivity, October 4-5, Bristol, UK. 2023.

14. Yamamoto T., Izumi M., Umemoto K. et al. Load Test of 3-MW HTS Motor for Ship Propulsion // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. Vol. 27, No. 8.

15. Ivanov N., Zhuravlev S., Zanegin S. et al. Calculation, Design, and Winding Preliminary Tests of 90-kW HTS Machine for Small-Scale Demonstrator of Generating System for Future Aircraft with Hybrid Propulsion System // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2023. Vol. 33, No. 2. DOI: 10.1109/TASC.2022.3228704.

16. Ковалев К., Иванов Н., Кадеров В., Малевич Н. ВТСП электрические машины: актуальные проекты и перспективные области применения HTS Electric Machines: Current Projects and Promising Application Fields // Электричество. 2023. № 8. С. 4-12. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-8-4-12>.

17. Иванов Н.С., Журавлев С.В., Харькина О.А., Здорова М.В., Широков А.А., Ахунов М.Т., Сосова Д.Д. Электрические машины с высоким показателем удельной мощности // Электротехника. 2022. Vol. 93, No. 10. P. 621-630.

References

1. Katsman M. *Elektricheskie mashiny. Spravochnik* [Electric Machines. Reference Book]. Moscow, Knorus, 2023. 480 p. ISBN 978-5-406-11275-5. [in Russian].

2. Matias V., Moeckly B. Price of 2G HTS Wire: Plenty of Room to Go down [Electronic Resource]. 2020 *Snowmass Letter of Interest*, 2020, August 30. URL: https://snowmass21.org/docs/files/summaries/AF/SNOWMASS21-AF7_AF0_Vladimir_Matias-251.pdf.

3. *Figshare: nauchnyi onlain-repozitarii* [Figshare: Scientific Online Repository]. URL: https://figshare.com/articles/dataset/Critical_current_characterisation_of_SuperOx_YBCO_2G-HTS_superconducting_wire/13708690/1 (accessed 13.12.2024). [in Russian].

4. Reis T., deWaele A.T.A.M., Oswald J., Oswald B., Berberich E. Cryogenic Challenges for Different Superconductive Motor Topologies. 2nd *International Workshop on Cooling Systems for HTS Applications, Karlsruhe, Germany, September 13-15, 2017*. 2017.

5. Kalitka V., Vasil'kov N.D. Vysokotemperaturnye sverkhprovodniki dlya vrashchayushchikhsya mashin [High-Temperature Superconductors for Rotating Machines]. *Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energetika budushchego», posvyashchennoi*

80-letiyu prof. F.R. Ismagilova, 30 oktyabrya – 1 noyabrya 2024 [Collection of Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Energy of the Future», Dedicated to the 80th Anniversary of prof. F.R. Ismagilov, October 30 – November 1, 2024]. Ufa, 2024, pp. 109-115. <https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2024/197.pdf>. [in Russian].

6. Ybanez L., Colle A., Nilsson E., Berg F., Galla G., Tassisto M., Rivenc J., Kapaun F., Steiner G. ASCEND: The First Step towards Cryogenic Electric Propulsion. EFATS – Emissions Free Air Transport through Superconductivity Conference, June 9-10, virtual. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/ASCEND_The_first_step_towards_cryogenic_electric_p.pdf. DOI: 10.1088/1757-899X/1241/1/012034.

7. Kalitka V. Development of 500 kW Superconducting Motor and Its Test on Flying Laboratory. EUCAS 2021 – 15th European Conference on Applied Superconductivity, September 12-17, virtual. 2021.

8. Wolfgang N. HTS Rotating Machines. Siemens AG, Corporate Technology, Power & Sensor Systems – European Summer School, Pori, Finland. June, 2008.

9. Toshiba: official site. URL: <https://www.global.toshiba/ww/news/energy/2022/06/news-20220623-01.html> (accessed 13.12.2024).

10. Nilsson E. Cryogenic and Superconductivity Development for Future Electric Aircraft Propulsion at Airbus. EFATS 2024 – 4th International Workshop on Emissions Free Air Transport through Superconductivity, October 16-17, University of Twente, Enschede, The Netherlands. 2024.

11. Dorget R., Gning P., Dirahoui W. et al. Superconducting Flux Modulation Machine for

Aircraft Applications. MEA 2024 – More Electric Aircraft, February 7-8, Toulouse, France. 2024.

12. Murphy A. Electrification and Sustainability. Bulletin Aerospace Europe, 2024, No. 3, pp. 14-16.

13. Badrock R.A., Caughley A., Heffernan B. et al. Performance of a High Speed Superconducting Synchronous Machine. EFATS 2023 – 3rd International Workshop on Emissions Free Air Transport through Superconductivity, October 4-5, Bristol, UK. 2023.

14. Yamamoto T., Izumi M., Umemoto K. et al. Load Test of 3-MW HTS Motor for Ship Propulsion. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017, Vol. 27, No. 8.

15. Ivanov N., Zhuravlev S., Zanezin S. et al. Calculation, Design, and Winding Preliminary Tests of 90-kW HTS Machine for Small-Scale Demonstrator of Generating System for Future Aircraft with Hybrid Propulsion System. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, Vol. 33, No. 2. DOI: 10.1109/TASC.2022.3228704.

16. Kovalev K., Ivanov N., Kaderov V., Malevich N. VTSP elektricheskie mashiny: aktual'nye proekty i perspektivnye oblasti primeneniya [HTS Electric Machines: Current Projects and Promising Application Fields]. Elektrichestvo – Electricity, 2023, No. 8, pp. 4-12. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-8-4-12>. [in Russian].

17. Ivanov N.S., Zhuravlev S.V., Khar'kina O.A., Zdorova M.V., Shirokov A.A., Akhunov M.T., Sosova D.D. Elektricheskie mashiny s vysokim pokazatelem udel'noi moshchnosti [Electric Machines with High Specific Power]. Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering, 2022, Vol. 93, No. 10, pp. 621-630. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 13.01.2025; одобрена после рецензирования 03.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 13.01.2025; approved after reviewing 03.02.2025; accepted for publication 11.02.2025.

Научная статья

УДК 62.50

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-41-50

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ПЕРЕВОДА НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН В ПЕРЕРЫВИСТЫЕ РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Евгений Игоревич Попов**Evgeniy I. Popov**аспирант кафедры кибернетических систем,
Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия*

Актуальность

Перевод нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации сопряжен со снижением надежности отдельных компонентов установок центробежных электронасосов, поскольку кратковременные периоды откачки нефти с точки зрения электропривода погружного насоса являются динамическими режимами, сопровождаемыми значительными пусковыми токами, повышенной вибрацией и возникновением механических резонансов в отдельных элементах установки. Оптимизация динамических режимов внутри самой подсистемы электропривода возможна применением различных замкнутых систем управления с обратной связью по угловой скорости ротора и моменту сопротивления на валу. Традиционные компоновки установок центробежных электронасосов со скалярными системами управления не позволяют в полной мере решить проблему управления погружным оборудованием, не снижая его надежности. В связи с этим задача синтеза замкнутых бездатчиковых систем управления электроприводом погружного насоса, учитывающих специфику технологического процесса добычи нефти в прерывистых режимах эксплуатации, является актуальной.

Цель исследования

Совершенствование систем управления электроприводом установок центробежных электронасосов в условиях перевода скважины в режимы прерывистой эксплуатации.

Методы исследования

В работе использованы методы системного анализа, методы теории управления электроприводами, методы синтеза систем автоматизированного управления технологическими процессами.

Результаты

Предложен подход к построению замкнутых систем управления электроприводами погружных центробежных электронасосов с итеративно обучающимися наблюдателями состояния с учетом специфи-

Ключевые слова

автоматизированная система управления технологическим процессом, установки центробежных электронасосов, системы управления электроприводов, прерывистый режим эксплуатации скважины, наблюдатель состояния

ки технологического процесса добычи нефти в условиях перевода скважины в прерывистые режимы эксплуатации.

Для цитирования: Попов Е. И. О совершенствовании систем управления электроприводом погружных установок в условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 41-50. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-41-50>.

Original article

ABOUT AN IMPROVING ESP ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS IN CONDITIONS OF OIL WELL CONVERSION TO PERIODIC OPERATING MODES

Relevance

The transfer of oil wells to intermittent operating modes is associated with a decrease in the reliability of individual components of centrifugal electric pump installations, since short periods of oil pumping, from the point of view of the electric drive of the submersible pump, are dynamic modes accompanied by significant starting currents, increased vibration and the occurrence of mechanical resonances in individual elements of the installation. Optimization of dynamic modes within the electric drive subsystem itself is possible using various closed control systems with feedback on angular velocity and the moment of resistance on the shaft. Traditional configurations of centrifugal electric pump units with scalar control systems do not allow to fully solve the problem of submersible equipment reliability management. In this regard, the task of synthesizing closed sensorless control systems for the electric drive of a submersible pump, taking into account the specifics of the technological process of oil production in intermittent operating modes, is relevant.

Aim of research

Improving control systems for electric drives of centrifugal electric pumps in conditions of well conversion to intermittent operation modes.

Research methods

The work used methods of system analysis, methods of electric drive control systems, and methods of synthesis of automated process control systems.

Results

An approach to constructing closed-loop control systems for electric drives of submersible centrifugal electric pumps with iteratively learning state observers is proposed, taking into account the specifics of the technological process of oil production under conditions of well transfer to intermittent operating modes.

Keywords

automated process control system, centrifugal electric pump installations, electric drive control systems, periodic well operation mode, state observer

For citation: Popov E. I. O sovershenstvovanii sistem upravleniya elektroprivodom pogruzhnykh ustanovok v usloviyakh perevoda neftyanykh skvazhin v preryvistyye rezhimy ekspluatatsii [About an Improving ESP Electric Drive Control Systems in Conditions of Oil Well Conversion to Periodic Operating Modes]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 41-50 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-41-50>.

Введение

Установки погружных центробежных электронасосов (УЭЦН) являются подсистемой нижнего уровня автоматизированной системы управления технологи-

ческим процессом (АСУ ТП) добычи нефти, оборудованной исполнительными механизмами, комплексом измерительных средств и каналов связи, а также локальной системой управления, роль

которой выполняет станция управления. Комплекс измерительных средств представляет собой блок погружной телеметрии, выполняющий измерения гидродинамических показателей, таких как давление, расход, динамический уровень [1]. Однако в типовой компоновке УЭЦН отсутствуют блоки для измерения угловой скорости ротора, момента сопротивления на валу, потокоцепления ротора в связи с рядом экономических и технических причин. В режимах непрерывной эксплуатации для управления погружным насосом применяются разомкнутые скалярные системы электропривода, которых достаточно для поддержания заданного дебита путем регулирования частоты вращения ротора погружного электродвигателя (ПЭД) [2, 3], и, следовательно, отсутствует необходимость в установке датчиков электромеханических параметров электропривода.

При снижении коэффициента продуктивности и дебита скважины рациональным является переход в прерывистые режимы эксплуатации с двухпозиционными законами регулирования: работа насоса в периоды откачки жидкости и его останов в периоды накопления [4–8]. При этом установлено, что в прерывистых режимах эксплуатации снижаются межремонтный период ПЭД и надежность компонентов УЭЦН. Это связано с тем, что периоды откачки нефти в режимах прерывистой эксплуатации могут составлять менее 10 мин [6], и такие режимы уже не являются режимами плавного пуска ПЭД с ограничением бросков тока и крутящего момента, которые приводят к избыточному накоплению усталостного износа компонентов УЭЦН, в частности гидрозащиты ПЭД.

Приведенные специалистами АО «Новомет-Пермь» и Пермского политехнического университета результаты [9] показывают, что существует возможность снижения негативного влияния

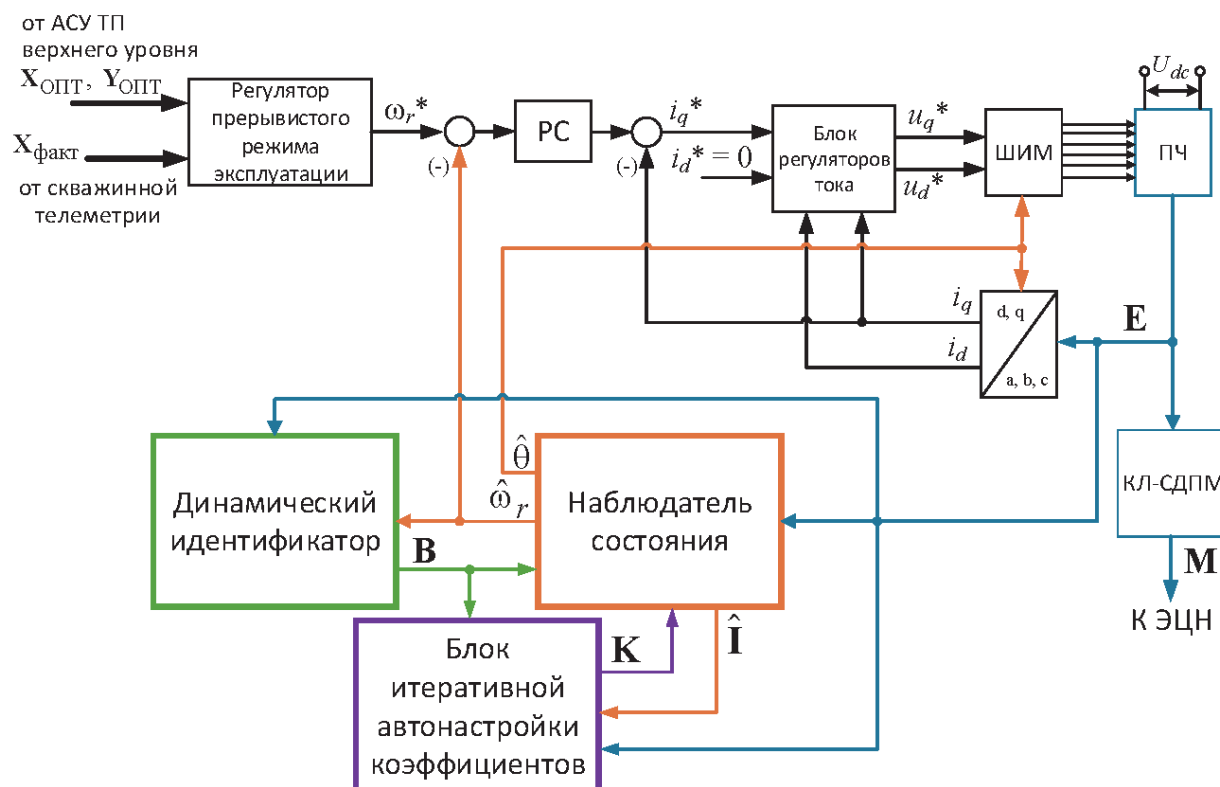
прерывистых режимов эксплуатации на ресурс элементов УЭЦН за счет совершенствования систем автоматического управления ПЭД в динамических режимах [10, 11]. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых компоновок систем управления ПЭД в составе УЭЦН, учитывающих особенности технологического процесса нефтедобычи в прерывистых режимах эксплуатации.

Векторная система регулирования ПЭД в оперативном уровне управления УЭЦН

Рассмотрим многоуровневую АСУ ТП УЭЦН, предложенную в [4]. Динамические процессы в УЭЦН в режиме откачки контролируются по измеряемым параметрам добываемой жидкости. Однако переход к режимам прерывистой эксплуатации требует решения задачи оптимизации переходных процессов внутри самой подсистемы электропривода погружного насоса с целью ограничения пусковых токов и моментов при заданном достаточно малом времени разгона. В связи с этим, более целесообразно применять бездатчиковые системы векторного управления электроприводом УЭЦН [11].

На рисунке 1 представлена структура оперативного уровня АСУ УЭЦН, включающая в себя систему бездатчикового векторного регулирования погружного синхронного двигателя с постоянными магнитами. Для простоты изложения представлен вариант компоновки без синус-фильтра и повышающего силового трансформатора.

Регулятор прерывистого режима эксплуатации (верхнего уровня) реализует двухпозиционный закон регулирования с режимами заполнения скважины и откачки жидкости. Сигнал регулятора верхнего уровня является входным для



PC — регулятор скорости; ШИМ — блок широтно-импульсной модуляции с преобразователем координат; ПЧ — преобразователь частоты; КЛ — кабельная линия; СДПМ — синхронный двигатель с постоянными магнитами

PC — speed controller; ШИМ — pulse width modulation unit with coordinate converter; ПЧ — frequency converter; КЛ — cable line; СДПМ — permanent magnet synchronous motor

Рисунок 1. Предлагаемая структура оперативного уровня управления УЭЦН с погружным СДПМ как подсистема нижнего уровня АСУ ТП

Figure 1. The proposed structure of the operational level of control of centrifugal electric pumps with a submersible permanent magnet synchronous motor as a subsystem of the lower level of the automated process control system

подсистемы векторного регулирования электропривода ПЭД [12].

В структурной схеме (рисунок 1) приняты следующие обозначения:

— $\mathbf{E} = (\mathbf{u}_{abc}^T, \mathbf{i}_{abc}^T)^T$ — вектор электрических параметров (трехфазных мгновенных значений напряжений и токов соответственно) на входе кабельной линии;

— $\mathbf{B} = (\hat{\mathbf{R}}^T, \hat{\mathbf{L}}^T, \hat{\mathbf{J}})^T$ — вектор оценок параметров математической модели нестационарной динамической системы

«кабельная линия — синхронный двигатель с постоянными магнитами» (активного сопротивления и индуктивности длинного кабеля и обмотки статора электродвигателя и эквивалентного момента инерции вала соответственно);

— $\mathbf{M} = (\omega_r, M_{эм})^T$ — вектор переменных механической подсистемы погружного электродвигателя (угловая скорость ротора и электромагнитный момент электродвигателя);

— $\mathbf{K}$ — вектор коэффициентов отработки ошибки наблюдения наблюдателя состояния;

— $\hat{\mathbf{I}}$ — вектор проекций оценок тока на оси стационарной или вращающейся системы координат.

В условиях перевода скважины в режимы прерывистой эксплуатации для погружных установок характерна сильная нестационарность параметров. Например, для ПЭД 10 кВт при периоде откачки 10 мин относительный нагрев двигателя составляет 20 %. С ростом мощности ПЭД и времени откачки относительный нагрев возрастает [13], что приводит к увеличению активного сопротивления кабельной линии и статорной обмотки на 5–20 % в зависимости от типоразмера ПЭД. Кроме того, в рабочих органах УЭЦН могут происходить засорение и подклинивание основных узлов из-за отложения солей и различных механических примесей. Таким образом, возникает комплексная задача идентификации нестационарной динамической системы «длинный питающий кабель — погружной синхронный двигатель с постоянными магнитами».

В предложенной структуре (рисунок 1) классическая схема бездатчикового векторного электропривода, замкнутого по сигналу оценки угловой скорости от наблюдателя состояния, дополнена блоками динамической (текущей) идентификации и автонастройки коэффициентов наблюдателя.

В качестве **наблюдателя состояния** предлагается использовать наблюдатель полного порядка, расширенный по вектору состояния, на основе явных математических моделей [14–16] нестационарной динамической системы «длинный питающий кабель — погружной синхронный двигатель с постоянными магнитами». Входными сигналами для наблюдателя являются мгновенные значения токов и напряжений на входе кабельной линии $\mathbf{E} = (\mathbf{u}_{abc}^T, \mathbf{i}_{abc}^T)^T$,

преобразованные в стационарную или вращающуюся систему координат. Введение дополнительных координат в математическую модель наблюдателя состояния необходимо для получения полного вектора переменных состояния механической подсистемы электропривода, включающего в себя оценку момента сопротивления на валу $(\hat{\omega}_r, \hat{M}_c, \hat{\theta})^T$.

Поскольку техническая реализация наблюдателя состояния осуществляется средствами цифрового сигнального процессора наземной станции управления, в качестве настраиваемой математической модели наблюдателя должна быть использована модель динамической системы в дискретном времени [17] в виде системы разностных уравнений. Частота дискретизации аналого-цифровых преобразователей в промышленности составляет 10–20 кГц [18], следовательно, дискретная модель должна обеспечивать по возможности меньшую потерю точностных свойств аналогового прототипа и вычислительную устойчивость разностной схемы.

Блок динамической идентификации необходим для получения вектора оценок параметров $\mathbf{B}$ в режиме реального времени на основе анализа текущей и ретроспективной информации, получаемой с сигналов электрических датчиков на входе кабельной линии. Эти измерения естественным образом оказываются зашумленными, в том числе помехами импульсного характера [19]. При этом введение априорных статистических предположений относительно распределения шумов зачастую на практике оказывается невозможными. К причинам этого можно отнести не только сильную нестационарность динамической системы вследствие особенностей технологического процесса, но и в силу

фактора технической реализации алгоритмов динамической идентификации средствами цифрового сигнального процессора наземной станции управления. Иными словами, возникает задача экономии вычислительных ресурсов микроконтроллера и доступного объема оперативной памяти. Таким образом, оценивание параметров должно вестись по малому числу наблюдений, что приводит к необходимости отказа от методов математической статистики для задач идентификации в пользу средств вычислительной математики, а также методов линейной алгебры и аналитической геометрии [20].

Блок итеративной автонастройки коэффициентов обработки невязки наблюдателя состояния предназначен для автоматического поиска коэффициентов K матрицы стабилизирующей добавки наблюдателя полного порядка. Необходимость разработки алгоритмов автоматической настройки коэффициентов наблюдателя обусловлена тем, что явные настраиваемые математические модели нестационарной динамической системы «длинный питающий кабель — погружной синхронный двигатель с постоянными магнитами» существенно нелинейны, а их параметры изменяются во времени в диапазоне до 20 %. В связи с этим, разработка универсальных методов и подходов к настройке коэффициентов наблюдателя для полного периода эксплуатации объекта не представляется возможной.

Таким образом, возникает концепция итеративно обучающегося наблюдателя для нестационарной динамической системы в режиме реального времени, итеративно обновляющего не только параметры настраиваемой математической модели, но и собственные коэффициенты обработки невязки на основе текущей и ретроспективной информации о сигналах с электрических датчи-

ков. Задача разработки методов автоматического подбора коэффициентов может быть решена как с помощью алгоритмов глобальной оптимизации [21, 22], так и методами вычислительной математики и линейной алгебры по аналогии с методами динамической (текущей или online) идентификации.

Выводы

1. Перевод скважин в прерывистые режимы эксплуатации, согласно статистическим исследованиям, приводит к снижению надежности элементов УЭЦН, что связано с повышенным накоплением усталостного износа, появлением резонансов и высокими значениями пусковых токов и моментов. Периоды от качки нефти, с точки зрения электропривода, являются динамическими режимами, что, в свою очередь, влечет за собой снижение его ресурса.

2. Для снижения влияния прерывистых режимов эксплуатации на надежность компонентов УЭЦН должна быть поставлена и решена задача оптимизации работы электропривода погружного насоса в динамических режимах с позиции программного ограничения пусковых токов и моментов ПЭД путем синтеза бездатчиковой векторной системы управления.

3. На примере электропривода с погружным синхронным двигателем с постоянными магнитами была предложена концепция самообучающегося наблюдателя состояния для оценивания угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу ПЭД с итеративно обновляемыми параметрами настраиваемой математической модели и коэффициентов обработки невязки по текущей и ретроспективной информации с датчиков электрических сигналов на входе длинного питающего кабеля.

4. Применение дополнительных блоков для динамической идентификации и

итеративной автонастройки коэффициентов наблюдателя позволяет учесть специфику технологического процесса

Список источников

1. Феофилактов С. Высокоточные системы погружной телеметрии для проведения гидродинамических исследований // Нефтегазовая вертикаль, 2011, № 11. С. 62–63. URL: <https://www.ngv.ru/upload/iblock/589/589d7b0ef1a45b7432e85a0203bc981f.pdf>. (дата обращения: 01.11.24).
2. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Электротехнологические установки для нефтедобычи. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 160 с. ISBN 978-5-8149-1990-8.
3. Станции управления Электон-05. Руководство по эксплуатации. ЦТКД 388 РЭ. Версия 18.24 для асинхронного и вентильного двигателя. Радужный: ЗАО «Электон», 2017. 169 с.
4. Тагирова К.Ф., Нугаев И.Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 2. С. 102–109. DOI: 10.17587/mau.21.102-109. EDN: MZJIYA.
5. Калафат О.С. Применение кратковременного периодического режима работы установок электроцентробежных насосов на скважинах Горшковской площади Приобского месторождения // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XVIII Междунар. симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. Томск, 7–11 апреля 2014. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. Т. 2. С. 92–94.
6. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Якимов С.Б., Клусов А.А. Учет условий эксплуатации при проектировании периодических режимов работы скважин, оборудованных УЭЦН // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013. № 6. С. 33–39. EDN: RQALCX.
7. Konopczynski M.R., Moore W.R., Hailstone J.J. ESPs and Intelligent Completions // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, 2002. DOI: 10.2118/77656-MS.
8. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Цибульский В.Р. Идентификация гидродинамической модели скважины с электроцентробежным насосом по данным контроля возмущённых режимов эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 5. С. 181–192. DOI 10.18799/24131830/2020/5/2649. EDN: YNEENI.

УЭЦН в прерывистых режимах эксплуатации как нестационарной динамической системы.

9. Лихачёва Е.А., Островский В.Г., Лыкова Н.А., Мусинский А.Н., Байдаров П.А. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2021. Т. 6, № 1. С. 54–58. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58. EDN: BYHGJK.
10. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 8. С. 220–231. DOI <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4349>. EDN: HWNEPY.
11. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 9. С. 203–215. DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4351. EDN: XDAVMM.
12. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. 298 с.
13. Уразаков К.Р., Рукин М.В., Борисов А.О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 62–71. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959. EDN: QGNHRA.
14. Нос О.В., Пудкова Т.В., Нос Н.И. Синтез наблюдателя электродвижущей силы вращения синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов с переключаемой структурой и самонастраивающимися подсистемами фильтрации и оценки углового положения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 415–423. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-415-423. EDN: IGGRVZ.
15. Володин Е.В., Осипов О.И. Наблюдатели в системах векторного управления синхронным

частотно-регулируемым приводом герметичного насоса // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3. С. 17-22. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-17-22. EDN: ZHLGMR.

16. Глазырин А.С., Попов Е.И., Копырин В.А., Попов С.С., Боловин Е.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Тимошкин В.В. Разработка наблюдателя угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу регулируемого синхронного двигателя с постоянными магнитами, питающегося через длинный кабель // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 11. С. 237–257. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4879. EDN: MMJPDY.

17. Пат. 2825800 РФ, МПК Н 02 Р 21/18, Н 02 Р 25/022. Устройство получения сигнала оценки частоты вращения ротора и сигнала оценки момента сопротивления на валу синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / А.С. Глазырин, Е.В. Боловин, С.Н. Кладиев, В.А. Копырин, В.З. Ковалев, А.А. Филипас, В.В. Тимошкин, О.В. Архипова, С.С. Попов, Е.И. Попов, И.А. Набунский, М.С. Кузнецов, И.В. Раков. 2024102836, Заявлено 06.02.2024; Оpubл. 29.08.2024.

18. Анучин А.С., Алямки Д.И., Дроздов А.В. и др. Встраиваемые высокопроизводительные цифровые системы управления. Практический курс разработки и отладки программного обеспечения сигнальных микроконтроллеров TMS320x28xxx в интегрированной среде Code Composer Studio / под общ. ред. В.Ф. Козаченко. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 270 с. ISBN: 978-5-383-00471-5.

19. Козлова Л.Е. Разработка нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН-АД: дис. ... канд. техн. наук. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. 144 с.

20. Фурсов В.А. Идентификация систем по малому числу наблюдений. Самара: Изд-во СГАУ, 2007. 81 с. ISBN 978-5-7883-0626-1.

21. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы. М.: Вузовская книга, 2013. 244 с. ISBN: 978-5-7035-2115-1.

22. Zhao Z., Zou Y., Liu P., Lai Z., Wen L., Jin Y. EIS Equivalent Circuit Model Prediction Using Interpretable Machine Learning and Parameter Identification Using Global Optimization Algorithms // *Electrochimica Acta*. 2022. Vol. 418. P. 1-15. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140350.

References

1. Feofilaktov S. Vysokotochnye sistemy pogruzhnoi telemektrii dlya provedeniya gidrodinamicheskikh issledovaniy [High-Precision Submersible Telemetry Systems for Conducting Hydrodynamic Studies]. *Neftegazovaya vertikal' — Oil and Gas Vertical*, 2011, No. 11, pp. 62-63. URL: <https://www.ngv.ru/upload/iblock/589/589d7b0ef1a45b7432e85a0203bc981f.pdf>. (accessed 01.11.24). [in Russian].

2. Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Anikin V.V. Elektrotekhnologicheskie ustanovki dlya nefteobychi [Electrotechnological Installations for Oil Production]. Omsk, Izd-vo OmGTU, 2015. 160 p. ISBN 978-5-8149-1990-8. [in Russian].

3. Stantsii upravleniya Elekton-05. Rukovodstvo po ekspluatatsii. TsTKD 388 RE. Versiya 18.24 dlya asinkhronnogo i ventil'nogo dvigatelya [Control Stations Elekton-05. Operation Manual. TsTKD 388 RE. Version 18.24 for Asynchronous and Valve Motors]. Raduzhnyi, ZAO «Elekton», 2017. 169 p. [in Russian].

4. Tagirova K.F., Nugaev I.F. Kontseptual'nye osnovy avtomatizatsii upravleniya ustanovkami elektrotsentrobezhnykh nasosov nefteobychayushchikh skvazhin [Actual Tasks of Oil-Wells Electric Submersible Pump Control Automation]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie — Mechatronics, Automation, Control*, 2020, Vol. 21, No. 2, pp. 102-109. DOI: 10.17587/mau.21.102-109. EDN: MZJIYA. [in Russian].

5. Kalafat O.S. Primenenie kratkovremennogo periodicheskogo rezhima raboty ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov na skvazhinakh Gorshkovskoi ploshchadi Priobskogo mestorozhdeniya [Application of Short-Term Periodic Operation Mode of Electric Centrifugal Pump Units in Wells of the Gorshkovskaya Area of the Priobskoye Field]. *Trudy XVIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh «Problemy geologii i osvoeniya nedr»*, Tomsk, 7–11 aprelya 2014 [Proceedings of the XVIII International Symposium Named after Academician M.A. Usov of Students and Young Scientists «Problems of Geology and Subsoil Development», Tomsk, April 7-11, 2014]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2014, Vol. 2, pp. 92–94. [in Russian].

6. Ivanovskii V.N., Sabirov A.A., Yakimov S.B., Klusov A.A. Uchet uslovii ekspluatatsii pri proektirovanii periodicheskikh rezhimov raboty skvazhin, oborudovannykh UETsN [Accounting of Operational Conditions while Designing Periodic Operational Modes of Wells, Equipped by Electric Submersible Pumping Units]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa —*

Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex, 2013, No. 6, pp. 33–39. EDN: RQALCX. [in Russian].

7. Konopczynski M.R., Moore W.R., Hailstone J.J. ESPs and Intelligent Completions. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, 2002. DOI: 10.2118/77656-MS.

8. Solov'ev I.G., Govorkov D.A., Tsiul'skii V.R. Identifikatsiya gidrodinamicheskoi modeli skvazhiny s elektrotsentrobezhnym nasosom po dannym kontrolya vozmushchennykh rezhimov ekspluatatsii [Identification of a Well Hydrodynamic Model with an Electric Submersible Pump Using the Perturbed Operation Modes Control Data]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, Vol. 331, No. 5, pp. 181–192. DOI 10.18799/24131830/2020/5/2649. EDN: YNEENI. [in Russian].

9. Likhacheva E.A., Ostrovskii V.G., Lykova N.A., Musinskii A.N., Baidarov P.A. Nadezhnost' pogruzhnykh neftyanykh nasosov pri periodicheskoi ekspluatatsii [Oil Submersible Pumps Reliability during Cyclic Operation]. *PRONEFT' Professional'no o nefti — PRONEFT. Professionals about Oil*, 2021, Vol. 6, No. 1, pp. 54–58. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58. EDN: BYHGJK. [in Russian].

10. Kladiev S.N. Obzor i kriticheskii analiz sovremennogo sostoyaniya i putei razvitiya tekhnologicheskogo protsessa dobychi nefi elektropriivodnym sposobov v preryvistykh rezhimakh ekspluatatsii malo- i srednedebitnykh skvazhin [Review and Critical Analysis of the Current State and Ways of Developing the Technological Process of Oil Production by an Electric Drive in Intermittent Modes of Operation of Low- and Medium-Rate Wells]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, Vol. 334, No. 8, pp. 220–231. DOI <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4349>. EDN: HWHEPY. [in Russian].

11. Kladiev S.N. Obzor i kriticheskii analiz sovremennogo sostoyaniya i putei sovershenstvovaniya sistem elektropitaniya i avtomaticheskogo upravleniya ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov v preryvistykh rezhimakh ekspluatatsii neftyanykh skvazhin [Review and Critical Analysis of the Current State and Ways to Improve Regulated Power Supplies and Automatic Control Systems for Electric Centrifugal Pumping Units in Intermittent Operation of Oil Wells].

Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2023, Vol. 334, No. 9, pp. 203–215. DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4351. EDN: XDAVMM. [in Russian].

12. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektropriivodami peremennogo toka* [Vector Control of AC Electric Drives]. Ivanovo, GOU VPO «Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina», 2008, 298 p. [in Russian].

13. Urazakov K.R., Rukin M.V., Borisov A.O. Modelirovanie teplovykh protsessov v pogruzhnom dvigatele elektrotsentrobezhnogo nasosa, rabotayushchego v periodicheskom rezhime [Simulation of Thermal Processes in a Submersible Motor of an Electric Centrifugal Pump Operating in a Periodic Mode]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, Vol. 334, No. 4, pp. 62–71. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959. EDN: QGNHRA. [in Russian].

14. Nos O.V., Pudkova T.V., Nos N.I. Sintez nablyudatelya elektrodvishushchei sily vrashcheniya sinkhronnogo dvigatelya s vozbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov s pereklyuchaemoi strukturoi i samonastroyayushchimisya podsistemami fil'tratsii i otsenki uglovogo polozheniya [The Sliding-Mode Observer for PMSM Field-Oriented Sensorless Control with Adaptive Filter and PLL]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki — Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, Vol. 24, No. 3, pp. 415–423. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-415-423. EDN: IGGRVZ. [in Russian].

15. Volodin E.V., Osipov O.I. Nablyudately v sistemakh vektornogo upravleniya sinkhronnym chastotno-reguliruemym privodom germetichnogo nasosa [Observers in Systems of Vector Control of a Synchronous Variable Frequency Drive Sealed Pump]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2017, No. 3, pp. 17–22. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-17-22. EDN: ZHLGNR. [in Russian].

16. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Popov S.S., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Timoshkin V.V. Razrabotka nablyudatelya uglovoi skorosti rotora i momenta soprotivleniya na valu reguliruemogo sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami, pitayushchegosya cherez dlinnyi kabel' [Development of an Observer of Rotor Angular Velocity and Resistance Moment on the Shaft of an Adjustable Permanent Magnet

Synchronous Motor Powered through Long Cable]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, Vol. 335, No. 11, pp. 237–257. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4879. EDN: MMJPDY. [in Russian].

17. Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Kladiev S.N., Kopyrin V.A., Kovalev V.Z., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Arkhipova O.V., Popov S.S., Popov E.I., Nabunskii I.A., Kuznetsov M.S., Rakov I.V. *Ustroistvo polucheniya signala otsenki chastoty vrashcheniya rotora i signala otsenki momenta soprotivleniya na valu sinkhronnogo elektrodvigatelya s postoyannymi magnitami* [Device for Receiving a Signal for Estimating the Rotor Speed and a Signal for Estimating the Torque of Resistance on the Shaft of a Synchronous Electric Motor with Permanent Magnets]. Patent RF, No. 2825800, 2024. [in Russian].

18. Anuchin A.S., Alyamkin D.I., Drozdov A.V. i dr. *Vstraivaemye vysokoproizvoditel'nye tsifrovye sistemy upravleniya. Prakticheskii kurs razrabotki i otladki programmnogo obespecheniya signal'nykh mikrokontrollerov TMS320x28xxx v integrirovannoi srede Code Composer Studio* [Practical Course in Developing and Debugging Software for TMS320x28xxx Signal Microcontrollers in the Code Composer Studio Integrated Environment]. Moscow, Izdatel'skii dom

MEI, 2010. 270 p. ISBN: 978-5-383-00471-5. [in Russian].

19. Kozlova L.E. *Razrabotka neirosetevogo nablyudatelya uglovoi skorosti rotora v elektroprivode po skheme TRN-AD: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a Neural Network Observer of the Rotor Angular Velocity in an Electric Drive Using the TRN-AM Scheme: Cand. Engin. Sci. Dis]. Tomsk, Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2016, 144 p. [in Russian].

20. Fursov V.A. *Identifikatsiya sistem po malomu chislu nablyudenii* [Identification of Systems Based on a Small Number of Observations]. Samara, Izd-vo SGAU, 2007. 81 p. ISBN 978-5-7883-0626-1. [in Russian].

21. Panteleev A.V., Metlitskaya D.V., Aleshina E.A. *Metody global'noi optimizatsii. Metaevristicheskie strategii i algoritmy* [Global Optimization Methods. Metaheuristic Strategies and Algorithms]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2013. 244 p. ISBN 978-5-7035-2115-1. [in Russian].

22. Zhao Z., Zou Y., Liu P., Lai Z., Wen L., Jin Y. EIS Equivalent Circuit Model Prediction Using Interpretable Machine Learning and Parameter Identification Using Global Optimization Algorithms. *Electrochimica Acta*, 2022, Vol. 418, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140350.

Статья поступила в редакцию 31.01.2025; одобрена после рецензирования 05.02.2025; принята к публикации 07.02.2025.

The article was submitted 31.01.2025; approved after reviewing 05.02.2025; accepted for publication 07.02.2025.

Научная статья

УДК 620.92

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-51-60

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**Билус Альфредович Хузияхметов****Bilus A. Khuziakhmetov**

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

**Богдан Алексеевич Соловьев****Bogdan A. Solov'ev**

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

**Максим Дмитриевич Иванов****Maksim D. Ivanov**

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

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

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

Актуальность

Автономные ветроэлектростанции становятся важным инструментом для обеспечения потребителей электроэнергией в зонах децентрализованного электроснабжения. Их применение позволяет не только повысить энергетическую независимость удалённых населённых пунктов, но и способствует развитию экологически чистых источников энергии, что имеет существенное значение для устойчивого развития регионов.

Цель исследования

Целью исследования является разработка компьютерной модели ветроустановки для проверки ее работоспособности при постоян-

Ключевые слова

ветроэнергетика,
ветроэнергетическая
установка,
ветроэлектростанция,
компьютерная модель,
ветрогенератор

ной скорости ветра. При разработке использованы каталожные данные ветрогенератора типа WH8-10000W.

Методы исследования

В процессе исследования использованы методы анализа и моделирования в среде Matlab Simulink, аналитический обзор патентов и опубликованных научных работ.

Результаты

В результате компьютерного моделирования определены выходные значения ветрогенератора типа WH8-10000W, проведен анализ работы преобразователя постоянного напряжения при постоянной скорости ветра, определена работоспособность модели по выходным параметрам напряжения нагрузки.

Для цитирования: Хузияхметов Б. А., Соловьев Б. А., Иванов М. Д., Хазиева Р. Т. Моделирование автономной ветроэлектростанции малой мощности // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 51-60. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-51-60>.

Original article

SIMULATION OF AN AUTONOMOUS LOW-CAPACITY WIND ELECTRIC PLANT

Relevance

Autonomous wind farms are becoming an important tool for providing consumers with electricity in areas of decentralized electricity supply. Their use allows not only to increase the energy independence of remote settlements, but also contributes to the development of environmentally friendly energy sources, which is essential for the sustainable development of regions.

Aim of research

The purpose of the study is to develop a computer model of a wind turbine to test its operability at a constant wind speed. The catalog data of the WH8-10000W type wind turbine will be used in the development.

Research methods

In the course of the research, Matlab Simulink analysis and modeling methods, patent review and existing scientific papers were used.

Results

As a result of computer modeling, the output values of the W8-10000W type wind turbine were determined, the operation of the DC voltage converter at constant wind speed was analyzed, and the model's operability was determined based on the output parameters of the load voltage.

Keywords

wind energy, wind power plant (wind turbine), wind power plant, computer model, wind generator

For citation: Khuziakmetov B. A., Solovev B. A., Ivanov M. D., Khazieva R. T. Modelirovaniye avtonomnoy vetroelektrostantsii maloy moshchnosti [Simulation of an Autonomous Low-Capacity Wind Electric Plant]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 51-60 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-51-60>.

Введение

Использование энергии в мире становится все более экологичным. Энергия ветра — это экологически чистый возобновляемый источник энергии, который может эффективно конкурировать с ископаемым топливом в качестве источ-

ника энергии на рынке электроэнергии. Для такой эффективной конкуренции затраты на производство должны быть сопоставимы с затратами на ископаемое топливо или другие источники энергии. Первоначальные капиталовложения в ветроэнергетику идут на оборудование и

вспомогательную инфраструктуру. Любые факторы, которые приводят к снижению стоимости энергии, такие как проектирование, строительство и эксплуатация турбин, являются ключевыми для повышения конкурентоспособности ветроэнергетики в качестве альтернативного источника энергии. Компьютерная модель ветряной турбины необходима для понимания поведения ветряной турбины при различных условиях работы.

Автономная система электроснабжения на основе ветроэнергетической установки

Ветроэнергетическая система способна работать независимо от сети централизованного энергоснабжения. В этих условиях ветроэнергетическая установка (ВЭУ) функционирует самостоятельно, но также есть возможность использовать ее как дублер любого другого генератора или применять в сочетании с другими энергетическими установками в качестве комбинированной системы энергоснабжения.

Структурная схема автономной ветроэлектростанции (рисунок 1) в общем случае состоит из следующих основных элементов: ветроколесо, генератор переменного тока, выпрямительно-зарядное устройство, аккумуляторная батарея, инвертор.

Моделирование ветроустановки малой мощности в среде Matlab Simulink

На этапе проектирования подобных энергетических систем целесообразно с точки зрения технико-экономических соображений применять методы компьютерного моделирования, используя программу Matlab Simulink, которая дает возможность анализировать выходные характеристики ветроустановки малой мощности [1, 2].

На рисунке 2 приводится структурная схема модели, которая состоит из блока ветротурбины, механического привода и блока генератора.



Рисунок 1. Структурная схема автономной ветроэлектростанции с генератором переменного тока, питающей потребителей постоянного и переменного тока

Figure 1. A block diagram of an autonomous wind farm with an alternating current generator that supplies direct current and alternating current consumers

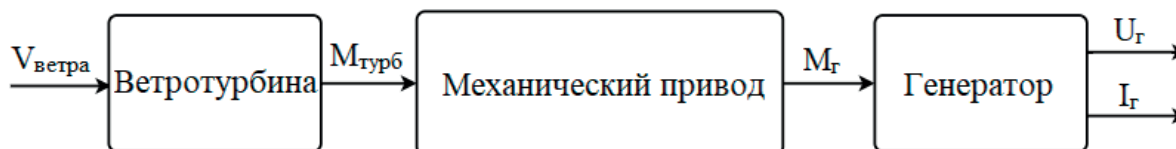


Рисунок 2. Структурная схема модели

Figure 2. Structural scheme of the model

В качестве исходных данных для моделирования были использованы технические параметры трехлопастной ветряной турбины модели WH8-10000W с горизонтальной осью вращения [3–5]. Технические характеристики ветрогенератора типа WH8-10000W приведены в таблице 1.

Разработка модели ветроэнергетической установки осуществляется путем определения динамической характеристики ветроустановки, которая учитывает вышеприведенные технические данные ветрогенератора типа WH8-10000W.

Для определения динамической характеристики ветроустановки воспользуемся уравнением динамической характеристики вращения механических частей ветроустановки [6]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{турб}} - M_{\text{г}} - k_{\text{тр}} \omega,$$

где J — момент инерции вращающихся масс ВЭУ, кг·м²;

ω — угловая частота вращения ветроколеса, рад/с;

$M_{\text{турб}}$ — механический момент на валу ветроколеса, Н·м;

$M_{\text{г}}$ — электромагнитный момент электрогенератора, Н·м;

$k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения скольжения.

Суммарный момент инерции вращающихся масс ВЭУ определяется как сумма момента инерции ротора и момента инерции ветроколеса:

$$J = J_{\text{г}} + J_{\text{в}},$$

где $J_{\text{г}}$ — момент инерции ротора ветрогенератора, кг·м²;

$J_{\text{в}}$ — момент инерции ветроколеса, кг·м².

Расчет момента инерции вращающихся масс ВЭУ был упрощен путем пренебрежения моментом инерции ротора ветрогенератора, поскольку диаметр ротора значительно меньше диаметра ветроколеса. Определяющим моментом является момент инерции лопастей, который определяется следующим образом:

$$J_{\text{л}} = m \cdot R_{\text{г}}^2,$$

где m — суммарная масса ветроколеса, кг;

$R_{\text{г}}$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести лопасти, м.

Определен коэффициент трения, который учитывает механические потери, создаваемые при вращении вала ветрогенератора:

$$k_{\text{тр}} = 0,2.$$

Получена зависимость крутящего момента от скорости ветра для каждой лопасти:

Таблица 1. Технические характеристики ветрогенератора типа WH8-10000W

Table 1. Technical characteristics of the WH8-10000W type wind turbine

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	10
Максимальная мощность $P_{\text{мах}}$, кВт	12,5
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, В	380
Номинальная скорость ветра $V_{\text{ном}}$, м/с	12
Диаметр ветроколеса D , м	8
Количество лопастей N , шт.	3
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин	250
Максимальная скорость ветра $V_{\text{мах}}$, м/с	20

$$M_B = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \cdot C_P}{2} =$$

$$= \frac{1,25 \cdot 3,14 \cdot 4^3 \cdot V^2 \cdot 0,4}{2} = 50,24 \cdot V^2 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где ρ — плотность воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;
 R — радиус ветроколеса, м;
 V — максимальная скорость ветра, м/с;
 C_P — коэффициент использования мощности.

В соответствии со структурной схемой и вычислениями, приведенными выше, была разработана компьютерная модель ветроустановки в Matlab Simulink (рисунок 3), которая имеет в своем составе следующие блоки: ветрогенератор, измерительные и преобразовательные устройства [7, 8].

Блок ветрогенератора типа WH8-10000W (рисунок 4) состоит из блоков: «Ветроколесо» и «Электродгенератор». В данном случае был взят синхронный

генератор из библиотеки SimPower-System.

Одним из основных блоков компьютерной модели ветрогенератора типа WH8-10000W является блок, который работает на основе уравнения динамической характеристики вращения ВЭУ (рисунок 5).

Важно отметить, что работа всей ветроэнергетической системы осуществляется при заданной постоянной скорости ветра, равной 12 м/с, поскольку значение номинальной мощности ветрогенератора достигается при заданной скорости ветра [9, 10].

Входными значениями являются скорость ветра, равная 12 м/с, и рассчитанные значения моментов, возникающих на валу ветроколеса, которые имеют следующие значения: момент вращения ветроколеса $M_B = 50,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$, суммарный

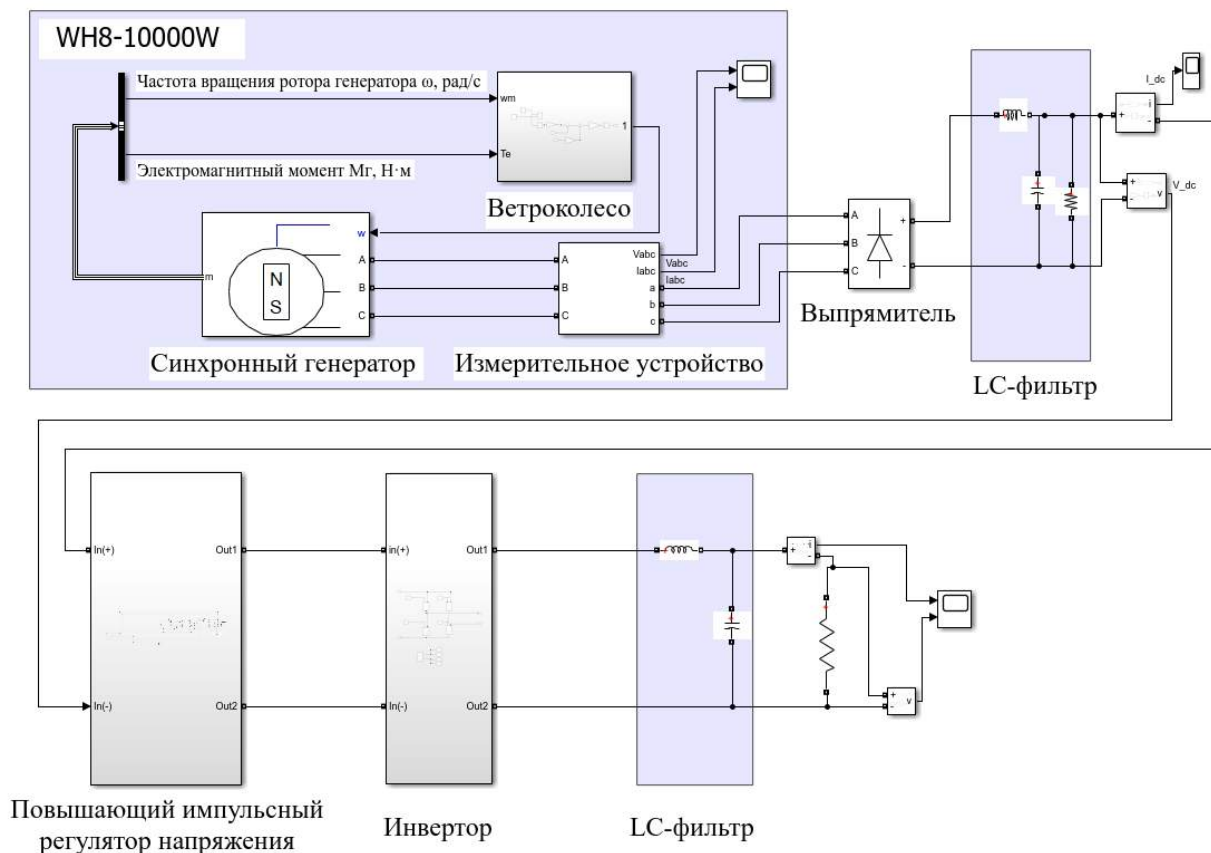


Рисунок 3. Компьютерная модель ветроустановки, разработанная в Matlab Simulink

Figure 3. Computer model of a wind turbine developed in Matlab Simulink

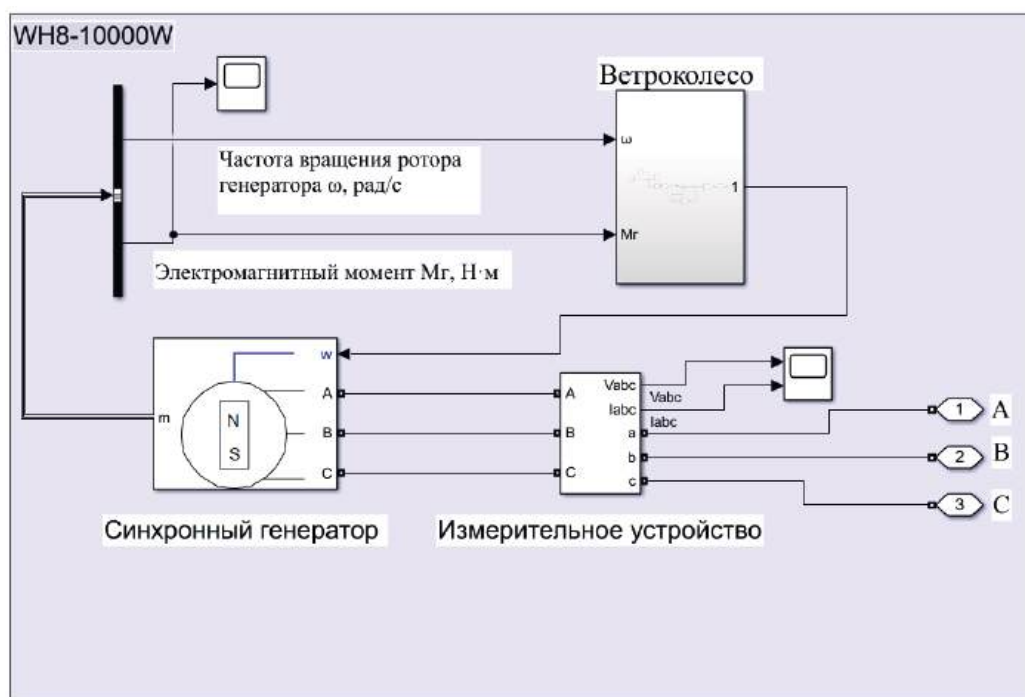


Рисунок 4. Модель ветрогенератора типа WH8-10000W

Figure 4. The model of the WH8-10000W type wind turbine

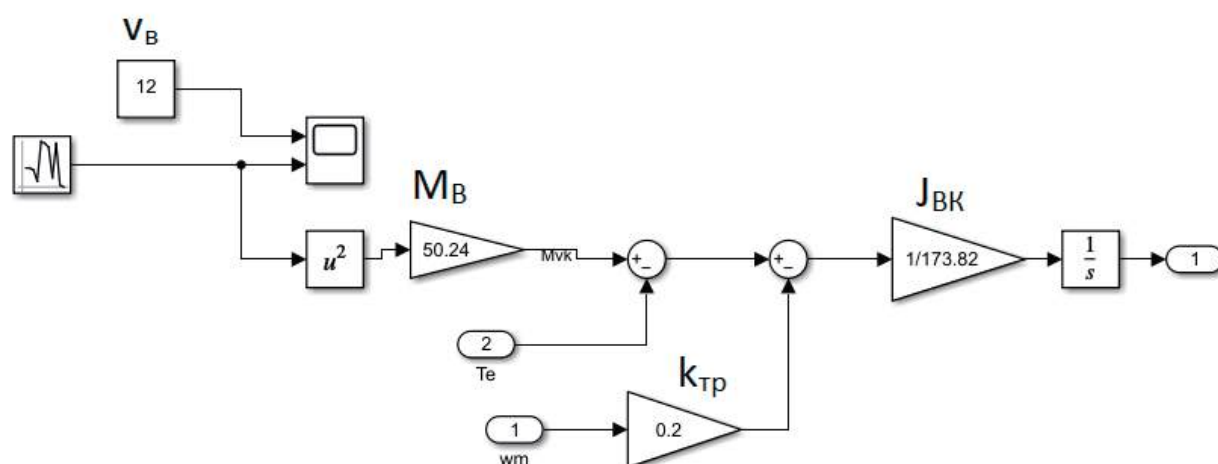


Рисунок 5. Компьютерная модель блока «Ветроколесо»

Figure 5. Computer model of the «Wind Wheel» block

момент инерции $J = 173,82 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, значение коэффициента трения $k_{\text{тр}} = 0,2$.

На рисунке 6 представлен график электромагнитного момента на валу генератора $M_{\text{г}}$, Н·м.

Как видно из графика (рисунок 6), электромагнитный момент $M_{\text{г}}$ отрицателен, поскольку выбранный в качестве электрогенератора в библиотеке SimPowerSystem блок «Permanent Magnet

Synchronous Machine» работает в генераторном режиме. Пульсирующий характер электромагнитного момента возникает вследствие нагрузки в результате взаимодействия тока якоря с магнитным потоком генератора.

Рассматривается фрагмент компьютерной модели, приведенной на рисунке 7, оснащённый рядом преобразователей. Данная компьютерная модель оснащена

следующими схемными элементами: выпрямителем, инвертором и Г-образным LC-фильтром для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Синхронный генератор вырабатывает переменное напряжение, далее оно выпрямляется в постоянное, проходя через диодный мост, и сглаживается в Г-образном LC-фильтре [11]. Затем снова с помощью инвертора преобразуется в переменное напряжение.

Изменчивость скорости ветра влияет на характер преобразования ветровой энергии, поскольку ветроколесо в порывах стремится раскрутиться больше или, наоборот, меньше. Это приводит к колебаниям напряжения и частоты вращения,

что негативно сказывается на качестве электроснабжения.

Преобразование первоначальной некачественной электроэнергии сначала в постоянный ток, а потом обратно в переменный с требуемыми параметрами электрической сети позволяет компенсировать эти колебания.

Кроме того, преобразование переменного тока в постоянный необходимо для сохранения электроэнергии в аккумуляторной батарее. Затем заряд аккумулятора, преобразованный в инверторе, передаётся в сеть [12].

В компьютерной модели (рисунок 7) был использован повышающий импульсный регулятор напряжения, который

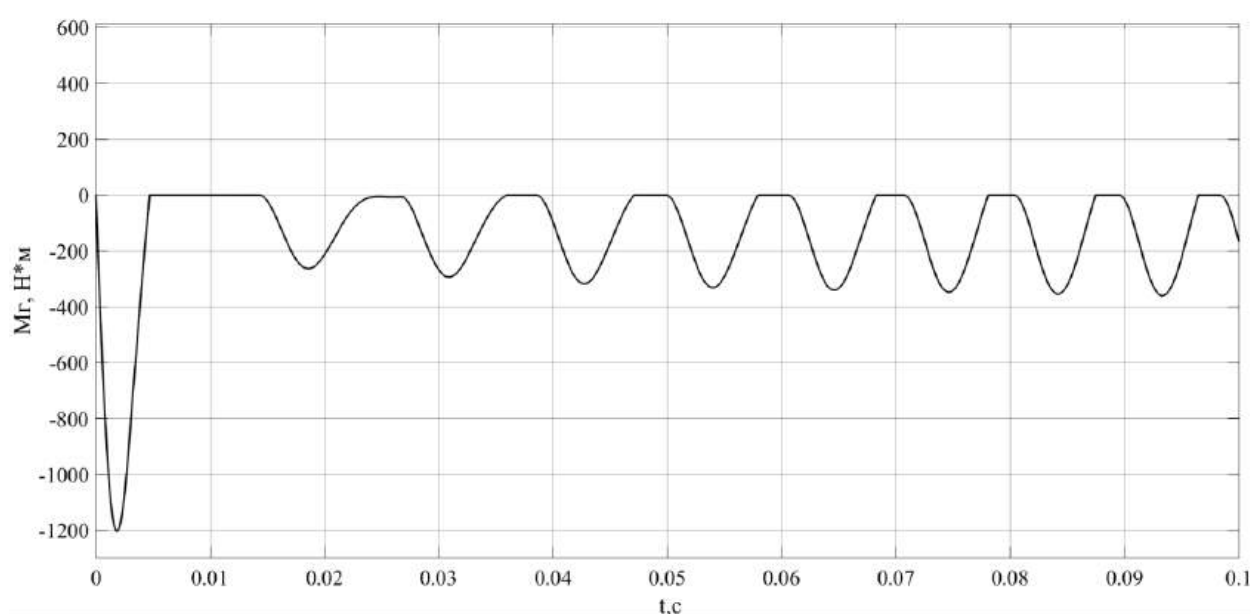


Рисунок 6. Электромагнитный момент на валу генератора M_g , Н·м

Figure 6. Electromagnetic moment on the generator shaft M_g , N·m

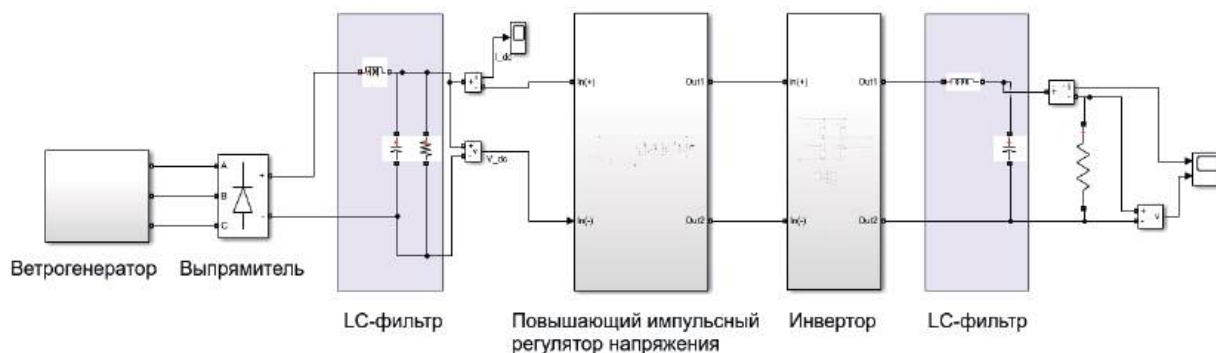


Рисунок 7. Фрагмент компьютерной модели

Figure 7. Section of the computer model

предназначен для увеличения значения напряжения.

Применение повышающего импульсного регулятора напряжения обосновывается низким вырабатываемым напряжением на генераторе, которого может быть недостаточно для зарядки аккумуляторов и питания электрических устройств. В реальных условиях ветроустановка работает при различных скоростях ветра. Повышающий импульсный регулятор напряжения позволяет поддерживать стабильное выходное напряжение, даже если скорость вращения гене-

ратора меняется, что позволяет оптимизировать работу системы. В связи с этим, применение импульсного регулятора напряжения решает вышеуказанную проблему. Как видно из графика (рисунок 8), значение напряжения на выходе выпрямителя сначала колеблется, а затем становится постоянным из-за процесса выпрямления переменного тока в постоянный. Выходное напряжение выпрямителя $U_{\text{вых}} = 315,3 \text{ В}$.

На рисунке 9 представлен график напряжения на выходе с импульсного регулятора напряжения, который увели-

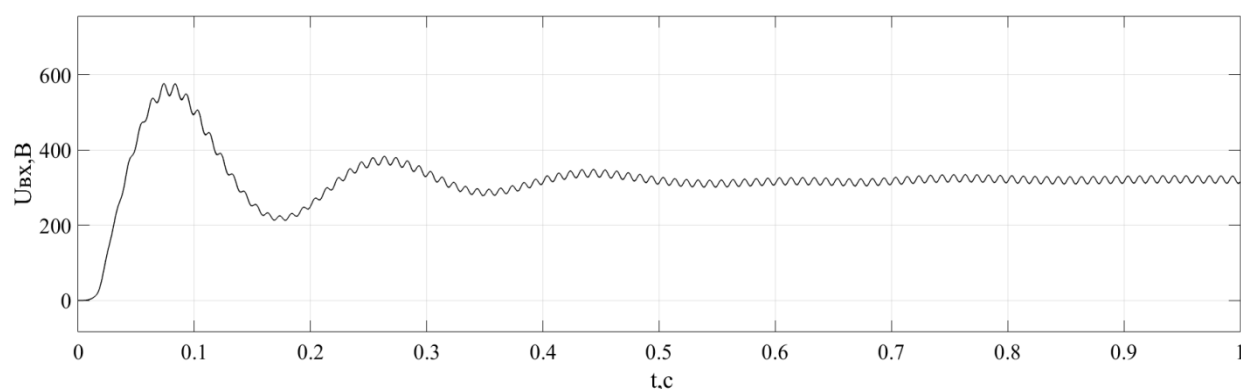


Рисунок 8. График напряжения на выходе выпрямителя

Figure 8. Voltage graph at the output of the rectifier

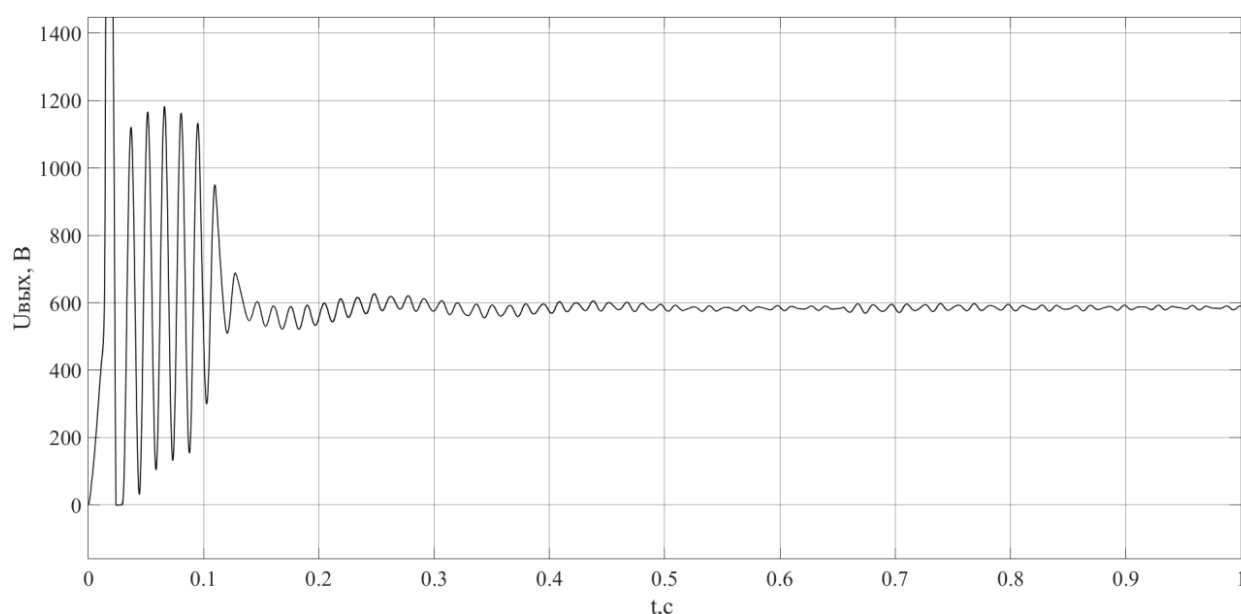


Рисунок 9. График напряжения на выходе с импульсного регулятора напряжения

Figure 9. Output voltage graph from a pulse voltage regulator

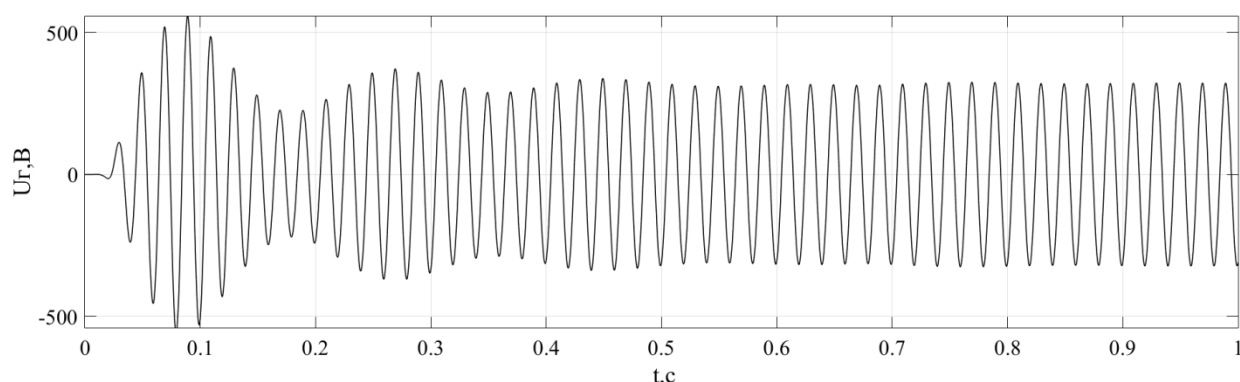


Рисунок 10. График напряжения на выходе инвертора

Figure 10. Voltage graph at the output of the inverter

чивает значение напряжения до $U_{\text{вых}} = 590,5$ В. Изменение напряжения импульсного регулятора объясняется протеканием переходного процесса.

Значение напряжения на выходе инвертора составляет $U_r = 320$ В.

На рисунке 10 показан график напряжения на выходе инвертора, значение напряжения которого изменяется согласно синусоидальному закону. Изменение амплитуды при включении ветроустановки возникает в связи с переходным процессом.

Выводы

Разработана компьютерная модель ВЭУ малой мощности, определены динамические характеристики вращения ветроустановки, рассчитан суммарный момент инерции $J = 173,82$ кг·м². Проведена оценка работоспособности компьютерной модели при скорости ветра, равной 12 м/с, в программе Matlab Simulink. Определены выходные значения ветрогенератора типа WH8-10000W: генерируемое напряжение, скорость вращения ротора. Исследовано влияние повышающего импульсного регулятора напряжения на выходное напряжение.

Список источников

1. Шевченко М.В. Ветроэнергетический потенциал России [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vetroenergeticheskiy-potentsial-rossii/viewer> (дата обращения: 15.11.2024).
2. Мудрецов А.Ф., Тулупов А.С. Проблемы развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии // Стратегическое планирование и развитие предприятий: матер. Семнадцатого Всеросс. симпозиума. М.: ЦЭМИ РАН, 2016. С. 100–103. EDN: ZRICWZ.
3. Колосов Р.В., Титов В.Г., Мирясов Г.М. Моделирование ветроэнергетически установок // Вестник Чувашского университета. 2014. № 2. С. 27–32. EDN: SJKDHH.
4. Соломин Е.В. Ветроэнергетическая экономика // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2010. № 2 (82). С. 28–30. EDN: MJBGUB.

5. Токарева Е.А. Выбор ветроэнергетической установки // Студенческие Дни науки в ТГУ: сб. студенческ. работ. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. С. 151–152.
6. Обухов С.Г. Ветроэнергетические установки малой мощности. Технические характеристики, моделирование, рациональный выбор. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 93 с. ISBN: 9783848440436.
7. Лукутин Б.В., Сурков М.А. Нетрадиционные способы производства электроэнергии. Томск: Изд-во ТПУ, 2018. 193 с.
8. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники энергии: электронное учебное пособие. 2015. № 1. С. 16–20. URL: <https://ses.susu.ru/wp-content/uploads/2017/09/Кирпичникова-И.М.-и-др.-Возобновляемые-источники-энергии-13.03.02.pdf/> (дата обращения: 03.06.2024).

9. Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Борисов Г.А., Виссарионов В.И., Евдокимов В.М., Малинин Н.К., Огородов Н.В., Пузаков В.Н., Сидоренко Г.И., Шпак А.А. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. СПб.: Наука, 2002. 314 с. ISBN: 5-02-024971-8.

10. Альтернативная энергетика как фактор модернизации российской экономики. Тенденции и перспективы: сб. науч. тр. / В.Н. Борисов, И.А. Буданов, И.Л. Владимирова [и др.]; под ред. Б.Н. Порфирьева. М.: Научный консультант, 2016. 212 с. ISBN: 978-5-9908932-3-8.

11. Rodriguez-Amenedo J.L., Rodriguez-Garcia F., Burgos J.C., Chincilla M., Arnalte S., Vezanzones C. Experimental Rig to Emulate Wind Turbines // Proc. Int. Conf. Electric Machines, Istanbul, Turkey, Sept. 1998. 1998.

12. Jenkins N., Saad-Saoud Z. A Simplified Model for Large Wind Turbines // Eur. Union Wind Energy Conf., Göteborg, Sweden. 1996. P. 443–446.

References

1. Shevchenko M.V. *Vetroenergeticheskii potentsial Rossii* [Wind Energy Potential of Russia] [Electronic Resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vetroenergeticheskii-potentsial-rossii/viewer> (accessed 15.11.2024).

2. Mudretsov A.F., Tulupov A.S. Problemy razvitiya netraditsionnykh i vozobnovlyayemykh istochnikov energii [Problems of Development of Alternative and Renewable Energy Sources]. *Materialy Semnadsatogo Vserossiiskogo simpoziuma «Strategicheskoe planirovanie i razvitie predpriyatiy»* [Proceedings of the Seventeenth All-Russian Symposium «Strategic Planning and Development of Enterprises»]. Moscow, TsEMI RAN Publ., 2016, pp. 100–103. EDN: ZRICWZ.

3. Kolosov R.V., Titov V.G., Miryasov G.M. Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok [Modeling of Wind Power Installations]. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta — Bulletin of Chuvash University*, 2014, No. 2, pp. 27–32. EDN: SJKDHH.

4. Solomin E.V. Vetroenergeticheskaya ekonomika [Wind Turbine Economy]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» — International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology»*, 2010, No. 2 (82), pp. 28–30. EDN: MJBGUB.

5. Tokareva E.A. Vybór vetroenergeticheskoi ustanovki [Selection of Wind Power Installation]. *Sbornik studencheskikh rabot «Studencheskie Dni nauki v TGU»* [Collection of Student Works «Student Science Days at TSU»]. Tol'yatti, Izd-vo TGU, 2018, pp. 151–152.

6. Obukhov S.G. *Vetroenergeticheskie ustanovki maloi moshchnosti. Tekhnicheskie kharakteristiki, modelirovanie, ratsional'nyi vybor* [Low-Power Wind Turbines. Specifications, Modeling, Rational Choice]. Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 93 p. ISBN 9783848440436.

7. Lukutin B.V., Surkov M.A. *Netraditsionnye sposoby proizvodstva elektroenergii* [Unconventional Methods of Electricity Production]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2018. 193 p.

8. Lukutin B.V. *Vozobnovlyayemye istochniki energii: elektronnoe uchebnoe posobie* [Renewable Energy Sources: an Electronic Textbook]. 2015, No. 1, pp. 16–20. URL: <https://ses.susu.ru/wp-content/uploads/2017/09/Kirpichnikova-I.M.i-dr.-Vozobnovlyayemye-istochniki-energii-13.03.02.pdf/> (accessed 03.06.2024).

9. Bezrukikh P.P., Arbuzov Yu.D., Borisov G.A., Vissarionov V.I., Evdokimov V.M., Malinin N.K., Ogorodov N.V., Puzakov V.N., Sidorenko G.I., Shpak A.A. *Resursy i effektivnost' ispol'zovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Rossii* [Resources and Efficiency of Using Renewable Energy Sources in Russia]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2002. 314 p. ISBN: 5-02-024971-8.

10. Borisov V.N., Budanov I.A., Vladimirova I.L. e.a. *Sbornik nauchnykh trudov «Al'ternativnaya energetika kak faktor modernizatsii rossiiskoi ekonomiki. Tendentsii i perspektivy»* [Collection of Scientific Papers «Alternative Energy as a Factor in the Modernization of the Russian Economy. Trends and Prospects»]. Ed. by B.N. Porfir'ev. Moscow, Nauchnyi konsul'tant Publ., 2016. 212 p. ISBN 978-5-9908932-3-8.

11. Rodriguez-Amenedo J.L., Rodriguez-Garcia F., Burgos J.C., Chincilla M., Arnalte S., Vezanzones C. Experimental Rig to Emulate Wind Turbines. *Proc. Int. Conf. Electric Machines, Istanbul, Turkey, Sept. 1998*. 1998.

12. Jenkins N., Saad-Saoud Z. A Simplified Model for Large Wind Turbines. *Eur. Union Wind Energy Conf., Göteborg, Sweden, 1996*, pp. 443–446.

Статья поступила в редакцию 11.12.2024; одобрена после рецензирования 18.12.2024; принята к публикации 25.12.2024.

The article was submitted 11.12.2024; approved after reviewing 18.12.2024; accepted for publication 25.12.2024.

Научная статья

УДК 62-835

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-61-76

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

**Никита Русланович Кантюков****Nikita R. Kantyukov***аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия***Роман Вячеславович Кириллов****Roman V. Kirillov***доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия***Регина Тагировна Хазиева****Regina T. Khazieva***кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*

Актуальность

В условиях стремительного роста популярности электромобилей и увеличения потребности в зарядной инфраструктуре оценка эффективности схемных решений для зарядных станций становится все более важной задачей. В настоящее время требуется разработка зарядных устройств, позволяющих сократить время заряда электромобиля, повысить КПД преобразования напряжения сети в постоянный ток для заряда аккумулятора, обладающих высокой надежностью и доступной стоимостью.

Цель исследования

В данной статье рассматриваются различные схемы реализации зарядных станций, в частности, использование однофазного преобразователя. Схемы сравниваются по значениям коэффициентов передачи фильтра и гармонических искажений. Чем выше значение коэффициента передачи, тем более эффективным является фильтр. В свою очередь, низкое значение коэффициента гармонических искажений означает малое значение пиковых токов, меньший нагрев элементов и низкий уровень электромагнитных помех.

Ключевые слова

электромобиль,
зарядная станция,
повышающий
преобразователь,
коэффициент передачи,
фильтр, коэффициент
гармонических
искажений

Методы исследования

Для определения коэффициента передачи фильтра, а также коэффициента гармонических искажений использовалась среда компьютерного моделирования MatLab/Simulink.

Результаты

В результате исследований установлено, что наилучшими характеристиками для использования в зарядных станциях обладает схема на основе повышающего чередующегося PFC, коэффициент гармонических искажений которой составляет 1,31 %, что лучше, чем у схемы на основе повышающего преобразователя PFC с коэффициентом гармонических искажений, равным 2,83 %.

Для цитирования: Кантюков Н. Р., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т. Оценка эффективности преобразовательных схем для зарядных станций электротранспорта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 61-76. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-61-76>.

Original article

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF CONVERSION CIRCUITS FOR ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS

Relevance

With the rapid growth in popularity of electric vehicles and the increasing need for charging infrastructure, evaluating the effectiveness of circuit solutions for charging stations is becoming an increasingly important task. Currently, the development of chargers is required to reduce the charging time of an electric vehicle, increase the efficiency of converting mains voltage to direct current to charge the battery, with high reliability and affordable cost.

Aim of research

This article discusses various schemes for the implementation of charging stations, in particular, the use of a single-phase converter. The circuits are compared by the values of the transmission coefficients of the filter and harmonic distortion. The higher the value of the transmission coefficient, the more effective the filter is. In turn, a low harmonic distortion coefficient means a low peak current value, less heating of the elements and a low level of electromagnetic interference.

Research methods

The MatLab/Simulink computer simulation environment was used to determine the transmission coefficient of the filter, as well as the harmonic distortion coefficient.

Results

As a result of the research, it was found that the best characteristics for use in charging stations are provided by a scheme based on a step-up alternating PFC, with a harmonic distortion coefficient of 1.31 %, which is better than that of a scheme based on a step-up PFC converter with a harmonic distortion coefficient of 2.83 %.

Keywords

electric vehicle, charging station, boost converter, transmission coefficient, filter, harmonic distortion coefficient

For citation: Kanyukov N. R., Kirillov R. V., Khazieva R. T. Otsenka effektivnosti preobrazovatel'nykh skhem dlya zaryadnykh stantsiy elektrottransporta [Evaluation of the Efficiency of Conversion Circuits for Electric Vehicle Charging Stations]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – Electrical and Data Processing Facilities and Systems, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 61-76 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-61-76>.

Введение

В России за предыдущий год значительно увеличилось количество электромобилей. К концу 2022 года в России насчитывалось 23400 электромобилей, а в 2023 году их количество стало равным 39700. Рост составил около 75 % [1, 2]. На рисунке 1 представлена динамика увеличения количества электромобилей в России.

На середину 2024 года количество зарядных станций для электромобилей составляло 7410 единиц. Из них 4850 — это зарядные станции переменного тока и 2560 единиц — постоянного тока. По сравнению с декабрем 2023 года рост зарядных станций составил 137 % и 142 % соответственно. Зарядная станция переменного тока способна зарядить аккумулятор электромобиля за время от 8 до 17 ч в зависимости от режима работы. В свою очередь, зарядная станция постоянного тока может справиться за 45 мин [3, 4].

Известно, что модуль питания в станциях постоянного тока бывает двух типов. Модуль питания первого типа

преобразовывает переменный ток в постоянный. Модуль питания второго типа является источником постоянного тока.

При зарядке электромобиля модулем первого типа происходит преобразование энергии переменного тока в энергию постоянного тока. При преобразовании энергии необходимо использовать фильтры, которые служат для сглаживания пульсаций напряжения [4]. Эффективность работы фильтра влияет на качество электрической энергии и стабильность энергосистемы. Работа энергосистемы и эффективное использование электрической энергии также влияют на чистоту окружающей нас среды.

Как известно, работа энергопотребителей влияет на энергосистему. Например, в случае линейной нагрузки на предприятии потребитель не искажает синусоидальную форму напряжения в энергосистеме, не вносит в нее высшие гармоники, приводящие к помехам. Такой потребитель электрической энергии считается «идеальным». Но существует нелинейная нагрузка, кото-

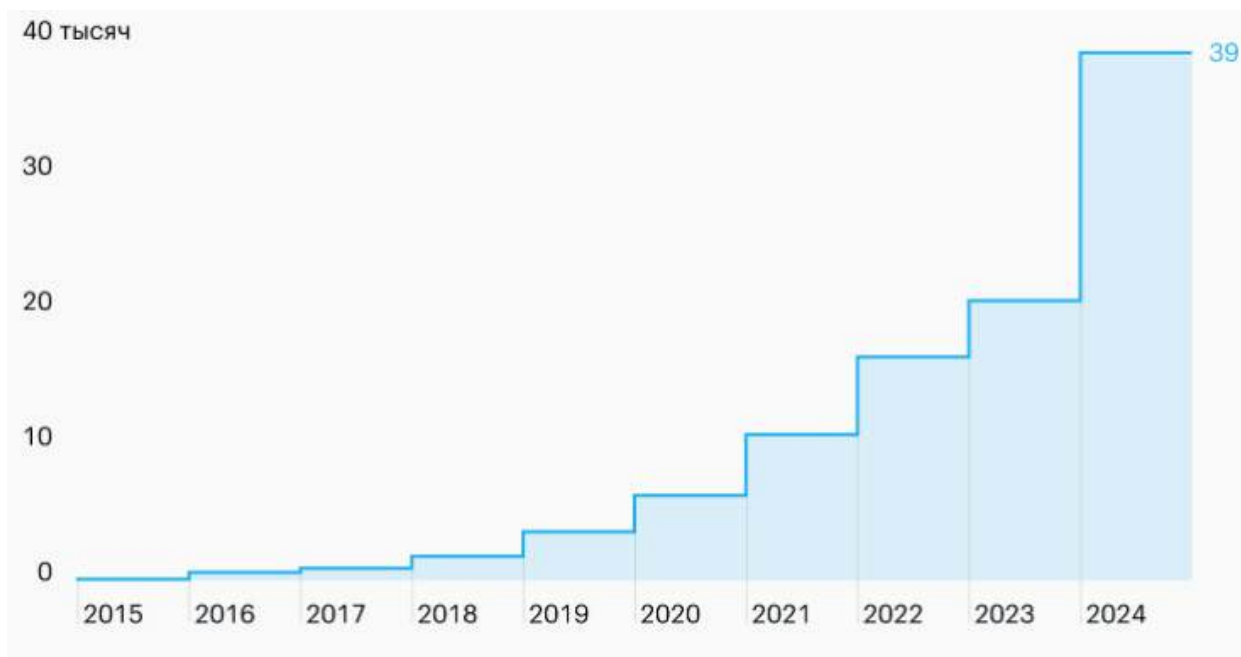


Рисунок 1. Динамика увеличения количества электромобилей в России

Figure 1. Dynamics of the increase in the number of electric vehicles in Russia

рая искажает форму тока и напряжения, внося дополнительные пульсации и гармоники. Для регулирования влияния помех в энергосистему существуют нормативы [5].

Типы схем

На рисунке 2 изображена блок-схема зарядной станции электромобиля (PFC — коррекция фактора мощности, *англ.* Power Factor Correction).

Для заряда электромобиля можно использовать как однофазные AC/DC схемы заряда электромобиля, так и трехфазные. Возможно использование нескольких схем для заряда аккумулятора [6–9].

Основными из них являются:

- повышающий преобразователь с коррекцией фактора мощности (PFC)/ активный корректор коэффициента мощности;
- повышающий чередующийся с коррекцией фактора мощности / корректор коэффициента мощности с форсированным чередованием;
- тотемно-полюсная схема коррекции мощности.

Каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки.

Сравнить эффективность схемы можно по нескольким факторам:

- количество используемых элементов;
- коэффициент передачи фильтра;

- простота управления схемой;
- экономичность;
- гармонические колебания.

В данной работе схемы сравниваются по их коэффициентам передачи фильтра и гармоническим искажениям. Для этого было выполнено моделирование каждой схемы, рассчитаны коэффициент передачи и гармонические искажения.

Моделирование в MatLab

Рассмотрим первую моделируемую схему. На рисунке 3 представлен однофазный AC/DC повышающий преобразователь PFC (Power Factor Correction), который используется для повышения коэффициента мощности в электронных устройствах. Это устройство предназначено для коррекции реактивной мощности и улучшения качества электроэнергии путем минимизации гармоник тока и напряжения.

Основные элементы схемы следующие.

1. Преобразователь PFC. Основной компонент схемы, который преобразует переменный ток в постоянный. Он состоит из нескольких ключевых компонентов:

- диодный мост D1-D4, который преобразует переменный ток в постоянный;
- катушка L1 используется для накопления энергии и фильтрации гармоник;

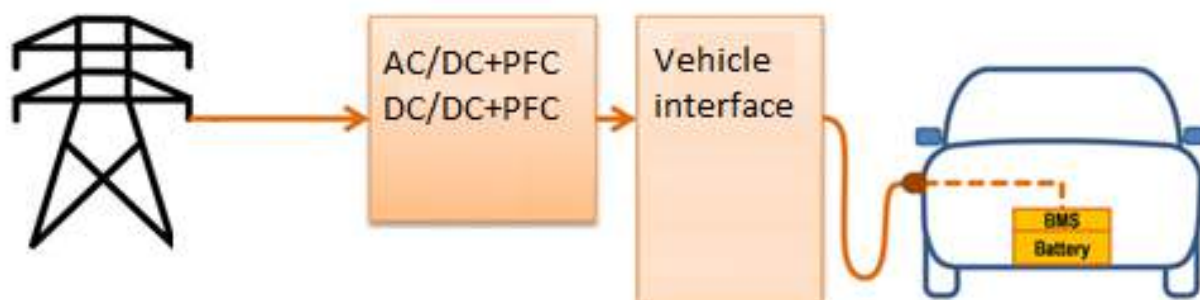


Рисунок 2. Блок-схема зарядной станции электромобиля

Figure 2. Electric vehicle charging station block diagram

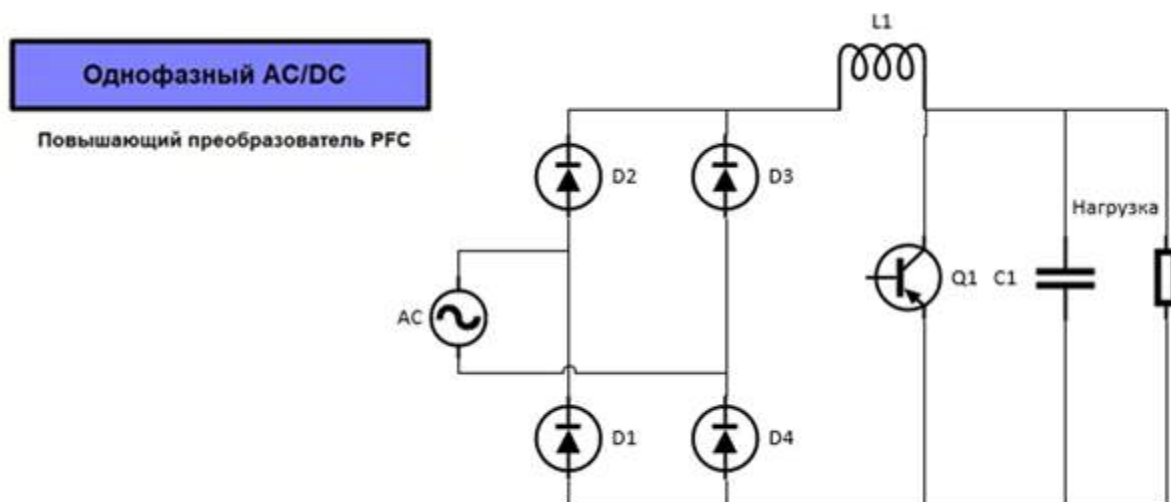


Рисунок 3. Повышающий преобразователь PFC

Figure 3. PFC boost converter

— конденсатор C1 служит для стабилизации выходного напряжения;

— электронный ключ Q1 управляет работой индуктора, обеспечивая регулировку мощности.

2. Управляющая логика обеспечивает правильное управление работой электронного ключа Q1, чтобы оптимизировать процесс преобразования и повысить эффективность.

3. Регулировка мощности осуществляется через управление частотой переключения электронного ключа, что позволяет точно контролировать уровень мощности и минимизировать гармонические искажения.

Таким образом, схема представляет собой эффективное решение для улучшения качества электропитания и снижения затрат на электроэнергию, особенно в устройствах с высоким потреблением энергии [10–12].

На рисунке 3 изображен повышающий преобразователь PFC. Самым основным его достоинством является простое управление замкнутым контуром и относительно небольшие гармонические искажения. В схеме имеется

диодный мост D1-D4, который эффективно выпрямляет ток. Стоит отметить и недостаток схемы, который определяется относительно большими потерями в ключах, что объясняется тремя включенными последовательными полупроводниковыми устройствами [13].

На рисунке 4 изображена модель повышающего преобразователя PFC с нагрузкой в виде аккумулятора, разработанная в среде MatLab Simulink.

В схеме (рисунок 4) установлен дополнительный резистор R, подключенный последовательно к аккумуляторной батарее, необходимый для ограничения силы тока. Максимальное значение силы тока для заряда аккумулятора электромобиля составляет приблизительно 70 А [14]. Рассмотрим напряжение на выходе схемы.

На рисунках 5 и 6 представлены графики напряжения и тока на выходе системы. В самом начале наблюдается резкий скачок значений напряжения и тока, что связано с переходными процессами, после которых показатели стабилизируются.

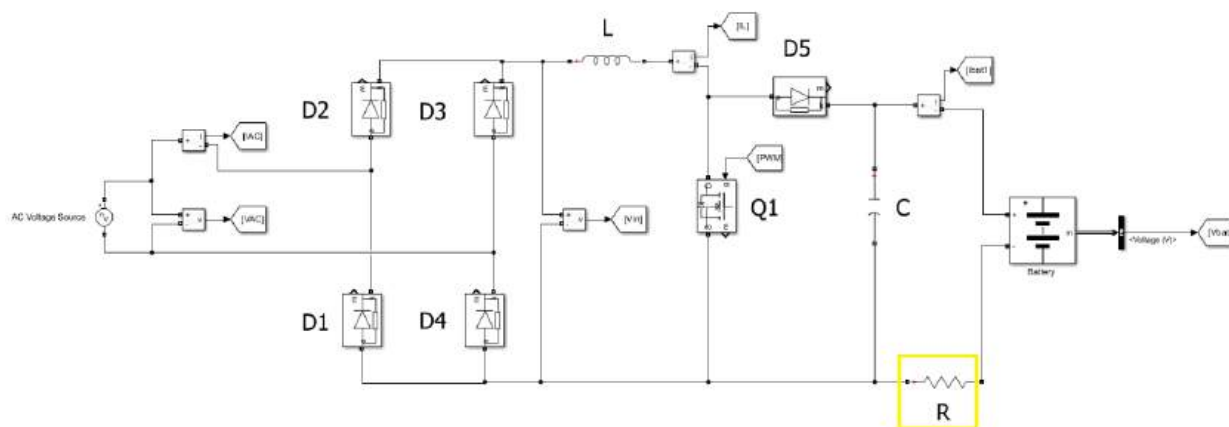


Рисунок 4. Компьютерная модель повышающего преобразователя PFC

Figure 4. Computer model of the step-up converter PFC

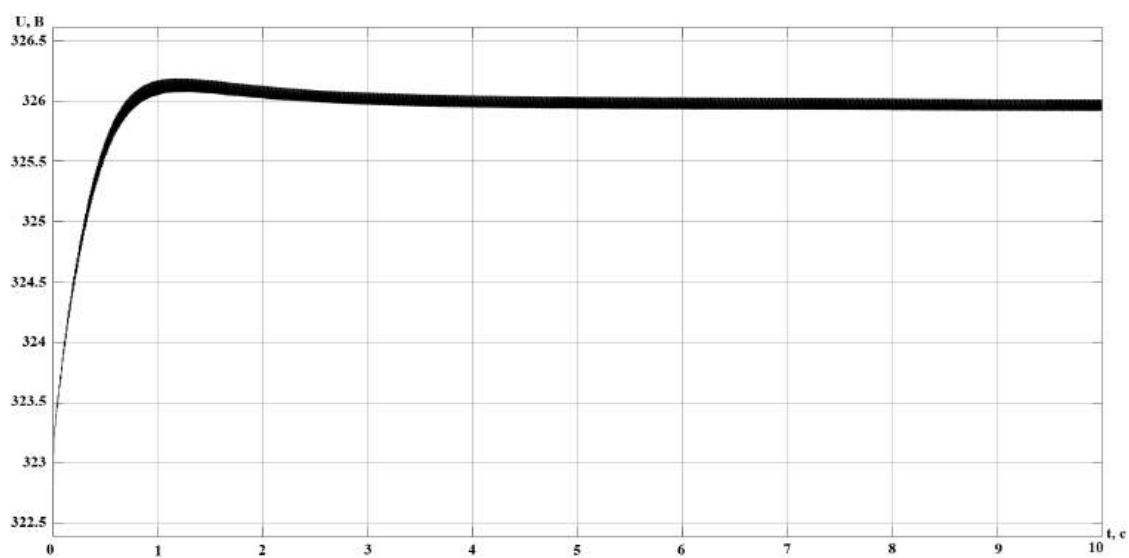


Рисунок 5. График напряжения на выходе из системы

Figure 5. Output voltage graph

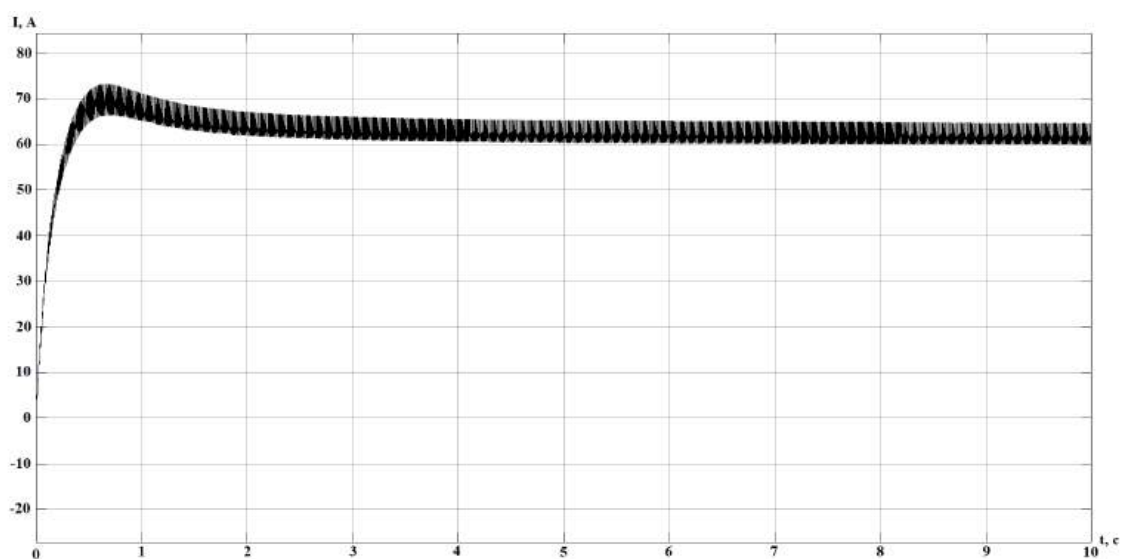


Рисунок 6. График тока на выходе из системы

Figure 6. Voltage and current at the output of the system

Рассмотрим в увеличенном масштабе значения напряжения и тока на установившемся интервале от 6,1 до 6,2 с (рисунки 7, 8).

Амплитудное значение тока равно 65 А, что является допустимым для заряда аккумуляторной батареи. Фазы напряжения и тока совпадают, соответ-

ственно, схема работает в нормальном режиме [5].

На рисунке 9 представлен график гармонических искажений для схемы повышающего преобразователя PFC. Коэффициент гармонических искажений равен 2,83 %, что является допустимым значением для станций зарядки электромобилей [5].

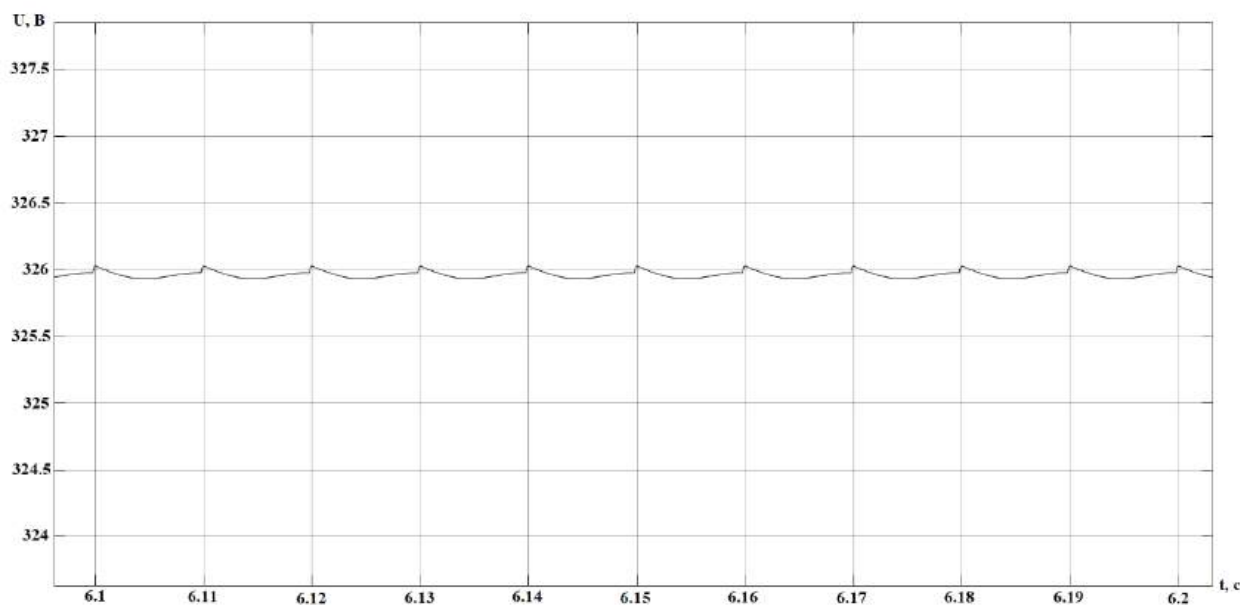


Рисунок 7. График напряжения в интервале от 6,1 до 6,2 с

Figure 7. Voltage graph in the range from 6.1 to 6.2 s

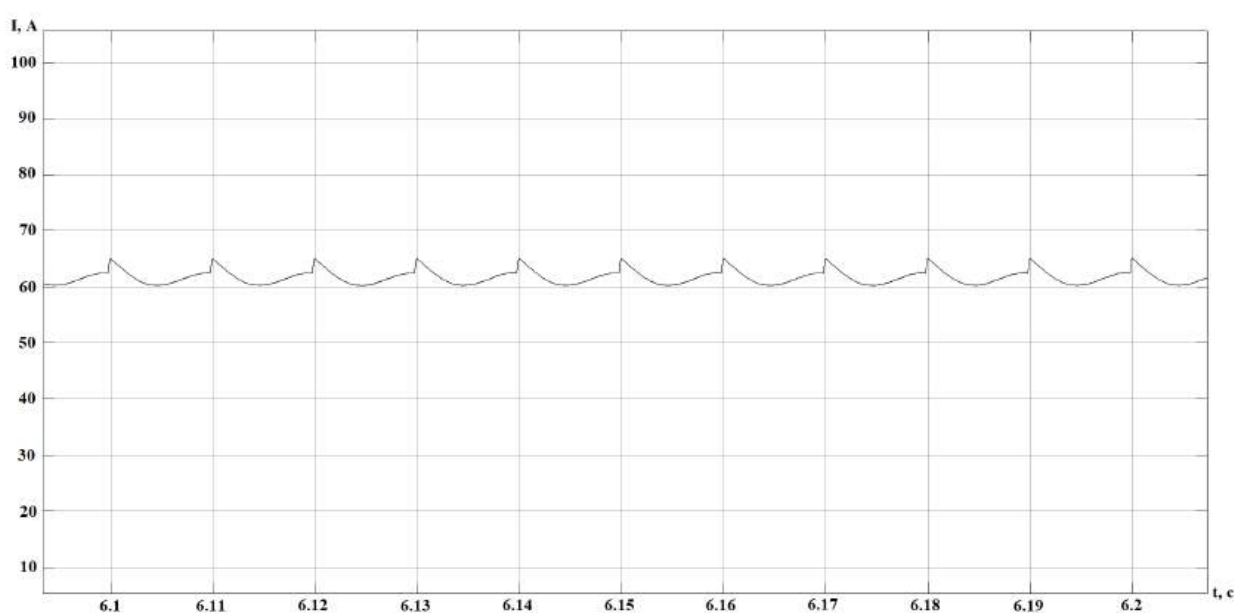


Рисунок 8. График тока в интервале от 6,1 до 6,2 с

Figure 8. Interval current schedule from 6.1 to 6.2 s

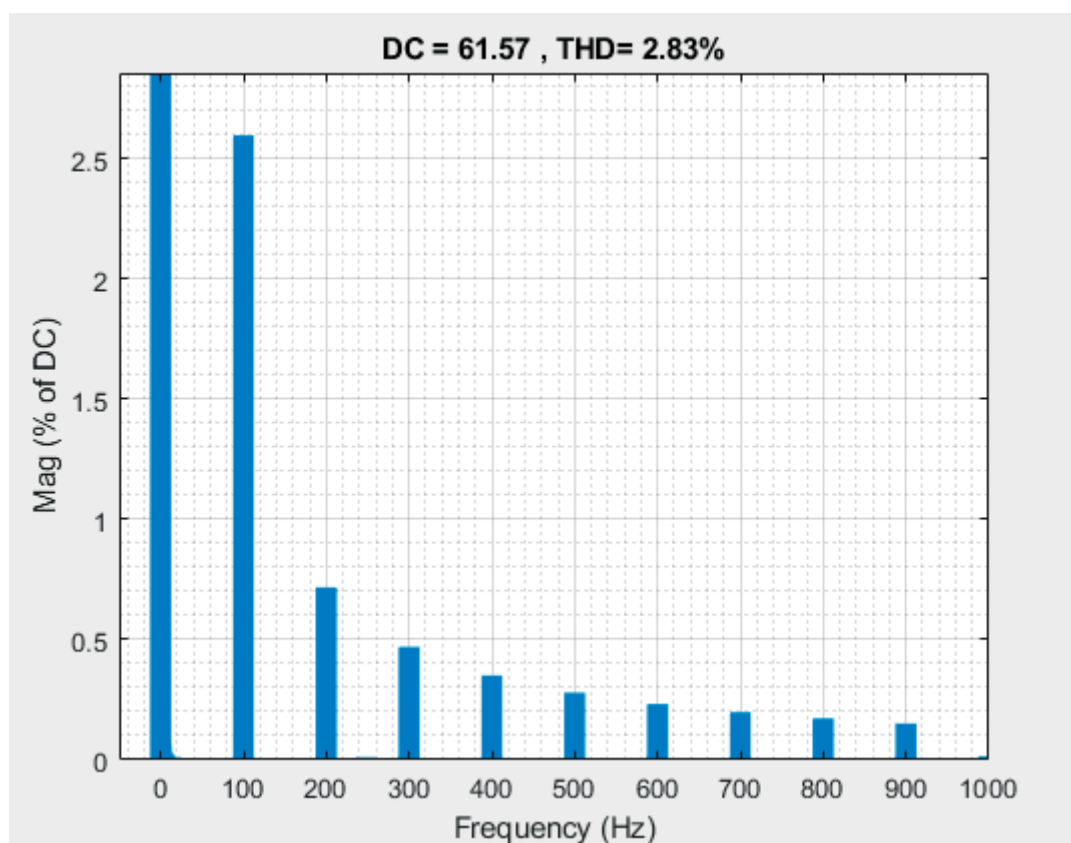


Рисунок 9. Уровень гармонических искажений для схемы повышающего преобразователя PFC

Figure 9. Harmonic distortion level for the PFC boost converter circuit

Анализ схемы повышающего чередующегося PFC был выполнен в предыдущей работе [15]. Результат расчета гармонических искажений для данной схемы приведен на рисунке 10.

Расчет коэффициента гармонических искажений выполнен в среде MatLab Simulink, для схемы с повышающим чередующимся PFC величина коэффициента полного гармонического искажения равна 1,31 %, что также удовлетворяет требованиям ГОСТ 30804.3.12-2013 [5, 16].

На рисунке 11 изображена схема totem-pole PFC, одним из ее преимуществ является простота и малое количество компонентов [17, 18].

На рисунке 12 изображена схема totem-pole с нагрузкой в виде аккумуляторной батареи электромобиля.

На рисунке 13 изображены графики напряжения и тока на выходе системы. В

начале графика также наблюдается скачок напряжения и тока, что обусловлено переходным процессом, и далее значения напряжения и тока принимают номинальные значения. Значение тока по амплитуде равно 70 А, что является допустимым для заряда аккумуляторной батареи [19–21]. Фазы напряжения и тока совпадают, соответственно, схема работает в нормальном режиме [22, 23].

На рисунке 14 показан график гармонических колебаний для тотемно-полусной схемы. Коэффициент гармонических искажений равен 340,26 %, что превышает значения, описанные в требованиях ГОСТ 30804.3.12-2013.

В таблице 1 приведены достоинства и недостатки однофазных схем AC/DC повышающих преобразователей. Обратим внимание на столбец «Коэффициент передачи». Коэффициент передачи определяется отношением выходного

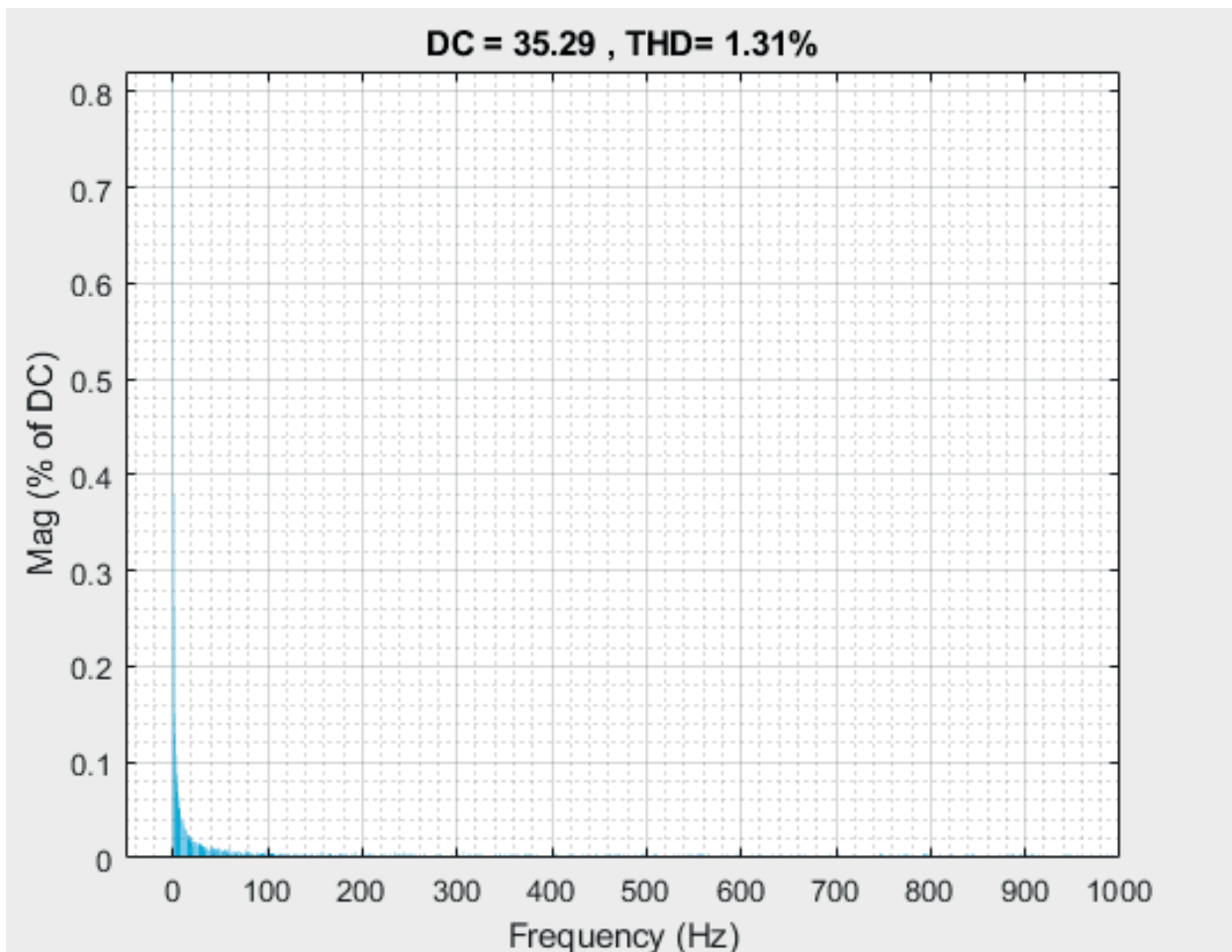


Рисунок 10. Результат расчета гармонических искажений для схемы повышающего чередующегося PFC

Figure 10. The result of the harmonic distortion calculation for the step-up alternating PFC circuit

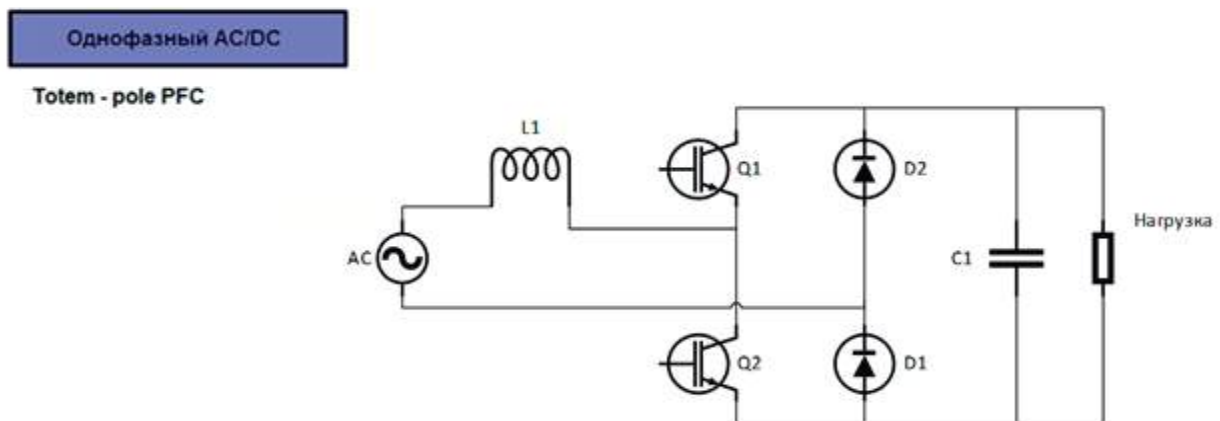


Рисунок 11. Тотемно-полюсная схема коррекции мощности

Figure 11. Totem-pole power correction circuit

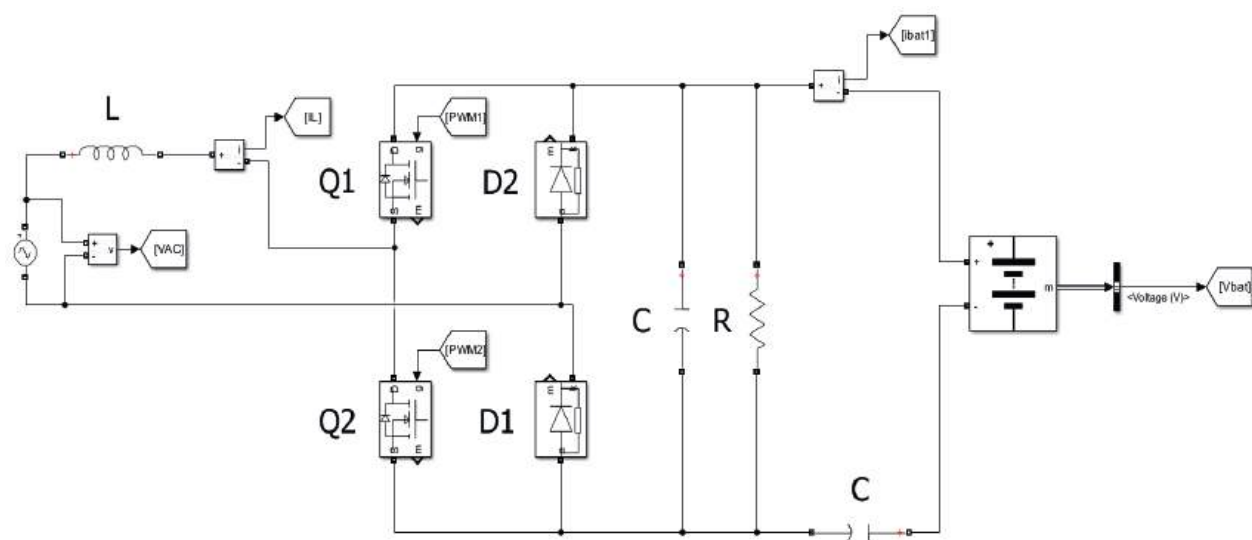


Рисунок 12. Схема totem-pole

Figure 12. Totem-pole diagram

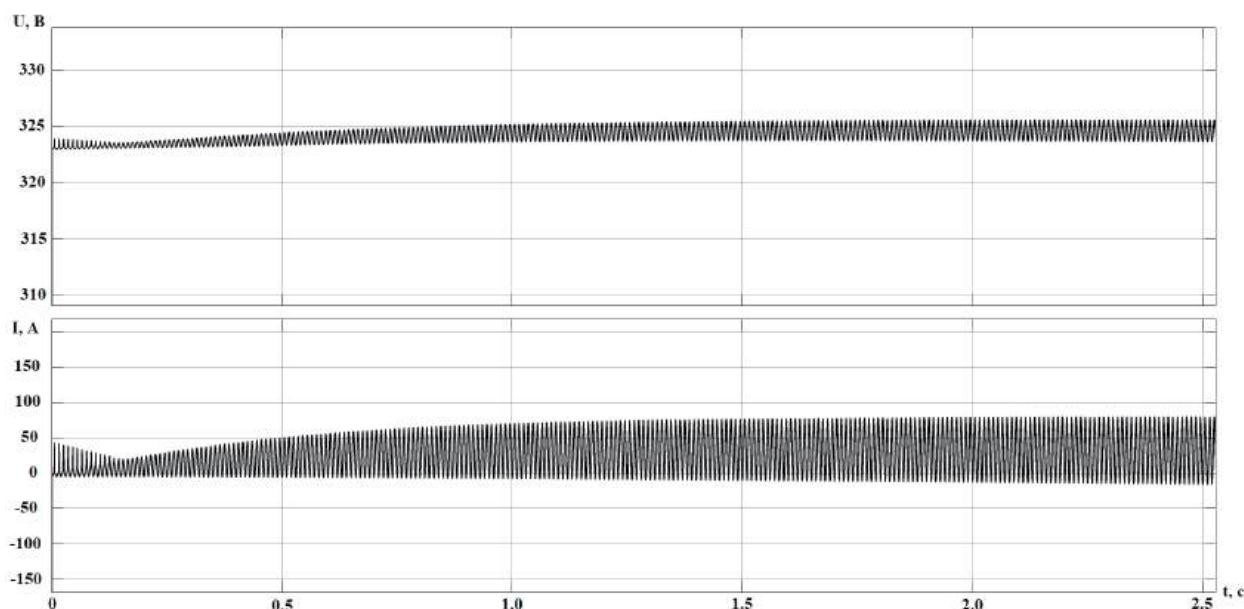


Рисунок 13. Напряжение и ток на выходе системы

Figure 13. Voltage and current at the system output

напряжения к входному. Обычно коэффициент передачи варьируется в пределах от 0 до 1. Логично, чем выше значение коэффициента передачи, тем более эффективным является фильтр. Рассмотрим коэффициент гармонических искажений. Более низкое значение коэф-

фициента означает низкое значение пиковых токов, меньший нагрев элементов и более низкий уровень электромагнитных помех [22–24]. По ГОСТ 30804.3.12-2013 допустимым значением гармонических искажений является $\pm 5\%$.

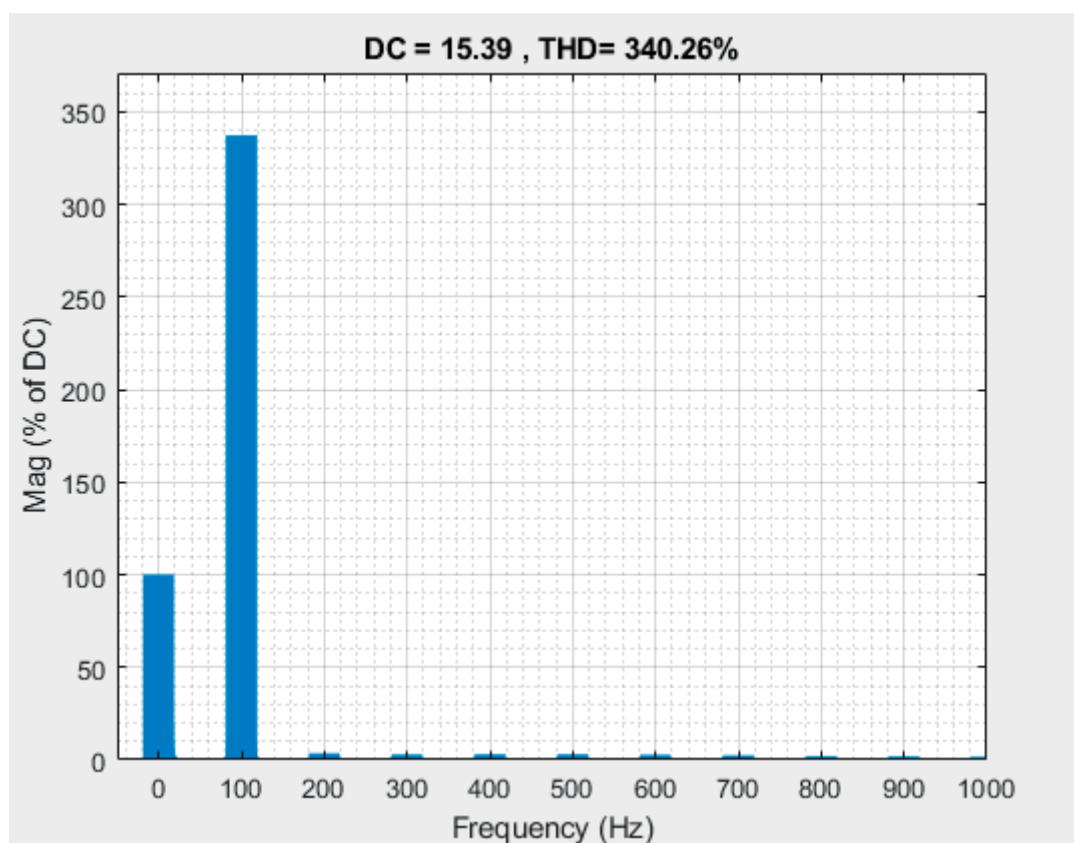


Рисунок 14. Результат расчета гармонических искажений для тотемно-полюсной схемы

Figure 14. The result of calculating harmonic distortion for a totemic-pole circuit

Таблица 1. Достоинства и недостатки однофазных схем AC/DC повышающих преобразователей

Table 1. Advantages and disadvantages of single-phase AC/DC step-up converter circuits

Наименование схемы	Достоинства	Недостатки	Коэффициент гармонического искажения, %	Коэффициент передачи
Повышающий преобразователь PFC / активный корректор коэффициента мощности	1. Простое управление замкнутым контуром. 2. Низкое гармоническое искажение.	1. Последовательное включение 3-х повышающих преобразователей, приводящее к суммарным потерям в ключе 2. Низкая эффективность схемы	2,83	1,003

Наименование схемы	Достоинства	Недостатки	Коэффициент гармонического искажения, %	Коэффициент передачи
Повышающий чередующийся PFC/корректор коэффициента мощности с форсированным чередованием	1. Простое управление. 2. Высокая эффективность работы. 3. Низкое гармоническое искажение.	Последовательное включение 3-х повышающих преобразователей	1,31	1,23
Totem-pole PFC	1. Малое количество компонентов. 2. Высокая эффективность схемы. 3. Возможность увеличить КПД путем замены диодов на транзисторы. 4. Двухнаправленность	Высокое гармоническое искажение	340	0,997

Выводы

Из рассмотренных схем требованию ГОСТ 30804.3.12-2013 удовлетворяют две схемы: повышающий преобразователь PFC и повышающий чередующийся PFC с коэффициентами гармонических искажений, равными 2,83 % и 1,31 % соответственно. Схемой с самым низким коэффициентом гармонических искажений является корректор коэффициента мощности с форсированным чередова-

нием, искажение которого меньше, чем у схемы с повышающим преобразователем PFC более чем на 100 %. При анализе рассматривалось устойчивое состояние схемы, то есть после завершения переходных процессов.

Из таблицы 1 следует, что наиболее эффективной схемой, с точки зрения работы фильтра, является повышающий чередующийся PFC, наименее эффективным — totem-pole PFC.

Список источников

1. Рязанов Г.М., Доманов В.И. Анализ и перспектива развития зарядных устройств для электромобилей // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: матер. VI Национальн. науч.-практ. конф.: в 2 т. Казань, 2020. Т. 2. С. 20-22. EDN: RVEEUM.
2. Вахрушев М.А. Анализ эффективности использования зарядных станций для электро-

мобилей // Столыпинский. 2022. № 4. С. 57–70. EDN: ZPSZGO.

3. Виды зарядных станций электромобилей [Электронный ресурс]. URL: https://hybrids.ru/useful_materials/articles/vid_i_tipu_zaryadnyh_stancij.

4. Контроллер зарядки электромобиля [Электронный ресурс]. URL: <https://prosto.energy/blogs/news/kontroller-zaryada-elektromobilya-on-zhe-secc>.

5. ГОСТ 30804.3.12-2013 (IEC 61000-3-12:2004). Совместимость технических средств. Электромагнитные нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2020. 26 с.

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

7. Робертс С., Рентюк В. Переменный ток — начало начал // *Компоненты и технологии*. 2021. № 11. С. 98-103. EDN: LTHMPF. EDN: LTHMPF.

8. Бхалла А. Вы за SiC или кремний? Тенденции развития и проблемы применения sic в приложениях. Часть 1 // *Силовая электроника*. 2020. № 1 (82). С. 8-11. EDN: BPGWME.

9. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 2. Современные тенденции применения SiC-устройств и технологии корпусирования // *Силовая электроника*. 2020. № 2 (83). С. 4-9. EDN: RTKNTV.

10. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 3. Тенденции в применении sic в электромобилях применение полупроводниковых приборов на основе SiC в преобразовании энергии электромобилей // *Силовая электроника*. 2020. № 3 (84). С. 10-15. EDN: DNMAIN.

11. Бхалла А. Вы за SiC или кремний? Часть 4. Как создать лучшие тяговые инверторы для электромобиля? Ответ: использовать SiC! // *Силовая электроника*. 2020. № 4 (85). С. 7-13. EDN: QTYDNP.

12. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 5. SiC-транзисторы сверхвысокого рабочего напряжения и суперкаскоды // *Силовая электроника*. 2020. № 5 (86). С. 12-19. EDN: MMCKSQ.

13. Бхалла А., Рентюк В. Вы за SiC или кремний? Часть 6. Использование полевых SiC-транзисторов в блоках питания центров обработки данных и телекоммуникационного оборудования // *Силовая электроника*. 2020. № 6 (87). С. 16-23. EDN: DYAKQG.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2021618552. Встроенное программное обеспечение контроллера управления устройства быстрой зарядки аккумулятора электромобиля по стандарту CHADEMO / М.А. Архаткин (РФ). 2021617963,

Заявлено 28.05.2021; Опубл. 28.05.2021. EDN: UZSZXW.

15. Хазиева Р.Т., Кантюков Н.Р. Разработка модели зарядной станции для электромобиля // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2024. Т. 20. № 2. С. 64-75. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-64-75. EDN: BBTOXC.

16. Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Афлятунов Р.Р. О возможности использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в составе гибридных фильтрокомпенсирующих устройств // *Зава-лишинские чтения — 22: сб. докл. XVII Между-нар. конф. по электромеханике и робототехнике*. СПб.: ГУАП, 2022. С. 130–132. EDN: SHQLSL.

17. Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т. Исследование филь-трокомпенсирующей функции многофункцио-нального интегрированного электромагнитного компонента в составе системы индукционного нагрева // *Электротехнические и информацион-ные комплексы и системы*. 2022. Т. 18, № 1. С. 95–106. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-95-106. EDN: RGTXGE.

18. Хазиева Р.Т., Купцов Д.В. Повышение энергетической эффективности зарядных устройств при помощи многофункционального интегрированного электромагнитного компо-нента // *Электротехнические и информацион-ные комплексы и системы*. 2024. Т. 20. № 3. С. 56-66. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-56-66. EDN: SYMXST.

19. Khazieva R.T., Aflyatunov R.R., Vasil'ev P.I. Modeling an Efficient Capacitive Storage Charge System in MatLab // *The International Conference on Battery for Renewable Energy and Electric Vehicles (ICB-REV) 2022*. 2023, 2833 (1), 020039. DOI: 10.1063/5.0151635.

20. Хазиева Р.Т., Купцов Д.В. Анализ схемотехнических решений и способов повышения энергетической эффективности и зарядных устройств // *Электротехнические и информаци-онные комплексы и системы*, 2023. Т. 19. № 2. С. 73-79. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-73-79. EDN: ANDUIS.

21. Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Афлятунов Р.Р., Васильев П.И. Моделирование электромагнитных процессов в фильтрокомпенсирующем устройстве в составе системы заряда емкостного накопителя // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. Т. 19. № 1. С. 82-92. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-82-92. EDN: WTWLOZ.

22. Саттаров Р.Р., Хазиева Р.Т., Иванов М.Д., Соловьев Б.А. New Charger for Electric

Vehicles Based on an Integrated Component «Indukon» // XVI International IEEE Scientific and Technical Conference «2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Omsk, 15–17 November 2022. Omsk: Изд-во Омского государственного технического университета, 2022. С. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014886.

23. Хазиева Р.Т., Купцов Д.В. Обзор патентных исследований в области устройств заряда емкостных накопителей // Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий», Уфа, 13–16 апреля 2022. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. С. 132-138.

24. Хазиева Р.Т., Купцов Д.В. Анализ динамики патентования устройств заряда емкостных накопителей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15. № 3. С. 41-44. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-41-44. EDN: GOYICU.

References

1. Ryazapov G.M., Domanov V.I. Analiz i perspektiva razvitiya zaryadnykh ustroystv dlya elektromobilei [Analysis and Prospects for the Development of Charging Devices for Electric Cars]. *Materialy VI Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve»*: v 2 t. [Materials of the VI National Scientific and Practical Conference «Instrument Making and Automated Electric Drive in the Fuel and Energy Complex and Housing and Communal Services»: in 2 vol.]. Kazan', 2020, Vol. 2, pp. 20-22. EDN: RVEEUM. [in Russian].

2. Vakhrushev M.A. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya zaryadnykh stantsii dlya elektromobilei [Analysis of the Efficiency of Using Charging Stations for Electric Vehicles]. *Stolypinskii vestnik — Stolypin Annals*, 2022, No. 4, pp. 57–70. EDN: ZPSZGO. [in Russian].

3. *Vidy zaryadnykh stantsii elektromobilei* [Types of Electric Vehicle Charging Stations] [Electronic Resource]. URL: https://hybrids.ru/useful_materials/articles/vid_i_tipy_zaryadnyh_stancij. [in Russian].

4. *Kontroller zaryadki elektromobilya* [Electric Vehicle Charging Controller]. [Electronic Resource]. URL: <https://prosto.energy/blogs/news/kontroller-zaryada-elektromobilya-on-zhe-secc>. [in Russian].

5. *GOST 30804.3.12-2013 (IEC 61000-3-12:2004). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv. Elektromagnitnye normy garmonicheskikh*

sostavlyayushchikh toka, sozdavaemykh tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom bolee 16 A, no ne bolee 75 A (v odnoi faze), podklyuchaemymi knizkovol'nym raspredelitel'nym sistemam elektrosnabzheniya. Normy i metody ispytaniy [State Standard 30804.3.12-2013 (IEC 61000-3-12:2004). Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 3-12: Limits — Limits for Harmonic Currents Produced by Equipment Connected to Public Low-Voltage Systems with Input Current >16 A and ≤ 75 A per Phase, MOD). Moscow, Standartinform Publ., 2020. 26 p. [in Russian].

6. Konesev S. G., Khazieva R. T. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie induktivno-emkostnykh preobrazovatelei [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: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38>. EDN: WFNDMP. [in Russian].

7. Roberts S., Rentyuk V. Peremennyi tok — nachalo nachal [Alternating Current — the Beginning of the Beginning]. *Komponenty i tekhnologii — Components and Technologies*, 2021, No. 11, pp. 98-103. EDN: LTHMPF. [in Russian].

8. Bkhalla A. Vy za SiC ili kremnii? Tendentsii razvitiya i problemy primeneniya sic v prilozheniyakh. Chast' 1 [Are You for SiC or Silicon? Development Trends and Problems of Using SiC in Applications. Part 1]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 1 (82), pp. 8-11. EDN: BPGWME. [in Russian].

9. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 2. Sovremennye tendentsii primeneniya SiC-ustroystv i tekhnologii korpusirovaniya [Are You for SiC or Silicon? Part 2. Current Trends in the Use of SiC Devices and Packaging Technology]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 2 (83), pp. 4-9. EDN: RTKNTV. [in Russian].

10. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 3. Tendentsii v primenenii SiC v elektromobilyakh primeneniye poluprovodnikovyykh priborov na osnove SiC v preobrazovanii energii elektromobilei [Are You for SiC or Silicon? Part 3. Trends in the Use of SiC in Electric Vehicles; the Use of Semiconductor Devices Based on SiC in Energy Conversion of Electric Vehicles]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 3 (84), pp. 10-15. EDN: DNMAIN. [in Russian].

11. Bkhalla A. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 4. Kak sozdat' luchshie tyagovye inventory dlya

elektromobilya? Otvet: ispol'zovat' SiC! [Are You for SiC or Silicon? Part 4. How to Create the Best Traction Inverters for an Electric Vehicle? Answer: Use SiC!]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 4 (85), pp. 7-13. EDN: QTYDNP. [in Russian].

12. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 5. SiC-tranzistory sverkhvysokogo rabocheho napryazheniya i superkaskody [Are You for SiC or Silicon? Part 5. Ultra-High Operating Voltage SiC Transistors and Supercascodes]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 5 (86), pp. 12-19. EDN: MMCKSQ. [in Russian].

13. Bkhalla A., Rentyuk V. Vy za SiC ili kremnii? Chast' 6. Ispol'zovanie polevykh SiC-tranzistorov v blokakh pitaniya tsentrov obrabotki dannykh i telekommunikatsionnogo oborudovaniya [Are You for SiC or Silicon? Part 6. Use of Field-Effect SiC Transistors in Power Supplies for Data Processing Centers and Telecommunications Equipment]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2020, No. 6 (87), pp. 16-23. EDN: DYAKQG. [in Russian].

14. Arhatkin M.A. *Vstroennoe programmnnoe obespechenie kontrollera upravleniya ustroystva bystroi zaryadki akkumulyatora elektromobilya po standartu CHADEMO* [The Built-In Software of the Controller for Controlling the Fast Charging Device of the Electric Vehicle Battery on CHADEMO Standards]. Certificate of State Registration of a Computer Program No. RU 2021618552, 2021. EDN: UZSZXW. [in Russian].

15. Khazieva R.T., Kantyukov N.R. Razrabotka modeli zaryadnoi stantsii dlya elektromobilya [Development of a Charging Station Model for an Electric Vehicle]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, Vol. 20, No. 2, pp. 64-75. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-2-64-75. EDN: BBTOXC. [in Russian].

16. Khazieva R.T., Vasil'ev P.I., Aflyatunov R.R. O vozmozhnosti ispol'zovaniya mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta v sostave gibridnykh fil'trokompensiruyushchikh ustroystv [On the Possibility of Using a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component as Part of Hybrid Filter Compensating Devices]. *Sbornik dokladov XVII Mezhdunarodnoi konferentsii po elektromekhanike i robototekhnike «Zavalishinskie chteniya — 2022»* [Collection of Reports of XVII International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin Readings — 2022»]. Saint-Petersburg: GUAP Publ., 2022, pp. 130-132. EDN: SHQLSL. [in Russian].

17. Aflyatunov R.R., Vasil'ev P.I., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Issledovanie fil'trokompensiruyushchei funktsii mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta v sostave sistemy induktsionnogo nagreva [Study of the Filter-Compensating Function of a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component as a Part of the Induction Heating System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2022, Vol. 18, No. 1, pp. 95-106. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-95-106. EDN: RGTXGE. [in Russian].

18. Khazieva R.T., Kuptsov D.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti zaryadnykh ustroystv pri pomoshchi mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta [Increasing the Energy Efficiency of Chargers by Using a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, Vol. 20, No. 3, pp. 56-66. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-56-66. EDN: SYMXST. [in Russian].

19. Khazieva R.T., Aflyatunov R.R., Vasil'ev P.I. Modeling an Efficient Capacitive Storage Charge System in MatLab. *The International Conference on Battery for Renewable Energy and Electric Vehicles (ICB-REV) 2022, 2023*, 2833 (1), 020039. DOI: 10.1063/5.0151635.

20. Khazieva R.T., Kuptsov D.V. Analiz skhemotekhnicheskikh reshenii i sposobov povysheniya energeticheskoi effektivnosti i zaryadnykh ustroystv [Analysis of Circuit Solutions and Ways to Increase Energy Efficiency]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, Vol. 19, No. 2, pp. 73-79. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-73-79. EDN: ANDUIS. [in Russian].

21. Khazieva R.T., Kirillov R.V., Aflyatunov R.R., Vasil'ev P.I. Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v fil'trokompensiruyushchem ustroystve v sostave sistemy zaryada emkostnogo nakopitelya [Simulation of Electromagnetic Processes in the Filter-Compensator Device as Part of the Charging System of the Capacitive Storage]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, Vol. 19, No. 1, pp. 82-92. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-82-92. EDN: WTWLOZ. [in Russian].

22. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Ivanov M.D., Solov'ev B.A. New Charger for Electric Vehicles Based on an Integrated Component «Indukon». *XVI International IEEE Scientific and*

Technical Conference «2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Omsk, 15–17 November 2022. Omsk, Izd-vo Omskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014886. [in Russian].

23. Khazieva R.T., Kuptsov D.V. Obzor patentnykh issledovaniy v oblasti ustroystv zaryada emkostnykh nakopitelei [Review of Patent Studies in the Field of Capacitive Storage Charging Devices]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii», Ufa, 13–16 April 2022. [Collection of Scientific Papers of the VII*

International Scientific and Technical Conference «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises», Ufa, 13–16 aprelya 2022]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2022, pp. 132–138. [in Russian].

24. Khazieva R.T., Kuptsov D.V. Analiz dinamiki patentovaniya ustroystv zaryada emkostnykh nakopitelei [Analysis of Patenting of Inductive-Capacitive Transducers for Current Stabilization Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2019, Vol. 15, No. 3, pp. 41–44. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-41-44. EDN: GOYICU. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 06.12.2024; одобрена после рецензирования 13.12.2024; принята к публикации 25.12.2024.

The article was submitted 06.12.2024; approved after reviewing 13.12.2024; accepted for publication 25.12.2024.

Научная статья

УДК 620.92

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-77-84

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯ ПЕЛЬТЬЕ

**Богдан Алексеевич Соловьев****Bogdan A. Solovev***аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия***Гиорги Кахаберович Гамисония****Giorgi K. Gamisonia***аспирант кафедры «Уфимская высшая школа экономики и управления»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия***Лаша Раулиевич Гвилава****Lasha R. Gvilava***магистрант кафедры «Техносферная безопасность и управление качеством»,
Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия***Буллат Ильшатович Загидуллин****Bulat I. Zagidullin***студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*

Актуальность

Альтернативная энергетика, основанная на использовании энергии ветра и солнца, в настоящее время является довольно распространённым явлением, однако зависимость от погоды и времени суток, высокая начальная стоимость и сложности с утилизацией заставляют задуматься о других источниках возобновляемой энергии. Рассматриваемый модуль, основанный на эффекте Зеебека, вырабатывает мощность в несколько ватт, его можно применять для питания электроники с невысоким энергопотреблением.

Цель исследования

Целью работы является исследование эффективности производства электроэнергии с использованием эффекта Зеебека.

Ключевые слова

модуль Пельтье,
эффект Зеебека,
термопара, разность
температур,
выходная мощность

Методы исследования

Физические основы термоэлектричества, математическое моделирование.

Результаты

Выполнено исследование работа схемы для выработки электроэнергии из источника тепла и проанализировано использование модуля Пельтье для производства электроэнергии. При использовании свечи как источника тепла и льда в качестве охлаждающего материала конструктивный модуль будет генерировать общее выходное напряжение 7,6 В и постоянный ток 4,3 мА с общей мощностью 31,6 Вт, чего достаточно, например, для зарядки мобильного телефона.

Для цитирования: Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Гвилава Л. Р., Загидуллин Б. И. Исследование производства электроэнергии с использованием модуля Пельтье // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 77-84. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-77-84>.

Original article

STUDY OF ELECTRICITY PRODUCTION USING PELTIER MODULE

Relevance

Alternative energy based on wind and solar power is nowadays quite common, but the dependence on weather and time of day, high initial cost and difficulties in utilization make us think about other sources of renewable energy. The module under consideration, based on the Seebeck effect, generates power in small watts, which can be applied to low power consumption electronics. **Aim of research**

The aim of the study is efficient power generation based on the utilization of the Seebeck effect.

Research methods

Physical basics of thermoelectricity, mathematical modeling.

Results

The study developed a model for generating electricity from a heat source and analyzed the use of Peltier module for electricity generation. Using candle as heat source and ice as coolant, the design module will produce a total output voltage of 7.6 V and DC current of 4.3 mA with a total power of 31.64 W, which is enough to charge a cell phone, for example.

Keywords

Peltier module, Seebeck effect, thermocouple, temperature difference, output power

For citation: Solovov B. A., Gamisonia G. K., Gvilava L. R., Zagidullin B. I. Issledovaniye proizvodstva elektroenergii s ispol'zovaniyem modulya Pel't'ye [Study of Electricity Production Using Peltier Module]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 77-84 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-77-84>.

Введение

За последние десятилетия и промышленное производство, и сфера услуг пережили настоящую технологическую революцию. Сегодня в наших домах используются не только привычные электроприборы, но и всевозможные

«умные» системы, бытовая техника с удалённым управлением и прочие высокотехнологичные решения. Всё это ведёт к постоянному увеличению спроса на электроэнергию, создавая значительную нагрузку на существующую инфраструктуру и подталкивая специалистов к

поиску новых, эффективных и при этом экологических способов её выработки.

Среди современных источников энергии широкое разнообразие: нефть, газ, уголь, гидроэнергетика, солнце, ветер. Однако у каждой технологии есть свои ограничения: экономические, технологические, экологические. В итоге учёные всё чаще обращаются к альтернативным концепциям, которые ещё недавно казались смелыми экспериментами. Среди них особое внимание заслуживают термоэлектрические модули, работающие на основе эффекта Зеебека. Их принцип основан на том, что при наличии разницы температур в определённых материалах возникает электрический ток [1, 2].

Модули Пельтье, которые часто упоминаются в литературе в связи с их применением в охлаждающих устройствах, являются одним из ярких примеров реализации этого эффекта. В обычном режиме на них подается питание, и одна сторона модуля охлаждается, другая нагревается. Но если поменять подход и «подкладывать» к модулям Пельтье источник тепла с одной стороны и более низкую температуру с другой, то можно вырабатывать электроэнергию. Преимущество здесь в том, что такие модули компактны, не имеют движущихся частей и практически не создают шума. Более того, они могут утилизировать «лишнее» тепло, которое обычно просто рассеивается в окружающую среду, например отработанное тепло автомобильных двигателей или нагревательных установок.

Однако есть и препятствия. Главная проблема — пока ещё не столь высокая эффективность термоэлектрических материалов. И всё же исследования в этой области ведутся довольно активно, предлагаются новые способы повышения КПД за счёт изменения химического состава или структуры самих материа-

лов. Уже существуют прототипы систем, где термоэлектрические модули могут генерировать энергию от бытовых печей, промышленных установок или даже от выхлопной системы автомобиля. Если учёным и инженерам удастся по эффективности достичь более конкурентных показателей, это может дать серьёзный толчок к масштабному внедрению данной технологии [3]. Именно поэтому изучение производства электроэнергии с помощью модулей Пельтье сегодня остаётся не просто любопытной идеей, а вполне актуальным направлением научных изысканий и технологических разработок. В условиях растущего спроса на электричество и стремления к экологическому равновесию оно способно стать важным звеном на пути к будущему, где энергия будет производиться более рационально и с меньшим ущербом для окружающей среды.

Теория выработки электроэнергии при помощи термоэлементов

Во многих методах генерации электроэнергии тепло, выделяемое в процессе горения топлива, после воздействия на преобразователь тепловой энергии в механическую, просто теряется в качестве побочного продукта в окружающую среду, если не предусмотрено комбинированное производство тепловой и электрической энергий. Если такое тепло можно преобразовать даже в небольшом диапазоне мощности в несколько милливатт, то его можно будет повторно использовать для питания в домашнем освещении малой мощности и в электронных продуктах с низким энергопотреблением. Согласно закону термодинамики, также известному как закон сохранения энергии, энергия не может создаваться или разрушаться, но может трансформироваться из одной формы в другую. Термоэлектрическое устройство, которое работает по прин-

ципу эффекта Зеебека, преобразует температурный градиент в напряжение, и наоборот.

$$\varepsilon = \alpha_{12}(T_2 - T_1),$$

здесь α_{12} — термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термо-ЭДС) металла 1 по отношению к металлу 2, которая является характеристикой обоих металлов термопары.

На рисунке 1 показан принцип базового производства электроэнергии с помощью термопары, где оба спая поддерживаются при разном температурном градиенте, т.е. одна сторона нагревается источником тепла, а другая сторона прикреплена к радиатору. Выходное напряжение прямо пропорционально разнице температур между двумя сторонами модуля. Поскольку напряжение прямо на выходе устройства низкое, его необходимо дополнительно усиливать с помощью схемы на паре транзисторов Дарлингтона [4–6].

Экспериментальная часть

Существуют следующие разновидности устройств Пельтье:

— SP1848-27145 позиционируется как генераторный элемент Пельтье (т.е. он лучше приспособлен к выработке электроэнергии, чем к охлаждению);

— TEC1-12706 — более распространённая «охлаждающая» модель, которая теоретически тоже может работать как генератор, но эффективность у неё ниже, чем у специализированных генераторных модулей [7, 8].

В целях изучения зависимости выдаваемого напряжения от разницы температур, а, следовательно, и выдаваемой мощности в эксперименте используются четыре устройства Пельтье, соединённых последовательно и закреплённых на тонком листе олова, поскольку олово — самый дешёвый металл с очень низкой удельной теплоемкостью. Внизу собранной конструкции размещается свеча, которая будет нагревать лист с мгновенным распределением тепла в сторону горячего спая модулей, а сверху — кубик льда, служащий в качестве охлаждающего агента.

Выходное напряжение возрастает линейно с ростом разницы температур между двумя переходами. Однако у каж-

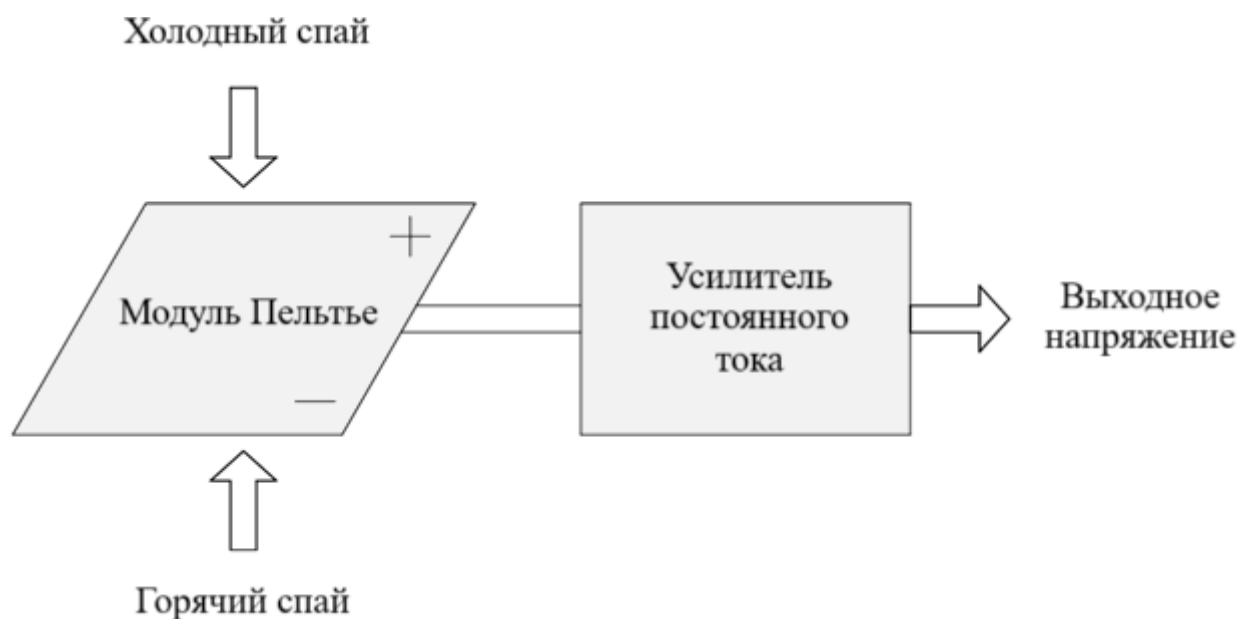


Рисунок 1. Производство электроэнергии с помощью модуля Пельтье

Figure 1. Electricity generation using a Peltier module

дого модуля существует максимальная температура, после достижения которой напряжение перестанет увеличиваться и останется постоянным. В целях безопасности модуль эксплуатируется ниже номинального максимального значения. Экспериментально полученные характеристики показывают, что выходная мощность действительно прямо пропорциональна разнице температур (рисунок 2) [9–11].

В таблице 1 приведены результаты эксперимента, показания приборов снимались тридцать раз каждые две минуты. Для расчетов генерации электроэнергии общее сопротивление нагрузки модулей Пельтье составляет 11,88 Ом, из снятых показаний получены значения температуры холодной стороны, температуры горячей стороны и напряжения, вырабатываемого в течение указанного времени. По этим параметрам мы можем рассчитать ток по закону Ома:

$$I = \frac{V}{R},$$

где I — ток, протекающий через сопротивление нагрузки Пельтье; V — напряжение, полученное в течение заданного времени; R — сопротивление нагрузки элемента Пельтье.

Таким образом, можно найти мощность P , отдаваемую внешней нагрузке:

$$P = I \cdot V.$$

Таким образом, из эксперимента видно, что схема вырабатывает в среднем 30,04 Вт.

Согласно паспортным данным, приведенным на официальном сайте производителя, рекомендуемая мощность для зарядки мобильного телефона компании Apple iPhone составляет 20 Вт. Соответственно, данная модель позволит осуществлять зарядку телефона при номинальной работе модуля.

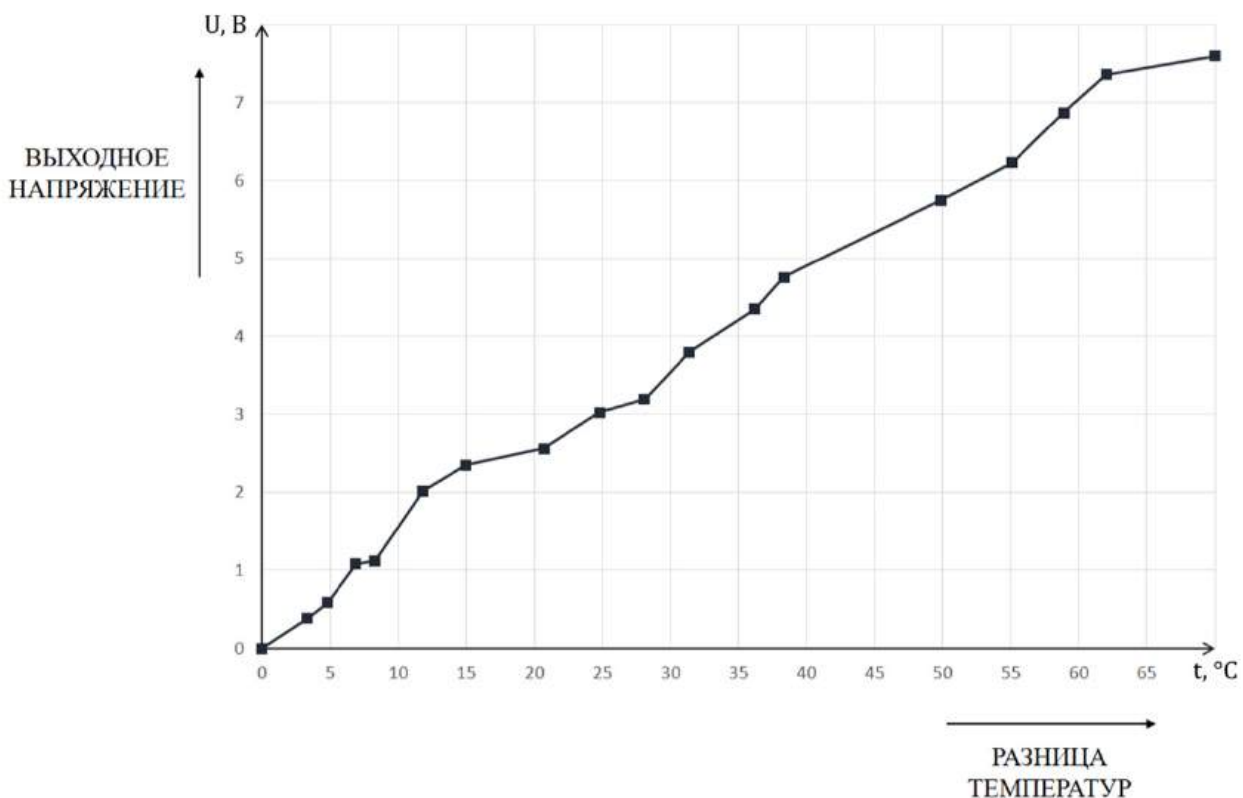


Рисунок 2. Зависимость напряжения от разницы температур Пельтье

Figure 2. Voltage dependence on Peltier temperature difference

Таблица 1. Производство электроэнергии с помощью модуля Пельтье**Table 1.** Electricity generation with Peltier module

№	Время, мин	Температура горячей стороны, °С	Температура холодной стороны, °С	Разность температур, °С	Напряжение, В	Регулируемое напряжение, В	Ток, А	Мощность, Вт
1	2	33,0	15,0	18,0	11,50	19,10	0,97	11,13
2	4	39,0	16,0	23,0	12,00	19,20	1,01	12,12
3	6	42,5	16,0	26,5	13,50	19,10	1,14	15,34
4	8	45,9	17,0	28,9	14,90	19,30	1,25	18,69
5	10	50,7	17,5	33,2	15,90	19,20	1,34	21,28
6	12	54,9	18,1	36,8	17,07	19,60	1,44	24,53
7	14	59,1	19,0	40,1	18,24	19,50	1,54	28,00
8	16	63,3	19,6	43,7	19,41	19,80	1,63	31,71
9	18	67,5	20,4	47,1	19,70	19,50	1,66	32,67
10	20	71,8	20,9	50,8	19,80	19,40	1,67	33,00
11	22	76,0	21,6	54,4	20,00	19,50	1,68	33,67
12	24	80,2	22,2	58,0	19,90	19,60	1,68	33,33
13	26	84,4	22,9	61,5	19,80	19,80	1,67	33,00
14	28	88,6	23,5	65,1	19,70	19,20	1,66	32,67
15	30	92,9	24,2	68,6	19,90	19,20	1,68	33,33
16	32	94,2	24,9	69,3	20,10	19,12	1,69	34,01
17	34	96,5	25,5	71,0	19,80	19,54	1,67	33,00
18	36	97,3	25,6	71,7	19,90	19,65	1,68	33,33
19	38	99,2	25,5	73,7	20,30	19,85	1,71	34,69
20	40	100,8	25,7	75,1	20,40	19,62	1,72	35,03
21	42	102,3	25,4	76,9	20,30	19,35	1,71	34,69
22	44	103,9	24,6	79,3	20,30	19,78	1,71	34,69
23	46	105,5	25,7	79,8	20,40	19,25	1,72	35,03
24	48	107,1	25,3	81,8	19,90	19,65	1,68	33,33
25	50	108,7	25,9	82,8	20,10	19,75	1,69	34,01
26	52	110,2	25,6	84,6	19,90	19,32	1,68	33,33
27	54	111,8	25,7	86,1	20,00	19,21	1,68	33,67
28	56	113,4	25,7	87,7	19,80	19,24	1,67	33,00
29	58	115,0	25,8	89,2	19,70	19,17	1,66	32,67
30	60	116,6	25,8	90,7	19,60	19,09	1,65	32,34
Средняя мощность			30,04 Вт					

Выводы

Преимущества использования модуля Пельтье для производства электроэнергии:

— *эффективность* — модуль Пельтье позволяет производить больше энергии при меньших затратах за счет преобразования тепловой энергии в электрическую;

— *надежность* — модуль Пельтье имеет долгий срок службы и не требует постоянного обслуживания, что делает его надежным и удобным в использовании;

— *экологичность* — производство электроэнергии с помощью модуля

Пельтье не требует сжигания топлива или выбросов вредных веществ, что делает его экологически чистым методом производства энергии;

— *гибкость* — модуль Пельтье можно использовать в различных условиях и для различных целей, что делает его универсальным инструментом для производства электроэнергии.

Таким образом, использование модуля Пельтье для производства электроэнергии является перспективным инновационным методом генерации, который в скором времени найдет применение в различных отраслях промышленности и повседневной жизни.

Список источников

1. Гнусин П.И. Исследование эффективности элемента Пельтье при различных режимах работы // Виденанука: сетевой журнал. 2016. №1(1). URL: <https://videonauka.ru/stati/13-tekhnicheskie-nauki/40-issledovanie-effektivnosti-elementa-pelte-pri-razlichnykh-rezhimakh-raboty> (дата обращения: 03.10.2024).

2. Мошин А.А., Ключев Р.В. Использование альтернативных источников энергии в промышленности // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2021. Т. 6. № 3 (25). С. 81. DOI: 10.25744/genb.2021.62.57.008. EDN: SEWTPZ.

3. Муртузов Д.К., Бруслова О.В. Исследование элемента Пельтье // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 6-6. С. 75-79. EDN: MFHNEF.

4. Романов К.В., Моторин А.В., Соломин Е.В., Ковалёв А.А., Дьяченко И.И., Галеев Р.Г. Моделирование термоэлектрического модуля Пельтье в режиме генерации электроэнергии в среде ANSYS Workbench // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 4. С. 57–64. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64. EDN: JUVQPL.

5. Русинов В.Л., Усенко В.И., Валуи Р.А. Термоэлектрический модуль TEC1-12706 // Вестник Амурского государственного университета. Серия: естественные и экономические науки. 2019. № 85. С. 67-70. EDN: ANZQVI.

6. Саблин М.А., Саблина Г.В., Трубин В.Г. Модули Пельтье SP1848 в режимах теплопереноса и генерации электрической энергии, и их практическое применение // Известия Томского

политехнического университета. Промышленная кибернетика. 2024. Т. 2. № 2. С. 45-51. DOI: 10.18799/29495407/2024/2/52.

7. Шостаковский П. Альтернативные источники электрической энергии промышленного применения на основе термоэлектрических генераторов // Компоненты и технологии. 2013. № 5. С. 133-138. EDN: PZFXJR.

8. Шостаковский П. Современные термоэлектрические источники питания электронных устройств // Компоненты и технологии. 2015. № 1. С. 90–95. EDN: THVGMT.

9. Соловьев Б.А., Гамисония Г.К., Димукашева Г.Е., Колومهц Д.А. Преобразование тепловой энергии в электричество: потенциал и эффективность термоэлектрических генераторов на основе элементов Пельтье // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. Т. 20, № 1. С. 55-64. DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-1-55-64. EDN FHRHII.

10. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного электропитания // Компоненты и технологии. 2010. № 113. С. 131-138. EDN: NCDIYJ.

11. Юферова А.В. Термоэлектрический модуль // Аллея науки. 2018. Т. 8. № 11. С. 24-27. EDN: YXHZGH.

References

1. Gnusin P.I. Issledovanie effektivnosti elementa Pel'te pri razlichnykh rezhimakh raboty [Study of the Efficiency of the Peltier Element under Various Operating Modes]. *Videonauka: setevoi zhurnal — Videonauka: Online Journal*, 2016, No. 1 (1). URL: <https://videonauka.ru/>

stati/13-tekhnicheskie-nauki/40-issledovanie-effektivnosti-elementa-pelte-pri-razlichnykh-rezhimakh-raboty (accessed 03.10.2024). [in Russian].

2. Moshin A.A., Klyuev R.V. Ispol'zovanie al'ternativnykh istochnikov energii v promyshlennosti [Use of Alternative Energy Sources in Industry]. *Groznenskiy estestvennonauchnyi byulleten'* — *Grozny Natural Science Bulletin*, 2021, Vol. 6, No. 3 (25), pp. 81. DOI: 10.25744/genb.2021.62.57.008. EDN: SEWTPZ. [in Russian].

3. Murtuzov D.K., Bruslova O.V. Issledovanie elementa Pel't'e [Study of Peltier Element]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* — *Current Scientific Research in the Modern World*, 2021, No. 6-6, pp. 75-79. EDN: MFHHEF. [in Russian].

4. Romanov K.V., Motorin A.V., Solomin E.V., Kovalyov A.A., D'yachenko I.I., Galeev R.G. Modelirovanie termoelektricheskogo modulya Pel't'e v rezhime generatsii elektroenergii v srede ANSYS [Workbench Simulating the Peltier Thermoelectric Module in the Electricity Generation Mode in the ANSYS Workbench Environment]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* — *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2018, Vol. 16, No. 4, pp. 57–64. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-64. EDN: JUVQPL. [in Russian].

5. Rusinov V.L., Usenko V.I., Valui R.A. Termoelektricheskii modul' TEC1-12706 [Thermoelectric Module TEC1-12706]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye i ekonomicheskie nauki Bulletin of Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences*, 2019, No. 85. pp. 67-70. EDN: ANZQVI. [in Russian].

6. Sablin M.A., Sablina G.V., Trubin V.G. Moduli Pel't'e SP1848 v rezhimakh teploperenosa i generatsii elektricheskoi energii, i ikh prakticheskoe primeneniye [Peltier Modules SP1848 in the

Modes of Heat Transfer and Electrical Energy Generation and Their Practical Application]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Promyshlennaya kibernetika* — *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2024, Vol. 2, No. 2, pp. 45-51. DOI: 10.18799/29495407/2024/2/52. [in Russian].

7. Shostakovskii P. Al'ternativnye istochniki elektricheskoi energii promyshlennogo primeneniya na osnove termoelektricheskikh generatorov [Alternative Sources of Electrical Energy for Industrial Use Based on Thermoelectric Generators]. *Komponenty i tekhnologii* — *Components and Technologies*, 2013, No. 5, pp. 133-138. EDN: PZFXJR. [in Russian].

8. Shostakovskiy P. Sovremennye termoelektricheskie istochniki pitaniya elektronnykh ustroystv [Modern Thermoelectric Power Supplies for Electronic Devices]. *Komponenty i tekhnologii* — *Components and Technologies*, 2015, No. 1, pp. 90–95. EDN: THVGMT. [in Russian].

9. Solov'ev B.A., Gamisoniya G.K., Dimukasheva G.E., Kolomeets D.A. Preobrazovanie teplovoi energii v elektrichestvo: potentsial i effektivnost' termoelektricheskikh generatorov na osnove elementov [Pel't'e Conversion of Thermal Energy into Electricity: Potential and Efficiency of Thermoelectric Generators Based on Peltier Elements]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, Vol. 20, No. 1, pp. 55-64. DOI 10.17122/1999-5458-2024-20-1-55-64. EDN FHRIII. [in Russian].

10. Shostakovskii P. Termoelektricheskie istochniki al'ternativnogo elektropitaniya [Thermoelectric Sources of Alternative Power Supply]. *Komponenty i tekhnologii* — *Components and Technologies*, 2010, No. 113, pp. 131-138. EDN: NCDIYJ. [in Russian].

11. Yuferova A.V. Termoelektricheskii modul' [Thermoelectric Module]. *Alleya nauki* — *Alley of Science*, 2018, Vol. 8, No. 11, pp. 24-27. EDN: YXHZGH. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 03.12.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The article was submitted 03.12.2024; approved after reviewing 12.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.

Научная статья

УДК 519.71

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-85-92

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА НА ВЕРТОЛЁТЕ

**Алина Александровна Зайцева****Alina A. Zaitseva**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Дмитрий Константинович Кильмаков****Dmitriy K. Kilmaikov**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Вячеслав Викторович Баскаков****Vyacheslav V. Baskakov**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

Актуальность

В данной статье рассматривается задача имитации радиолокационных сигналов и контроля работоспособности системы проверки.

Рассматривается задача разработки методики радиолокационных сигналов имитатора и работоспособности системы контроля проверки.

Одной из важнейших задач в области современной радиолокации является повышение помехозащищённости радиолокационных станций (РЛС). Это означает, что РЛС должны эффективно противостоять как естественным, так и искусственным помехам, обладать низкой вероятностью перехвата излучения, поддерживать электромагнитную совместимость с другими РЛС в составе комплекса и обеспечивать высокую точность измерений параметров целей.

Цель исследования

Разработать алгоритм, который позволит проверять работоспособность радиолокационного комплекса на вертолёте.

Задачи исследования заключаются в разработке правил использования имитатора, который позволяет создавать сигналы, максимально

Ключевые слова

алгоритм, разработка, система контроля, имитатор, радиолокационный сигнал, цель, радиолокационные станции, радиотехнический комплекс, автоматизированная система контроля

приближенные к реальным эхо-сигналам, и обрабатывать их в реальном режиме работы радиотехнического комплекса.

Для этого необходимо выполнить определённые операции по выбору и установке параметров имитатора. Важно также разработать алгоритм восстановления высококачественной части блока, который позволит находить и устранять неисправности в комплексе с помощью встроенной автоматизированной системы контроля.

Результаты

Разрабатывается имитатор радиолокационных сигналов. С помощью этого имитатора можно будет тестировать различные характеристики РЛС, в частности, можно будет проверять качество алгоритмов формирования и обработки сигналов, а также разрешение и точность измерения параметров целей. Кроме того, можно будет оценить качество траекторной обработки множества целей, помехоустойчивость и энергетический потенциал РЛС и другие важные параметры.

Для цитирования: Зайцева А. А., Кильмаков Д. К., Баскаков В. В. Разработка алгоритма проверки работоспособности радиолокационного комплекса на вертолёте // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 85-92. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-85-92>.

Original article

ALGORITHM DEVELOPMENT FOR CHECKING THE OPERABILITY OF A HELICOPTER RADAR SYSTEM

Relevance

This article discusses the task of simulating radar signals and monitoring the operability of the verification system.

The task of developing a methodology for radar signals of the simulator and the operability of the verification control system is considered.

One of the most important tasks in the field of modern radar is to increase the noise immunity of radar stations. This means that radars must effectively withstand both natural and artificial interference, have a low probability of intercepting radiation, maintain electromagnetic compatibility with other radars in the complex, and ensure high accuracy in measuring target parameters.

Aim of research

The aim of research is to develop an algorithm that will allow checking the operability of the radar system on a helicopter.

The research objectives are to develop rules for using a simulator that allows you to create signals as close as possible to real echo signals and process them in the real mode of operation of the radio engineering complex.

For this, certain operations must be performed to select and set the parameters of the simulator. It is also important to develop an algorithm for restoring the high-quality part of the unit, which will allow to find and fix malfunctions in the complex using the integrated automated control system.

Results

A radar signal simulator is being developed. Using this simulator, it will be possible to test various characteristics of radar stations. In particular, it will be possible to check the quality of signal generation and processing algorithms, as well as the resolution and accuracy of measuring target parameters. In addition, it will be possible to evaluate the quality of trajectory processing of multiple targets, the noise immunity and energy potential of the radar, and other important parameters.

Keywords

algorithm, development, control system, simulator, radar signal, target, radar stations, radio engineering complex, automated control system

For citation: Zaitseva A. A., Kilmakov D. K., Baskakov V. V. Razrabotka algoritma proverki rabotosposobnosti radiolokatsionnogo kompleksa na vertolote [Algorithm Development for Checking the Operability of a Helicopter Radar System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 85-92 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-85-92>.

Введение

Актуальной проблемой современной радиолокации [1] является повышение помехозащищенности радиолокационных станций (РЛС), которая подразумевает обеспечение подавления естественных и искусственных помех, низкую вероятность перехвата излучения, электромагнитную совместимость в РЛС, а также высокие точности измерения параметров целей. Процесс проектирования помехозащищенных РЛС включает в себя процедуры анализа и синтеза оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов формирования и пространственно-временной обработки сигналов [2, 3]. Особенностью помехозащищенных станций различного назначения является использование сложномодулированных когерентных зондирующих сигналов с большой базой. Для одноантенных РЛС особенно большой интерес вызывает использование сигналов разрешением по дальности и большой длительностью когерентного накопления и базой. Такие сигналы позволяют существенно снизить пиковую мощность передатчика и обеспечить точное измерение дальности и скорости цели.

При большой дальности обнаружения воздушных и надводных целей с зондирующим сигналом, превышающим по длительности максимальную задержку на инструментальной шкале дальности, и использовании одной антенны для передачи и приема для достижения потенциальной чувствительности необходимо попеременное подключение антенны к выходу передатчика и на вход приемника.

Режим работы, который применяют в одноантенных РЛС со сложным сигнала-

лом большой длительности, отрицательно влияет на качество обнаружения помех (типа отражений от морской и земной поверхности) вследствие искажений функций неопределенности сигнала и, естественно, отклика, согласованного с сигналом фильтра при коммутации приема-передатчика [4].

Актуальность вопроса имитации радиолокационных сигналов [5, 6] следует из того, что полная проверка сложного радиолокационного комплекса затруднительна и связана с крупными материальными затратами, необходимыми для проведения большого числа летных экспериментов.

Одним из основных видов отработки аппаратуры является работа с имитатором помех и целей [7]. Задачи обработки сигналов сводятся к извлечению полезной информации из совокупности принимаемых сигналов (определению параметров сигналов), а задачи имитации – формирование сигналов с параметрами, несущими соответствующую радиолокационную информацию.

На рисунке 1 показан алгоритм проверки работоспособности системы контроля и имитации, который заключается в последовательной проверке выходных данных блока с заданными. В случае неисправности данная ячейка заменяется полностью.

Имитатор радиолокационных сигналов обеспечивает формирование сигналов, приближенных по характеристикам к реальным эхо-сигналам, присутствующим в трактах приема и обработки роботизированного технологического комплекса (РТК) при боевой работе. Назначением имитатора сигналов является формирование сигналов, позволяю-

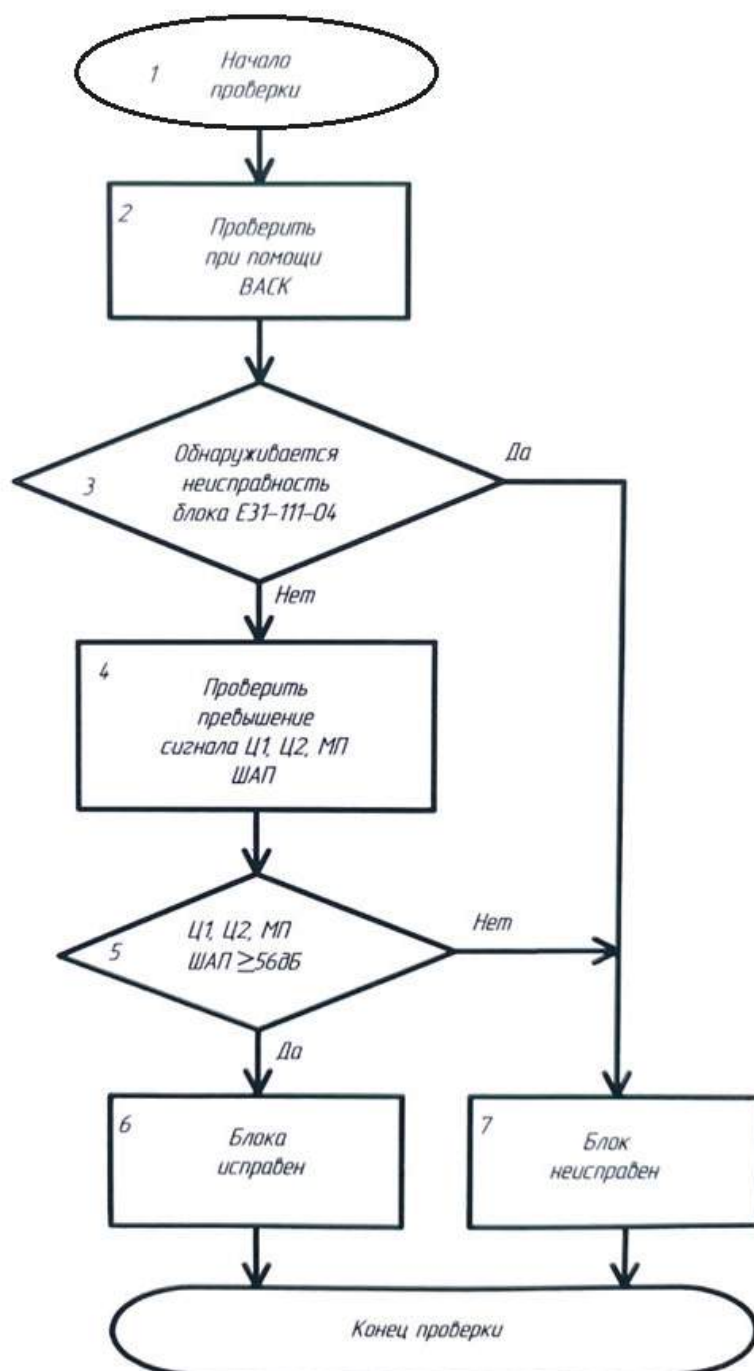


Рисунок 1. Алгоритм проверки исправности имитатора

Figure 1. The algorithm for checking the simulator serviceability

щих провести проверку качества работы отдельных систем РТК [8, 9].

В состав имитатора входят:

- формирователь «Ц1», имитирующий сигнал, отраженный от цели;
- формирователь «Ц2», имитирующий сигнал, отраженный от цели;
- формирователь «МП», имитирующий сигнал, отраженный от местных предметов;

- формирователь «ШАП», имитирующий сигнал шумовой активной помехи;
- формирователь синусоидального сигнала;
- формирователь имитируемых трасс движущихся целей.

Имитируемые сигналы имеют переменные параметры, имитирующие дальность относительно РТК (для сигналов «Ц1», «Ц2»), азимут относительно

севера (для сигналов «Ц1», «Ц2», «ШАП»), амплитуду (для всех сигналов), доплеровское смещение частоты (для сигнала «Ц1»).

Ручное управление имитатором проводится только в режиме обслуживания РТК. Вызов панели управления, включение, выключение, изменение режимов и редактирование параметров сигналов осуществляются выбором соответствующих кнопок и полей редактирования с помощью графического манипулятора.

Для включения имитатора на электронной панели управления РТК в режиме обслуживания необходимо выбрать кнопку «ИТ». При этом на индикаторе РТК появится панель управления имитатором, представленная на рисунке 2.

Для выбора нужного параметра сигнала необходимо установить указатель на поле редактирования изменяемого параметра и нажать кнопку «СЪЁМ» манипулятора. Строка, на которой расположен указатель, переходит в редактируемое состояние и меняет цвет на голубой.

С помощью кнопок цифронаборника вводится значение параметра.

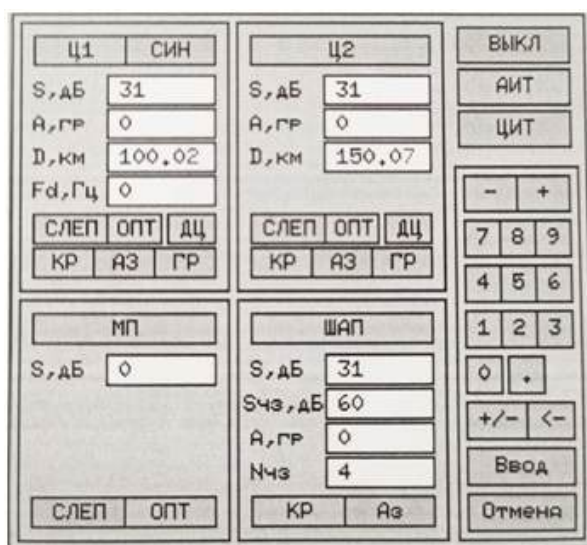


Рисунок 2. Панель управления имитатором

Figure 2. Simulator Control Panel

При выборе кнопок с цифрами 0, 1, ..., 9 в поле редактирования вводится соответствующая цифра.

При выборе кнопки «.» в поле редактирования вводится десятичная точка.

При выборе кнопки «+/-» изменяется знак числа в поле редактирования. При выборе кнопки «<-» в поле редактирования удаляется крайний правый символ.

При выборе кнопок «-» и «+» значение параметра в поле редактирования изменяется в сторону уменьшения или увеличения на шаг дискретизации:

S, дБ — на 1 дБ;

S43, дБ — на 1 дБ;

D, км — на 0,1 км;

A, гр — на 5,27';

Fd, Гц — на 1 Гц;

N43 — на 1.

При выборе кнопки «Отмена» восстанавливается значение параметра до начала редактирования.

Изменение величины параметра осуществляется кнопкой «Ввод». При этом значение отредактированного параметра сохраняется. При наборе величины параметра, выходящей за диапазон изменения параметра, высвечивается верхняя граница параметра для положительных величин и нижняя для отрицательных величин.

Отыскание и устранение неисправностей в комплексе обеспечивается встроенной автоматизированной системой контроля (АСК). Результаты поиска неисправностей, а также краткие рекомендации по дальнейшим действиям обслуживающего персонала высвечиваются на индикаторе РТК.

Восстановление работоспособности РТК производится заменой неисправного блока или конструктивно-сменного элемента с использованием имущества группового комплекта запасных инструментов и принадлежностей (ЗИП). После проведения замены выполняется проверка работоспособности комплекса.

Если исправность РТК не подтвердилась, необходимо проверить внешние соединения неисправного блока. При отсутствии неисправностей в схеме соединений следует провести отыскание неисправностей в аппаратуре, функционально связанной с блоком, адрес которого указала АСК, по маршрутам (алгоритмам), описанным ниже. Отыскание неисправных блоков и конструктивных элементов в антенне, опорно-поворотном устройстве, ВЧ-трактах осуществляется по методике завода изготовителя.

Неисправность блока ЕЗ1-10-03 определяется визуально по характеру перемещения отметки маркера на индикаторе РТК.

Отыскание неисправностей в аппаратуре сопряжения с системой радиозондирования (СРЗ) и в СРЗ проводится при помощи АСК. Предусмотрен контроль работоспособности СРЗ совместно с РЛС и поблочно при проверке СРЗ с вспомогательного пульта управления.

Отыскание неисправностей в РТК с помощью АСК осуществляется при полностью включенном изделии.

Для включения режима отыскания неисправностей с помощью манипуля-

тора блока Е31-10-03 необходимо выбрать на экранной панели управления индикатора кнопку «КТС» (контроль технического состояния). На экране индикатора должна появиться панель «КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ» с надписью работоспособности РТК «КОНТРОЛЬ ГОТОВНОСТИ РТК», что означает включение режима проверки.

По окончании проверки в случае обнаружения неисправностей в аппаратуре комплекса на экране индикатора погаснет надпись «КОНТРОЛЬ ГОТОВНОСТИ РТК» и высветятся надпись «НЕИСПРАВНОСТЬ» и код сообщения АСК о неисправности.

Кроме того, высветится в текстовом виде подробный адрес неисправности с точностью до конструктивно-сменного блока.

При отсутствии неисправностей в комплексе по окончании поиска на экране индикатора погаснет надпись «КОНТРОЛЬ ГОТОВНОСТИ РТК» и загорится надпись «РТК ГОТОВ» (рисунок 3).

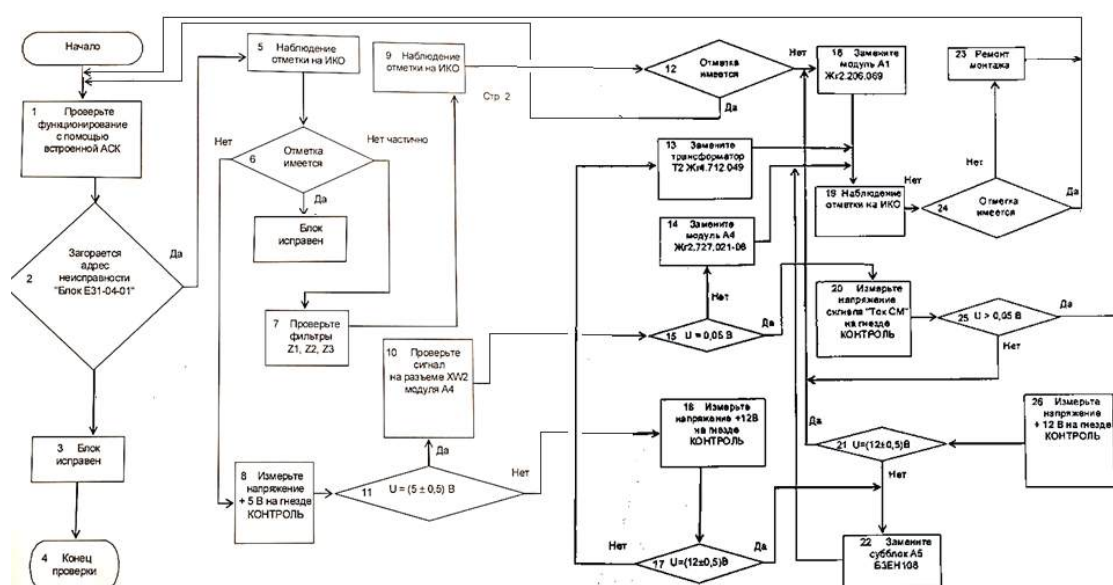


Рисунок 3. Алгоритм проверки системы в общем виде

Figure 3. The algorithm for checking the system

Заключение

В данной статье представлена разработка имитатора радиолокационных сигналов [10]. В последнее время появились новые технические возможности по разработке имитаторов в связи с наличием на рынке быстродействующих цифровых процессоров и ЭВМ, высокостабильных СВЧ-генераторов, полосковой техники, используемой для разработки приборов и элементов сверхвысоких частот (СВЧ). На имитаторах можно будет проверять различные характеристики РЛС. В частности, будут возможны проверки качества алгоритмов формирования и обработки сигнала, характеристик разрешения и точности измерения параметров целей, качество траекторной обработки массива целей, помехоустойчивость и энергопотенциал РЛС и т.д. В настоящее время для такой проверки используют микроволновые ультразвуковые линии задержки СВЧ, работающие на отражение. Они обладают существенными недостатками: фиксированная задержка малой величины (от 2 до 8 мкс), большие потери при отражении сигнала, отсутствие доплеровского сдвига эхо-сигнала, малая допустимая пиковая и средняя входная мощности сигнала, большая стоимость. В других типах имитаторов проверку характери-

стик систем обработки осуществляют на промежуточных или видео частотах. На фиксированных линиях задержки СВЧ диапазона или линиях задержки, основанных на применении спинового эха [11], невозможно проверить работу блоков первичной и вторичной обработок сигнала в РЛС совместно, учесть погрешности работы аппаратуры по высокой и сверхвысокой частот и оценить вклад ошибок каждого блока в общие ошибки системы. В настоящее время приходится осуществлять проверки РЛС по частям, а не в целом. Поэтому при установке на носителе часто оказывается, что аппаратура РЛС не удовлетворяет оговоренным ранее тактико-техническим характеристикам.

Выводы

Разрабатывается имитатор радиолокационных сигналов. С помощью этого имитатора можно будет тестировать различные характеристики РЛС, в частности, можно будет проверять качество алгоритмов формирования и обработки сигналов, а также разрешение и точность измерения параметров целей. Кроме того, можно будет оценить качество траекторной обработки множества целей, помехоустойчивость и энергетический потенциал РЛС и другие важные параметры.

Список источников

1. Коростелев А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. и др.: Теоретические основы радиолокации: учебное издание / Под ред. В.Е. Дулевича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
2. Лопарев А.В. Основы цифровой обработки сигналов и ее применение в задачах обработки навигационной информации: учебно-методическое пособие. СПб: Университет ИТМО, 2023. 64 с. EDN: HTZWHP.
3. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника, 2005. 400 с. ISBN 5-94387-158-6.

4. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 416 с. ISBN 5-93108-043-0.
5. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учеб. для вузов. М.: Радиотехника, 2004. 320 с. ISBN 5-93108-027-9.
6. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радиолокационные и радионавигационные системы: учеб. для вузов. М.: Радио и связь, 1994. 296 с. ISBN 5-88070-056-9.
7. Пат. 2787576 РФ, МПК G 01 S 7/40, G 01 S 7/38, G 09 B 9/40. Имитатор радиолокационных целей / А.С. Боков, Ю.В. Марков, А.К.

Сорокин. 2021131580, заявл. 28.10.2021; Опубл. 11.01.2023.

8. Васин В.А., Власов И.Б., Егоров Ю.М. и др. Информационные технологии в радиотехнических системах: учеб. пособие / Под ред. И.Б. Федорова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 847 с. (Сер. Информатика в техническом университете). ISBN 978-5-7038-3409-1.

9. Калиниченко С.П., Коновалов А.А., Михайлов В.Н., Нгуен Хыу Тхань. Имитатор радиолокационных сигналов микроволнового диапазона // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», сер. «Радиотехника». 2004. Вып. 1. С. 28-33.

10. Бердышев В.П., Гарин Е.Н., Фомин А.Н. [и др.] Радиолокационные системы : учебник / Под общ. ред. В.П. Бердышева. 2-е изд. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. 400 с. ISBN 978-5-7638 2479-7.

11. Амбрамов О.Ю. Имитация отражений сложных зондирующих сигналов РЛС с использованием явления электронного спинового эха: дисс. ... канд. техн. наук. Л.: ЛЭТИ, 1992.

References

1. Korostelev A.A., Klyuev N.F., Mel'nik Yu.A. i dr.: Teoreticheskie osnovy radiolokatsii: uchebnoe izdanie [Theoretical Foundations of Radar: Textbook]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Sov. Radio Publ., 1978. 608 p. [in Russian].

2. Loparev A.V. *Osnovy tsifrovoi obrabotki signalov i ee primeneniye v zadachakh obrabotki navigatsionnoi informatsii: uchebno-metodicheskoe posobie* [Fundamentals of Digital Signal Processing and Its Application in Problems of Processing Navigation Information: Textbook]. Saint-Petersburg, Universitet ITMO, 2023. 64 p. EDN: HTZWHP. [in Russian].

3. Gantmakher V.E., Bystrov N.E., Chebotarev D.V. *Shumopodobnye signaly. Analiz, sintez, obrabotka* [Noise-Like Signals. Analysis, Synthesis, Processing]. Saint-Petersburg, Nauka i tekhnika Publ., 2005. 400 p. ISBN 5-94387-158-6. [in Russian].

4. *Zashchita radiolokatsionnykh sistem ot pomekh. Sostoyaniye i tendentsii razvitiya* [Protection

of Radar Systems from Interference. Status and Development Trends]. Ed. by A.I. Kanashchenkov and V.I. Merkulov. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 416 p. ISBN 5-93108-043-0. [in Russian].

5. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy: ucheb. dlya vuzov* [Radar Systems: Textbook for Universities]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. ISBN 5-93108-027-9. [in Russian].

6. Bakulev P.A., Sosnovskii A.A. *Radiolokatsionnye i radionavigatsionnye sistemy: ucheb. dlya vuzov* [Radar and Radio Navigation Systems: Textbook for Universities]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1994. 296 p. ISBN 5-88070-056-9. [in Russian].

7. Bokov A.S., Markov Yu.V., Sorokin A.K. *Imitator radiolokatsionnykh tselei* [Radar Target Simulator]. Patent No. 2787576, 2023. [in Russian].

8. Vasin V.A., Vlasov I.B., Egorov Yu.M. e.a. *Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh: ucheb. posobie* [Information Technologies in Radio Engineering Systems: Textbook]. Ed. by I.B. Fedorov. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow, Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2011. 847 p. (Ser. Informatika v tekhnicheskoy universitete). ISBN 978-5-7038-3409-1. [in Russian].

9. Kalinichenko S.P., Kononov A.A., Mikhailov V.N., Nguen Khyu Tkhan'. *Imitator radiolokatsionnykh signalov mikrovolnovogo diapozona* [Microwave Radar Signal Simulator]. *Izv. SPbGETU «LETI», Ser. «Radiotekhnika» – News of ETU «LETI», Series «Radio Engineering»*. 2004. Issue 1, pp. 28-33. [in Russian].

10. Berdyshev V.P., Garin E.N., Fomin A.N. e.a. *Radiolokatsionnye sistemy: uchebnyy* [Radar Systems: Textbook]. Ed. by V.P. Berdyshev. 2-e izd. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t, 2023. 400 p. ISBN 978-5-7638 2479-7. [in Russian].

11. Ambramov O.Yu. *Imitatsiya otrazhenii slozhnykh zondiruyushchikh signalov RLS s ispol'zovaniem yavleniya elektronnoy spinovoy ekha: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Simulation of Reflections of Complex Radar Probing Signals Using the Phenomenon of Electron Spin Echo: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Leningrad, LETI, 1992. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2025; принята к публикации 22.01.2025.

The article was submitted 24.12.2024; approved after reviewing 15.01.2025; accepted for publication 22.01.2025.

Научная статья

УДК 519.71

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-93-100

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНФУЗОРА В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ВЕРТОЛЕТА

**Алина Александровна Зайцева****Alina A. Zaitseva**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

**Дим Ринатович Култаев****Dim R. Kultaev**

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

Актуальность

В данной статье рассматривается возможность увеличения теплоотдачи радиаторов путем установки конфузора в пространстве ресивера. Это позволит более эффективно распределять воздушные потоки, а также повысить скорость их течения, что, в свою очередь, приведет к увеличению теплоотдачи масла в окружающую среду за счет уменьшения проходного сечения.

Предложенное в статье решение позволяет улучшить распределение тепла внутри радиатора, повысить эффективность теплообмена и снизить температуру масла, что способствует увеличению срока службы оборудования и сокращению затрат на обслуживание и ремонт.

Цель исследования

Цель исследования — разработать методику, которая позволит определить оптимальные геометрические параметры конфузора в системе охлаждения силовой установки вертолётa. Это позволит повысить эффективность её работы и сократить энергопотребление.

В рамках данного исследования предстоит выполнить следующие задачи: разработать структурную схему блока сбора данных, модернизировать ресивер, разработать функциональную схему блока управления асинхронным двигателем.

Ключевые слова

методика, конфузор, система охлаждения, силовая установка, вертолет

Результаты

Предложенная методика позволит эффективно распределять воздушные потоки и повысить коэффициент теплоотдачи радиаторов. Это, в свою очередь, улучшит охлаждение масла и повысит надёжность работы силовой установки.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на экспериментальное подтверждение эффективности предложенной методики и оптимизацию конструкции конфузора с учётом конкретных условий эксплуатации вертолёт.

Для цитирования: Зайцева А. А., Култаев Д. Р. Разработка методики определения оптимальных геометрических параметров конфузора в системе охлаждения силовой установки вертолёта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 93-100. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-93-100>.

Original article

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE OPTIMAL GEOMETRIC PARAMETERS OF A CONFUSER IN THE COOLING SYSTEM OF A HELICOPTER POWER PLANT

Relevance

This article discusses the possibility of increasing the heat transfer of radiators by installing a confuser in the receiver space. This will allow for more efficient distribution of air flows, as well as increase their flow rate, which, in turn, will lead to an increase in oil heat transfer to the environment by reducing the flow section.

The relevance lies in the fact that the solution proposed in it allows to improve the heat distribution inside the radiator, increase the efficiency of heat exchange and lower the oil temperature, which helps to increase the service life of the equipment and reduce maintenance and repair costs.

Aim of research

The aim of the study is to develop a methodology that will allow determining the optimal geometric parameters of the confuser in the cooling system of the helicopter's power plant. This will increase its efficiency and reduce energy consumption.

Within the framework of this study, the following tasks are to be performed: to develop a structural diagram of the data acquisition unit, to modernize the receiver, to develop a functional diagram of the asynchronous motor control unit.

Results

Thus, the development of a methodology that will help determine the optimal confuser geometry for the cooling system of a helicopter power plant is an urgent and important task. The proposed technique will make it possible to efficiently distribute air flows and increase the heat transfer coefficient of radiators. This, in turn, will improve oil cooling and increase the reliability of the power plant.

Further research in this area may be aimed at experimentally confirming the effectiveness of the proposed technique and optimizing the design of the confuser, taking into account the specific operating conditions of the helicopter.

Keywords

methodology, confuser, cooling system, power plant, helicopter

For citation: Zaitseva A. A., Kul'taev D. R. Razrabotka metodiki opredeleniya optimal'nykh geometricheskikh parametrov konfuzora v sisteme okhlazhdeniya silovoy ustanovki vertoletov [Development of a Methodology for Determining the Optimal Geometric Parameters of a Confuser in the Cooling System of a Helicopter Power Plant]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 93-100 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-93-100>.

Введение

В настоящее время проектированию измерительных систем уделяется много времени. Делается большой акцент на применение в этих системах электронно-цифровых приборов. Высокая скорость измерения параметров, удобная форма представления информации, гибкий интерфейс, сравнительно небольшая погрешность измерения по сравнению с механическими и электромеханическими средствами измерения – все эти и многие другие преимущества делают данную систему перспективной в дальнейшем использовании ее во многих отраслях производства.

Развитие микроэлектроники и широкое применение ее изделий в промышленном производстве, в устройствах и системах управления самыми разнообразными объектами и процессами являются в настоящее время одним из основных направлений научно-технического прогресса.

Использование микроконтроллеров в изделиях не только приводит к повышению технико-экономических показателей (надежности, потребляемой мощности, габаритных размеров), но и позволяет сократить время разработки изделий и делает их модифицируемыми, адаптивными, а также позволяет уменьшить их стоимость. Использование микроконтроллеров в системах управления обеспечивает достижение высоких показателей эффективности при низкой стоимости.

Системы сбора данных основываются на использовании совершенных электронных технологий. Сейчас многие системы сбора данных, состоящие из

аналогового коммутатора, усилителя выборки-хранения, АЦП, стали размещать на одной интегральной микросхеме, что положительно повлияло на скорость обработки данных, удобство в использовании, и, конечно, же на их стоимость.

На рисунке 1 изображен вентиляторный стенд, который работает следующим образом: двигатель 1 вала 5 задает вращение вентилятору 6 со скоростью 6000 об/мин (рабочая частота). Вентилятор стыкуется с мерной трубой 7, в которой производится замер полного и статического давлений, далее напор воздуха попадает в ресивер 8, к которому крепятся масляные баки. В стенд входит насос 3, который гоняет масло в системе охлаждения. Двигатель, вентилятор и ресивер крепятся к каркасу стенда 2 хомутами.

На рисунке 2 показан модернизированный ресивер, который содержит рассекатель воздуха, который не дает ламинарному потоку переходить в турбулентный, повышая тем самым КПД вентилятора.

На рисунке 3 представлена структурная схема сбора данных.

Данная система (рисунок 3) работает следующим образом: по запросу микроконтроллера через аналоговый ключ происходит опрос датчиков вибрации и оборотов двигателя, через аналоговый мультиплексор происходит опрос датчиков давлений. Система является универсальной и предусматривает опрос 16-ти датчиков давлений, 4-х датчиков вибрации и датчика оборотов вращения вентилятора системы охлаждения.

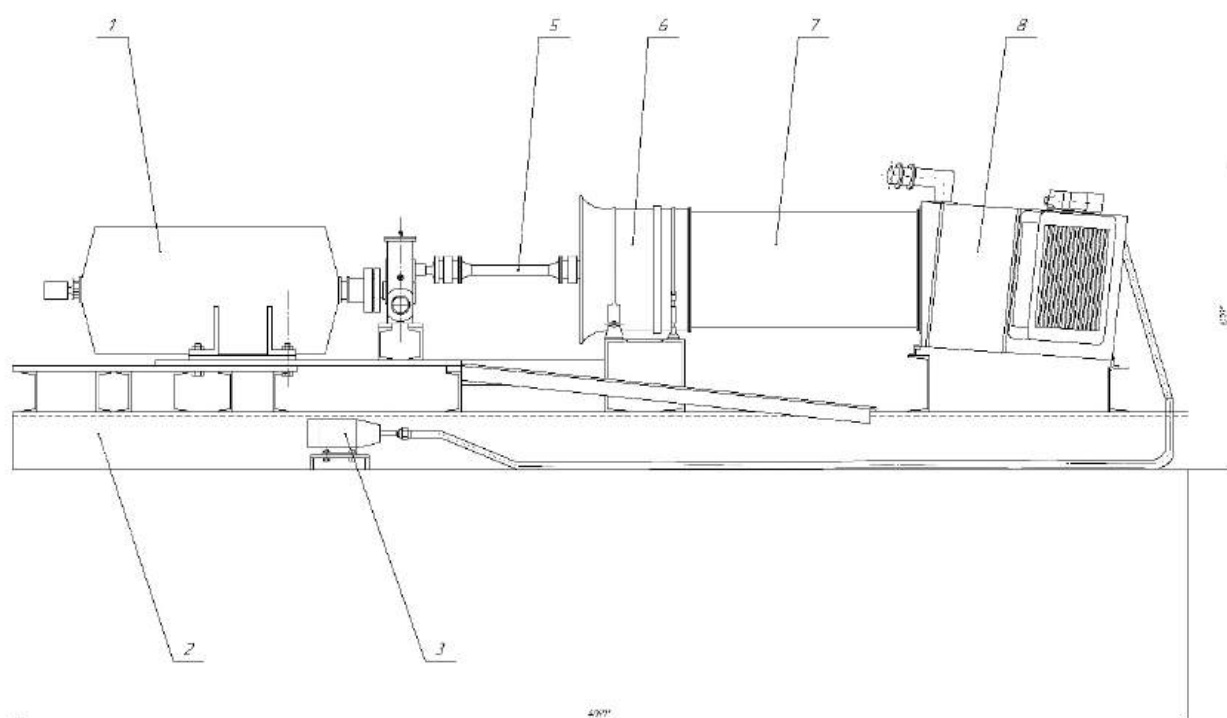


Рисунок 1. Испытательный стенд

Figure 1. Test bench

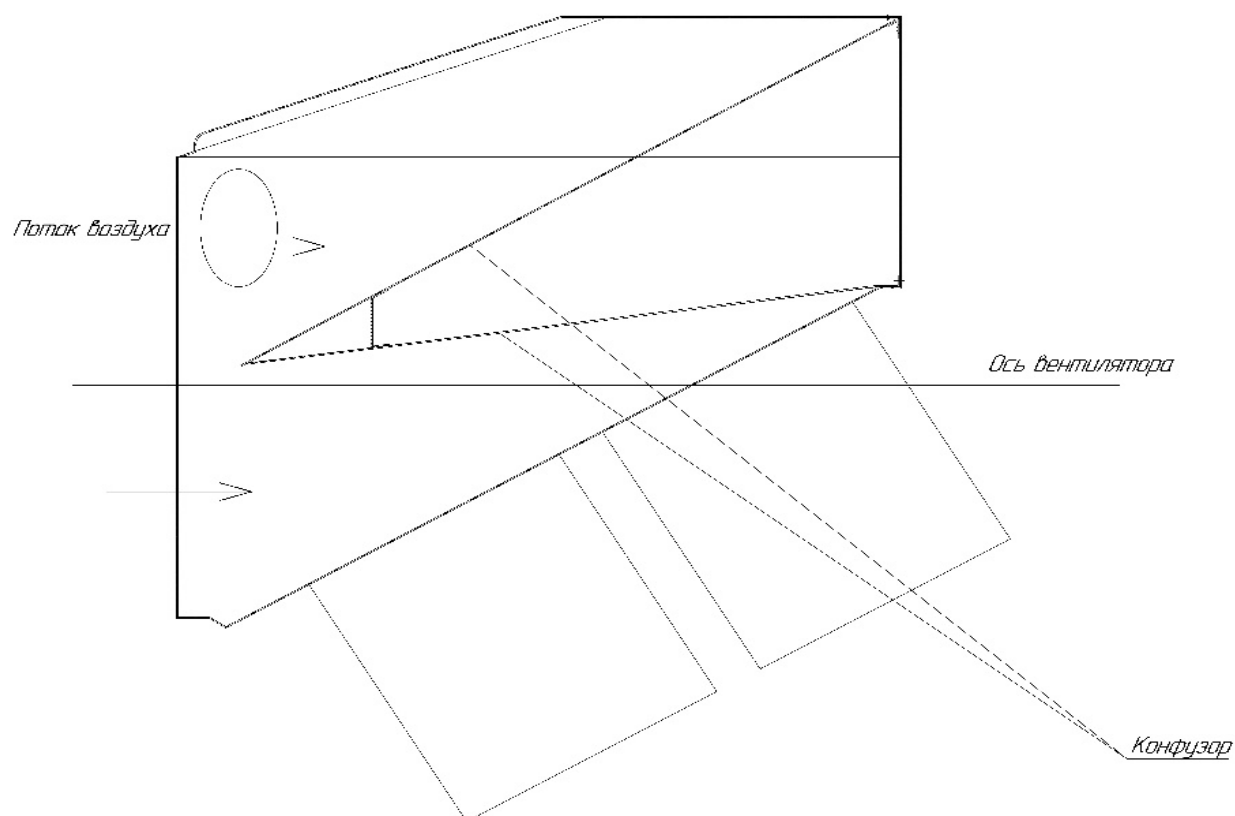


Рисунок 2. Модернизированный ресивер

Figure 2. Upgraded receiver

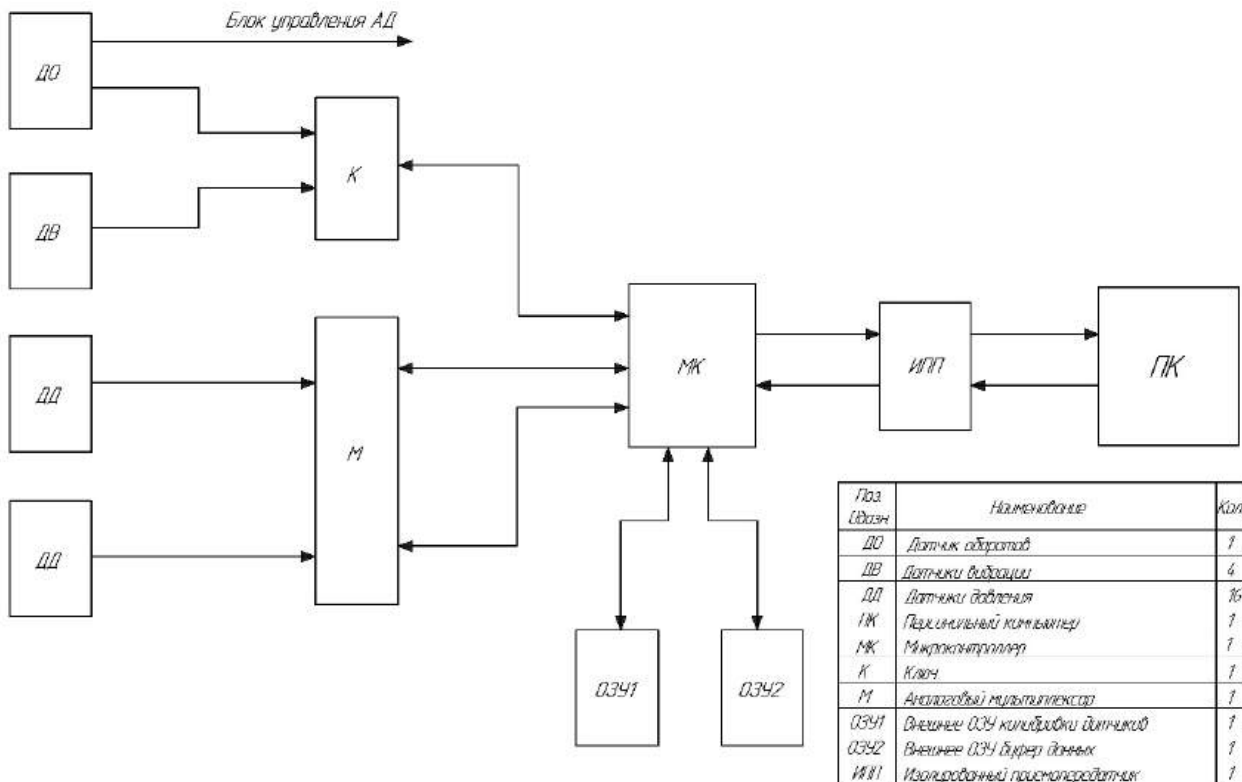


Рисунок 3. Структурная схема сбора данных

Figure 3. Block diagram of data collection

Сигнал, пришедший с датчиков, поступает на АЦП микроконтроллера, оцифровывается для дальнейшей передачи на ЭВМ через защищенный приемопередатчик, где происходит обработка полученных данных, индикация состояния в режиме реального времени в виде графиков и численных значений, архивирование и сигнализации в случае нештатных ситуаций.

Вследствие большого объема измерительной информации данные до отправки на ПК хранятся во внешнем оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) – ОЗУ2.

В ОЗУ1 хранятся калибровочные константы.

Принцип работы блока управления асинхронным двигателем показан на рисунке 4.

Устройство (рисунок 4) предназначено для управления трехфазным асинхронным электродвигателем в замкнутой системе [1]. Алгоритм изменения

напряжения от частоты является наилучшим выбором. Датчик скорости позволяет построить систему, которая увеличивает точность поддержания скорости привода переменного тока.

Высокопроизводительный 8-разрядный КМОП (комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) микроконтроллер 1886ВЕУ управляет приводом посредством чтения задания на скорость вместе с сигналами обратных связей и в соответствии с запрограммированным алгоритмом генерирует ШИМ-сигналы для силовых ключей и сигналы индикации состояния для интерфейса с пользователем [2, 3]. Указанный микроконтроллер требует минимального количества внешних компонентов.

Трехфазный инвертор формирует силовую часть системы. Его функция состоит в преобразовании сигнала 5 В ШИМ от микроконтроллера в высоковольтные управляемые импульсы, пита-

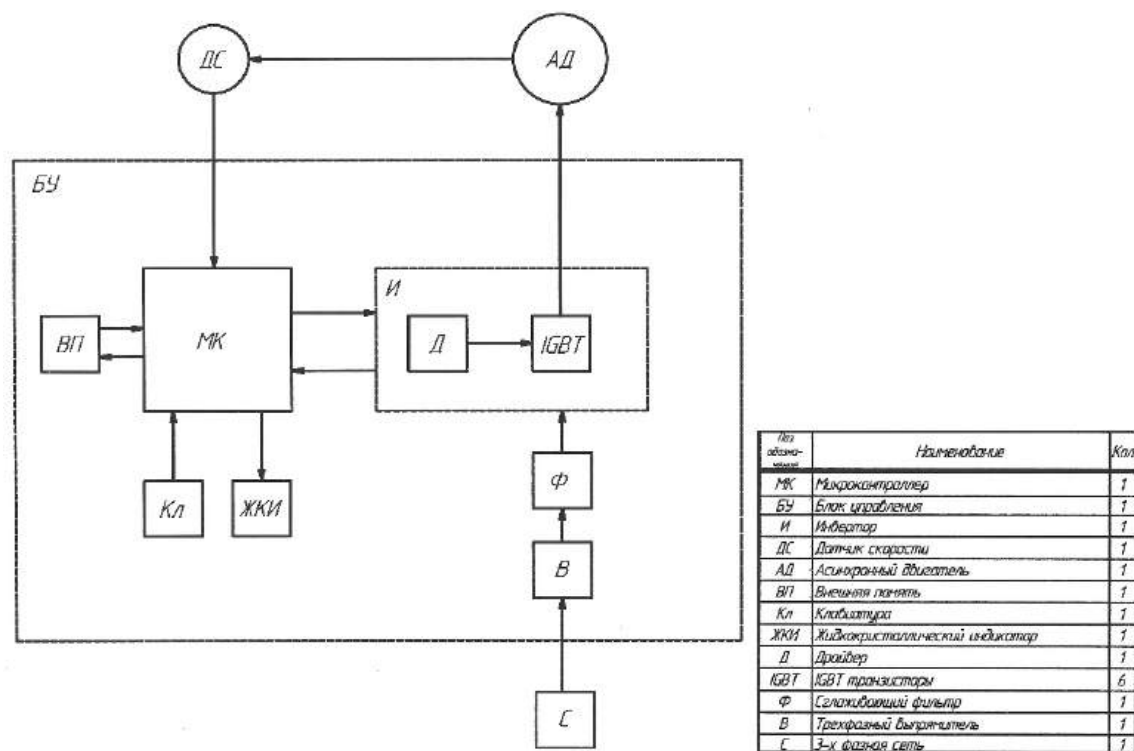


Рисунок 4. Функциональная схема блока управления АД

Figure 4. Functional diagram of the AD control unit

ющие двигатель. В рассматриваемом решении выбраны IGBT транзисторы с обратными диодами, их хорошие токовые характеристики и относительно высокие частотные свойства позволяют питать мотор при несущей частоте ШИМ до 20 кГц.

Правильное функционирование системы управления требует набора сигналов обратных связей, точно представляющих ток шины и скорость двигателя.

Датчик скорости требуется для замкнутой системы управления. Истинную скорость двигателя измеряет энкодер, выходом которого является цифровой код, который определяет положение ротора двигателя, что позволяет измерять скорость его вращения.

Драйверы IGBT транзисторов предназначены для управления мощными полупроводниковыми приборами в выходных каскадах преобразователей электрической энергии, используются в качестве промежуточного звена между управляющей схемой (микроконтроллером) и

мощными исполнительным и элементами, коммутирующими нагрузку [4].

Источником питания силовой части является 3-фазная промышленная сеть напряжением 380 В.

В простейшем варианте электропривод представляет собой двигатель, питаемый от сети и приводящий в движение с неизменной скоростью какой-либо механизм [5], при этом система управления сводится к обычному рубильнику или пакетному выключателю, включающему двигатель в сеть. В современных электроприводах используется питание двигателя от сети через дополнительное преобразовательное устройство [6]. Оно преобразует напряжение промышленной сети в постоянное или трехфазное, но другой величины или частоты [7, 8]. Система управления — неотъемлемая часть электропривода, обеспечивающая необходимые статические и динамические свойства. По исполнению она представляет собой совокупность функционально связанных между собой электро-

магнитных, электромеханических, полупроводниковых и подобных им элементов. К таким элементам относятся кнопки управления, реле и контакторы, электромашины, магнитные и полупроводниковые усилители, тахогенераторы, сельсины и т.п. Современная техника требует более совершенных блоков бесконтактной автоматики, которые все шире внедряются в системы управления автоматических электроприводами [9]. Это — логические полупроводниковые элементы, заменяющие релейную аппаратуру [10].

Список литературы

1. Глинкин М.Е. Математическое моделирование трехфазного мостового выпрямителя // VI Научная конференция ТГТУ: тез. докл. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2001. С. 264.
2. Глинкин Е.И. Схемотехника БИС: Автоматические интерфейсы ввода — вывода. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2001. 72 с.
3. Глинкин Е.И. Схемотехника СИС. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2001. 48 с.
4. Глинкин М.Е., Калинин В.Ф. Программно-управляемые преобразователи энергии // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: междунар. науч.-техн. конф. Гомель: ГГТУ, 2001. С. 104-106.
5. Глинкин М.Е. Математическое моделирование трехфазного мостового выпрямителя // Матер. VI Междунар. науч.-метод. конф. «НИЭТ-2003». Астрахань: АГТУ, 2003. С. 211-216.
6. Глинкин Е.И., Глинкин М.Е. Информационная технология проектирования трехфазного реле // НиТ Электрика. 2003. № 1. С. 36-38.
7. Бекишев Р.Ф., Дементьев Ю.Н. Общий курс электропривода: учебное пособие / Томский политехнический университет. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 302 с.
8. Новиков Г.В. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 498 с.

Выводы

Таким образом, разработка методики определения оптимальной геометрии конфузора для системы охлаждения силовой установки вертолёта является актуальной и важной задачей. Предложенная методика позволит эффективно распределять воздушные потоки и повысить коэффициент теплоотдачи радиаторов, что приведёт к улучшению охлаждения масла и повышению надёжности работы силовой установки.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на экспериментальное подтверждение эффективности предложенной методики и оптимизацию конструкции конфузора с учётом конкретных условий эксплуатации вертолёта.

9. Ларин А.М., Полковниченко Д.В., Гуляева И.Б. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебное пособие. М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 268 с.
10. Афанасьев А.Ю. Основы автоматизированного электропривода: учебное пособие. М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 188 с.

References

1. Glinkin M.E. Matematicheskoe modelirovanie trekhfaznogo mostovogo vypryamitelya [Mathematical Modeling of a Three-Phase bridge Rectifier]. *Tezisy dokladov VI Nauchnoy konferentsii TGTU* [Report Summary of VI Scientific Conference of TSTU]. Tambov, Izd-vo TGTU, 2001, pp. 264. [in Russian].
2. Glinkin E.I. *Skhemotekhnika BIS: Avtomaticheskie interfeisy vvoda – vvoda* [Circuitry of LSI: Automatic Input-Output Interface]. Tambov, Izd-vo TGTU, 2001. 72 p. [in Russian].
3. Glinkin E.I. *Skhemotekhnika SIS* [Circuitry of SIS]. Tambov, Izd-vo TGTU, 2001. 48 p. [in Russian].
4. Glinkin M.E., Kalinin B.F. Programmno-upravlyaemye preobrazovateli energii [Software-Controlled Energy Converters]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsia «Energosberezhenie. Elektrosnabzhenie. Avtomatizatsiya»* [International Scientific and Technical Conference «Energy Saving. Power Supply. Automation»]. Gorny, GGTU, 2001, pp. 104-106. [in Russian].

5. Glinkin M.E. Matematicheskoe modelirovanie trekhfaznogo mostovogo vypryamitelya [Mathematical Modeling of a Three-Phase Bridge Rectifier]. Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «NIET-2003» [Proceedings of VI International Scientific Methodical Conference «NIET-2003»]. Astrakhan, AGTU, 2003, pp. 211-216. [in Russian].
6. Glinkin E.I., Glinkin M.E. Informatsionnaya tekhnologiya proektirovaniya trekhfaznogo rele [Information Technology for Designing a Three-Phase Relay]. *NiT Elektriika – NiT Elektrik*, 2003, No. 1, pp. 36-38. [in Russian].
7. Bekishev R.F., Dement'ev Yu.N. *Obshchii kurs elektroprivoda: uchebnoe posobie* [General Course of Electric Drive: Textbook]. Tomsk Polytechnic University. 2-e izd. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014, 302 p. [in Russian].
8. Novikov G.V. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi elektrodvigatelyami* [Frequency Control of Asynchronous Electric Motors]. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2018. 498 p. [in Russian].
9. Larin A.M., Polkovnichenko D.V., Gulyaeva I.B. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh: uchebnoe posobie* [Electromagnetic Transient Processes in Electrical Systems: a Tutorial]. Moscow-Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 268 p. [in Russian].
10. Afanas'ev A.Yu. *Osnovy avtomatizirovannogo elektroprivoda: uchebnoe posobie* [Fundamentals of Automated Electric Drive: a Tutorial]. Moscow-Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2024. 188 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2025; принята к публикации 22.01.2025.

The article was submitted 24.12.2024; approved after reviewing 15.01.2025; accepted for publication 22.01.2025.

Научная статья

УДК 621.341

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-101-114

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ВЫНОСА ЖИДКОСТИ ИЗ ГАЗОСБОРНОЙ СЕТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПАДЕНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

*Андрей Николаевич Краснов**Andrey N. Krasnov**кандидат технических наук,**доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии,**Уфимский государственный нефтяной технический университет,**Уфа, Россия**Омар Халед Абдулджалил Ахмед Аль-Кадаси**Omar Kh. Al-Qadasi**старший преподаватель кафедры автоматизации,**телекоммуникации и метрологии,**Уфимский государственный нефтяной технический университет,**Уфа, Россия*

Актуальность

Одной из основных проблем эксплуатации газовых месторождений в завершающей стадии является высокая обводненность добываемого газа. Это приводит к появлению водных скоплений в пониженных участках шлейфов газосборной сети, осложняющих их работу из-за образования ледяных и гидратных пробок. Особенно остро эта проблема стоит в зимний период из-за экстремально низких температур Крайнего Севера, где расположено большинство месторождений. Это обстоятельство приводит к необходимости каким-либо образом удалять скопления жидкости. Несмотря на то, что эта проблема является общей для всех промыслов, на сегодняшний день отсутствует единая утвержденная методика, поэтому используются различные методы. Наибольшее распространение получил метод периодической продувки скважин, приводящий к загрязнению атмосферы и потере товарного продукта. Наиболее целесообразно осуществлять вынос жидкости потоком самого газа, однако для этого он должен иметь скорость не ниже некоторого определенного значения.

Цель исследования

Исследование факторов, влияющих на скорость газа в шлейфе, и получение математической модели для определения её критического значения, обеспечивающего вынос из шлейфа газовым потоком.

Методы исследования

Для получения модели использована π -теорема, а исследование модели проведено в программе COMSOL Multiphysics на основе экспериментальных данных, полученных на Уренгойском нефтегазоконденсатном месторождении.

Ключевые слова

газосборная сеть, трубопровод-шлейф, вынос воды, продувка на факел, π -теорема, критическая скорость

Результаты

Несмотря на большое число методов выноса воды из шлейфов газосборной сети ни один из них не лишен недостатков. С точки зрения обеспечения максимальной энергоэффективности эксплуатации газового промысла наиболее целесообразным является вынос жидкости самим потоком газа. Для этого необходимо обеспечить его определенную скорость, так называемую критическую. Поскольку жидкостные скопления чаще всего образуются в пониженных участках шлейфа, в качестве параметров, влияющих на значение критической скорости, были выбраны диаметр трубопровода, угол наклона пониженного участка трубопровода, плотности жидкости и газа, вязкость жидкости, объем жидкостного скопления.

В результате проведенных исследований получено критериальное уравнение для определения критической скорости потока газа, которая способна обеспечить вынос воды из U-образного колена.

Моделирование процесса выноса жидкостного скопления потоком газа проведено в программе COMSOL Multiphysics. Верификация полученной модели выполнена на экспериментальных данных, полученных на Уренгойском нефтегазоконденсатном месторождении. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности построения на основе данной модели автоматической системы управления кустом газовых скважин.

Для цитирования: Краснов А. Н., Аль-Кадаси О. Х. Обеспечение оптимального режима выноса жидкости из газосборной сети месторождений в условиях падения пластового давления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 101-114. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-101-114>.

Original article

ENSURING THE OPTIMAL MODE OF LIQUID REMOVAL FROM THE GAS GATHERING NETWORK OF FIELDS UNDER CONDITIONS OF FORMATION PRESSURE DROP

Relevance

One of the main problems of gas fields operation in the final stage is high water cut of produced gas. This leads to the appearance of water accumulations in low sections of gas gathering network plumes, complicating their operation due to the formation of ice and hydrate plugs. This problem is especially acute in winter due to extremely low temperatures in the Far North, where most fields are located. This circumstance leads to the need to somehow remove accumulations of liquid. Despite the fact that this problem is common to all fields, there is no single approved methodology, so different methods are used. The most widespread is the method of periodic blowing of wells into the atmosphere, which leads to its contamination and loss of marketable product. It is most expedient to carry out removal of liquid by the flow of gas itself, but for this purpose it should have a velocity not lower than some certain value.

Aim of research

The main aim of the research is to study the factors influencing the gas velocity in the plume and to obtain a mathematical model for determining its critical value, which ensures removal from the plume by the gas flow.

Keywords

gas gathering network, plume pipeline, water removal, flare blowout, π -theorem, critical velocity

Research methods

The π -theorem was used to obtain the model, and the model was studied in the COMSOL Multiphysics program on the basis of experimental data obtained at the Urengoy oil and gas condensate field.

Results

In spite of a large number of methods of water removal from gas gathering network plumes, none of them is without disadvantages. From the point of view of providing maximum energy efficiency of gas field operation the most expedient is the removal of liquid by the gas flow itself. For this purpose, it is necessary to ensure a certain velocity, the so-called critical velocity. Since liquid accumulations are most often formed in the depressed sections of the plume, the pipeline diameter, the angle of inclination of the depressed section of the pipeline, liquid and gas densities, liquid viscosity, and the volume of liquid accumulation were chosen as parameters affecting the value of the critical velocity.

As a result of this research, the criterion equation for determining the critical gas flow velocity, which is able to ensure the removal of water from the U-shaped elbow, was obtained.

Modeling of the process of carrying out of liquid accumulation by gas flow was carried out in COMSOL Multiphysics program. Verification of the obtained model was performed on the experimental data obtained at the Urengoy oil-gas condensate field. Practical significance of the obtained results lies in the possibility of building an automatic control system of a gas well cluster on the basis of this model.

For citation: Krasnov A. N., Al-Qadasi O. Kh. Obespecheniye optimalnogo rezhima vynosa zhidkosti iz gazosbornoy seti mestorozhdeniy v usloviyakh padeniya plastovogo davleniya [Ensuring the Optimal Mode of Liquid Removal from the Gas Gathering Network of Fields under Conditions of Formation Pressure Drop]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 101-114 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-101-114>.

Введение

Основные запасы природного газа в России сосредоточены на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. В настоящее время объемы добычи газа постоянно снижаются. Это обусловлено тем, что самые крупные месторождения, такие как Уренгойское и Ямбургское переходят на завершающий этап эксплуатации, то есть находятся на стадии падающей добычи. Падение добычи на месторождениях Крайнего Севера вызвано множеством различных факторов, включая истощение запасов на некоторых участках, ухудшение геологических и технических характеристик газоносного пласта, скважин и газосборной сети (ГСС) из-за процесса накопления отложений и т.п.

Завершающий этап жизненного цикла месторождения является самым энергозатратным. Одновременно с падением добычи постоянно растет энергопотребление (рисунок 1), поскольку снижение давления газа требует больше затрат на его компримирование, рост обводненности увеличивает затраты на сепарацию, предотвращение гидратообразования и т.п.

Характерными чертами завершающей стадии эксплуатации газового месторождения являются [1, 2]:

— природный газ, добываемый на газовых скважинах на последнем этапе, сам по себе содержит большое количество влаги, скапливающейся в пониженных участках;



Рисунок 1. Удельное энергопотребление ООО «Газпром добыча Уренгой»

Figure 1. Energy consumption of Gazprom dobycha Urengoy, LLC

— значительное снижение пластового давления приводит к необратимой деформации коллекторов, обводнению скважин пластовой и конденсационной водой, а также образованию на забоях песчано-жидкостных пробок;

— уменьшение дебитов добывающих скважин и устьевых давлений, что, в свою очередь, влечет за собой снижение температуры добываемого газа и увеличение объемов выпадения конденсационной воды;

— значительное падение устьевых температур и сокращение расходов газа со скважины приводит к тому, что количество тепла, которое должно поступать в шлейф и газосборные сети (ГСС) вместе с поступающим газом, становится недостаточным для того, чтобы вода в шлейфе не замерзла при контакте с замерзшими стенками труб при отрицательных температурах Крайнего Севера;

— климатические особенности эксплуатации месторождений, а именно продолжительный зимний период в северных регионах. При отрицательных температурах вода, находящаяся в шлейфе, быстро замерзает и превращается в ледяные пробки, которые уменьшают пропускную способность трубопровода.

Все перечисленные факторы свидетельствуют о том, что на этапе падающей добычи газовой скважины вынос воды из шлейфа играет критическую роль для обеспечения эффективной работы скважины, поэтому исследования, направленные на повышение эффективности этого процесса, являются актуальными.

Причины скопления воды в шлейфах и существующие методы её удаления

Чаще всего местом образования скоплений воды и конденсата являются пониженные участки ГСС (рисунок 2). Наличие таких жидкостных скоплений приводит к снижению добычи, срока эксплуатации оборудования и повышению риска возникновения аварийной ситуации на промысле.

В летний сезон жидкостные скопления малых объемов не оказывают существенного влияния на шлейф куста газовых скважин, но в зимний период из-за суровых климатических условий при промерзании почв происходит замерзание воды и, как следствие, образование гидратов и ледяных пробок в местах скопления воды. Это приводит к сокращению проходного сечения трубопровода,

значительному увеличению сопротивления шлейфа и возрастанию давления на устье. При неблагоприятном развитии ситуации из-за возрастания давления часто происходит самозадавливание скважины или полный останов, т.е. возникает по сути аварийная ситуация [3].

Косвенными последствиями водяных скоплений являются, например, изменение концентрации метанола в газе за счет его частичного растворения в воде, более интенсивная коррозия пониженных участков шлейфов и т.п.

Накопление жидкости в ГСС происходит по разным причинам (рисунок 3). Как видно из приведенной диаграммы, одной из главных причин образования воды в шлейфе куста газовых скважин на этапе падающей добычи являются недостаточное пластовое давление и понижение температуры транспортируемого газа. При понижении пластового давления неизбежно снижается скорость газового потока, и при достижении скорости ниже критической происходит накопление жидкости (конденсационной

воды, выделяющейся из газа, пластовой воды, газового конденсата, поступающего из пласта или выделяющегося из газа в стволе скважины) в ГСС [4].

Решению описанной проблемы посвящено много исследований [5–7]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на интенсивность накопления жидкости влияет не только скорость потока газа, но и ориентация (угол наклона) восходящего участка трубопровода, а от давления в ГСС и плотности газа вынос скопления жидкости не зависит.

Существующие методы удаления жидкости из шлейфов ГСС (рисунок 4) можно разделить на методы постоянной очистки и периодической [8].

К постоянным методам удаления жидкости относятся использование поверхностно-активных веществ (ПАВ), объединение нескольких шлейфов в один поток, замена трубопроводов на трубы меньшего диаметра и технология «труба в трубе». Все эти методы направлены на увеличение скорости потока газа.

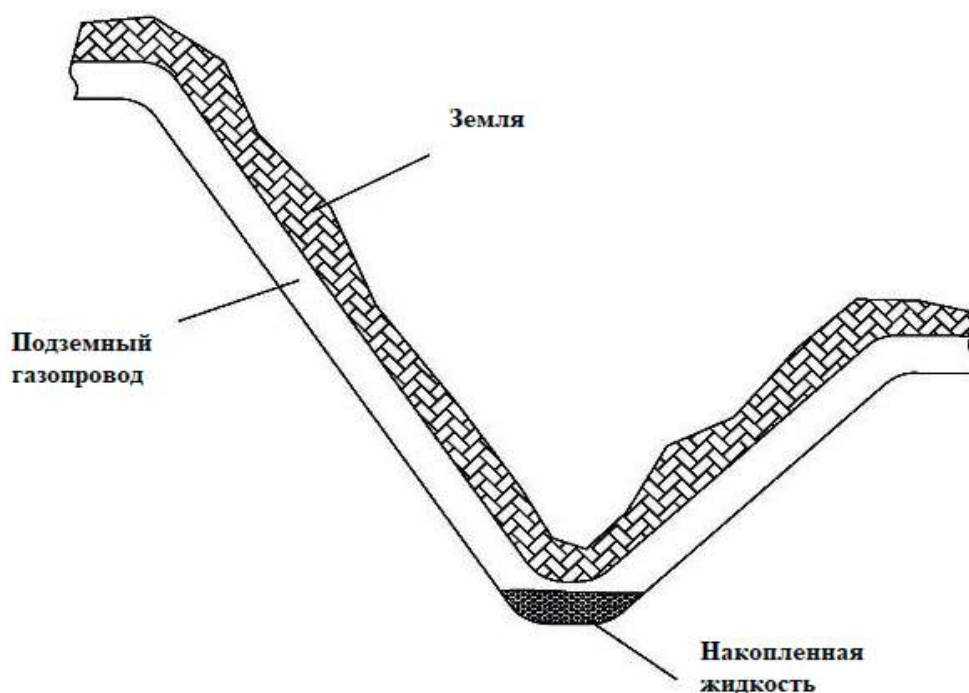


Рисунок 2. Скопление воды в пониженных участках газопровода

Figure 2. Water accumulation in depressed sections of the pipeline

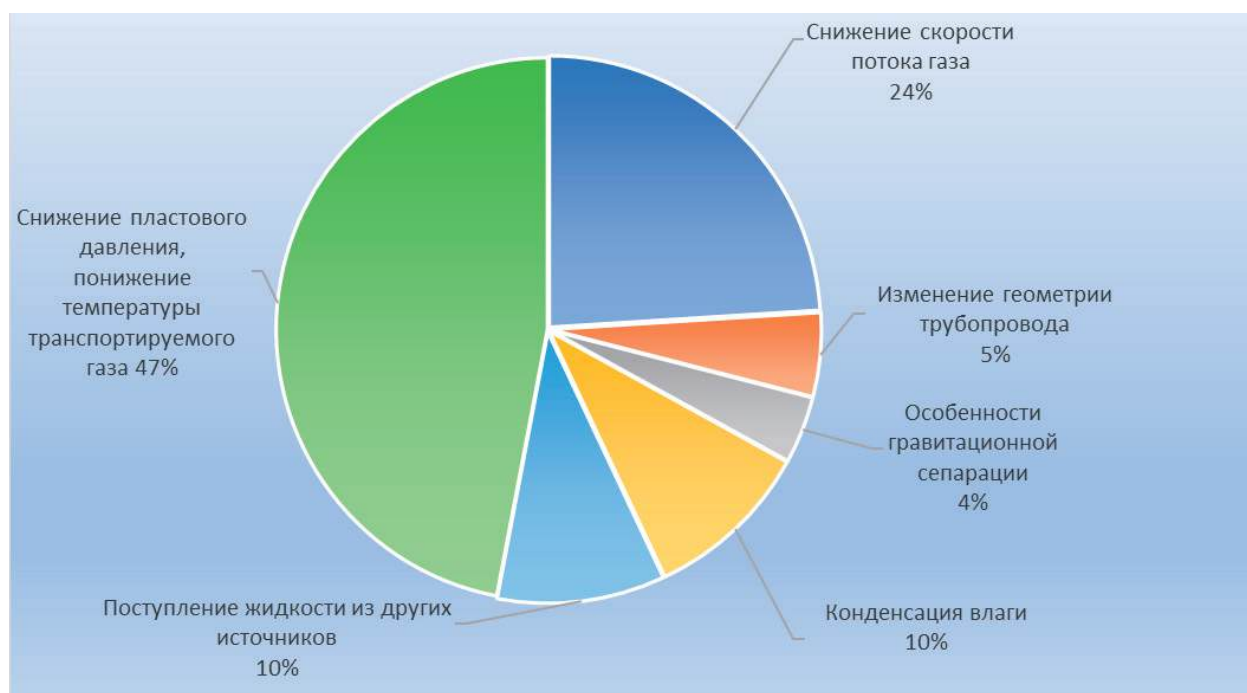


Рисунок 3. Причины накопления жидкости в пониженных участках шлейфа

Figure 3. Causes of fluid accumulation in depressed sections of the plume

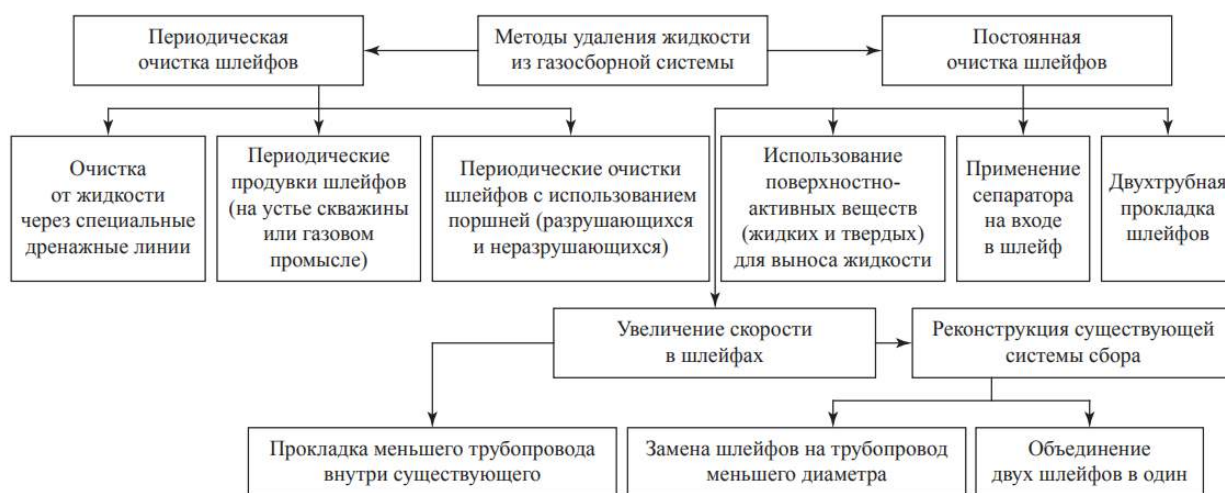


Рисунок 4. Методы удаления жидкости из ГСС

Figure 4. Methods of liquid removal from the gas gathering network

Применение ПАВ основано на превращении скважинной воды в пену и не требует изменения конструкции скважины.

Остальные перечисленные решения направлены на снижение проходного сечения трубопровода. Переход на трубы меньшего диаметра заключается в полной перекладке трубопроводов ГСС.

Технология «труба в трубе» предполагает использование в полости шлейфа куста скважин внутренней пластиковой трубы меньшего диаметра, по которой продукция скважин будет транспортироваться к установке комплексной подготовки газа (УКПГ). Пластиковую трубу помещают в уже существующий шлейф, а затрубное пространство заполняется

газом под высоким давлением, которое должно быть примерно равно давлению транспортируемого газа. Благодаря такой газовой «подушке» внутренняя пластиковая труба не принимает на себя значительных нагрузок, что существенно увеличивает срок ее службы [9].

Объединение потоков нескольких шлейфов в один в одном технологическом коридоре также направлено на увеличение скорости движения газа для улучшения выноса воды с потоком газа. Такой способ увеличения скорости потока был использован в газосборных сетях нескольких УКПГ Уренгойского месторождения [10], что позволило увеличить скорости потока газа на участках ГСС с 1–2 до 6–8 м/с. Кроме того, значительно сократились потери газа, так как был исключен процесс продувки шлейфов на факелы. Относительно замены трубопровода и технологии «труба в трубе» процесс объединения потоков шлейфов является как простым в реализации, так и менее материально затратным.

Ко второму типу технических решений по выносу воды из шлейфов ГСС

относятся периодические способы очистки.

Наиболее часто используемый, эффективный и регламентный метод борьбы с накоплением жидкой фазы в пониженных участках шлейфа — это метод продувки газопровода (рисунок 5). Продувку газопровода выполняют сжатым воздухом или природным газом. Чаще всего воздух подается в шлейф из установленного рядом ресивера, который стоит у участка, ограниченного запорной арматурой или кранами, но также могут использоваться другие источники природного газа или высокопроизводительных компрессорные установки. На время продувки скважину останавливают.

Постановка задачи исследования

Проведенный обзор позволяет сделать вывод, что актуальность проблемы удаления жидкостных скоплений из шлейфов ГСС постоянно возрастает по мере старения месторождений, падения пластовых давлений и увеличения степени обводненности добываемого газа. Ситуация осложняется отсутствием утвержденных методик очистки шлей-



Рисунок 5. Очистка трубопровода методом продувки

Figure 5. Pipeline cleaning by purging method

фов от жидкостных скоплений, а описанные в литературе технические решения либо относятся к магистральным трубопроводам, либо не обеспечивают требуемого качества очистки.

Наиболее действенным методом выноса воды из шлейфа является вынос скопления жидкости посредством энергии самого транспортируемого газа без выпуска газа в атмосферу. Однако для разработки технической системы, реализующей данный принцип, необходимо получить математическую модель, описывающую динамику выноса скоплений при движении газа по шлейфу.

Результаты и их обсуждение

Все существующие способы удаления скопления жидкости из шлейфов направлены на снижение негативных факторов, которые могут спровоцировать полный останов технологического процесса на месторождении. Однако каждый из рассмотренных выше способов обладает довольно существенными недостатками.

При постоянном использовании ПАВ пена накапливается в скважине, а ее извлечение из трубопровода или устья скважины является технически сложным и трудоемким процессом. При отрицательных температурах пена застывает и образует дополнительное сопротивление для трубопровода.

Переход на трубы меньшего диаметра требует монтажа новых и утилизации существующих трубопроводов. Поэтому он целесообразен на отдельных участках ГСС, работающих в режиме накопления жидкости, например только на восходящих участках шлейфов ГСС.

Технология «труба в трубе» не требует демонтажа и дорогостоящей замены существующих труб шлейфа, однако ее техническая реализация сложна и не отработана. К настоящему времени опыт ее применения при реконструкции трубопроводов ГСС отсутствует из-за нали-

чия поворотов, кранов, задвижек и других устройств на шлейфах кустов скважин, что может значительно осложнить монтаж пластиковой трубы.

Главными недостатками перечисленных методов являются сложность и высокая стоимость реализации. Требуется демонтаж и утилизация существующих трубопроводов, монтаж новых трубопроводов ГСС. Кроме того, возникают значительные производственные потери, т.к. необходимы останов добычи и стравливание газа из полости трубопровода. С учетом того, что почти все существующие месторождения на Крайнем Севере находятся в стадии падающей добычи, т.е. оставшийся срок их эксплуатации очень мал, около 10–15 лет, эти методы не целесообразны.

Важно также отметить, что положительный эффект от всех перечисленных мероприятий держится только в течение ограниченного периода времени, так как на этапе падающей добычи происходят постоянное снижение отборов газа и рост его обводненности. Это приводит к тому, что достигнутых в результате реконструкции скоростей потоков газа через короткий промежуток времени вновь становится недостаточно для обеспечения бесперебойного процесса выноса жидкости из участков скопления. Поэтому самым часто применяемым способом поддержания фонда скважин и ГСС в рабочем состоянии является продувка на факел.

Во время процесса продувки шлейфов требуется полный останов процесса эксплуатации на небольшой промежуток времени для того, чтобы переключить поток из шлейфа на свечу либо на первичный сепаратор, после чего он снова запускается, но даже такой небольшой временной отрезок приводит к значительным производственным потерям. Помимо безвозвратной потери части извлекаемой продукции и загрязнения

окружающей среды основной проблемой данного метода является физическая невозможность постоянно продвигать большое количество точек системы.

Таким образом, известные и используемые методы очистки шлейфов газовых скважин от скоплений жидкости требуют остановки работы скважин, а в большинстве случаев — больших материальных затрат, являющихся для завершающей стадии эксплуатации нерентабельными.

В то же время, если обеспечить вынос скопления жидкости посредством потока газа, но без его выпуска в атмосферу, подобный метод может оказаться наиболее действенным и наименее затратным. Для его реализации необходимо обеспечить критическую скорость потока газа, при которой жидкостные скопления будут выноситься с проблемных участков. Для расчета ее значения необходимо получить математическую модель, описывающую динамику выноса скоплений из шлейфа.

В [11] показано, что при движении газожидкостного потока по шлейфу ключевыми параметрами являются диаметр трубопровода H , поскольку от него зависит пропускная способность шлейфа; угол наклона восходящего участка α , который влияет на режим течения потока; плотность жидкости $\rho_{ж}$, оказывающая существенное влияние на давление в шлейфе, и ее количество $V_{ж}$. К влияющим факторам также можно отнести плотность газа $\rho_{г}$ и вязкость жидкостного скопления $\mu_{ж}$.

Тогда критическая скорость газожидкостного потока $U_{пот}$, которая должна обеспечивать вынос воды из U-образного колена, может быть представлена в виде функции

$$U_{кр} = F(H, \rho_{ж}, V_{ж}, \mu_{ж}, \sin \alpha, \rho_{г}, g), \quad (1)$$

где H — диаметр трубопровода, м;

α — угол наклона восходящего участка трубопровода;

$\rho_{ж}$ — плотность жидкостного скопления в пониженном участке, кг/м³;

$\rho_{г}$ — плотность газа, кг/м³;

$\mu_{ж}$ — вязкость жидкостного скопления, м²/с;

$V_{ж}$ — объем жидкостного скопления, м³;

g — ускорение свободного падения, м/с².

На каждом конкретном шлейфе параметры плотности жидкостного скопления $\rho_{ж}$, вязкости жидкостного скопления $\mu_{ж}$ и угла наклона трубопровода α к горизонту могут варьироваться в определенных диапазонах. Например, для одного из шлейфов Уренгойского НГКМ эти параметры имеют следующие значения:

— плотность жидкостного скопления $\rho_{ж} = 850\text{--}1210$ кг/м³;

— вязкость жидкостного скопления $\mu_{ж} = 1\text{--}65$ сСт;

— угол наклона восходящего участка к горизонту $\alpha = 3\text{--}9^\circ$.

Диаметр трубопровода H и ускорение g постоянные величины, также принята постоянная плотность газа $\rho_{г}$.

Для получения модели можно использовать так называемую π -теорему, в соответствии с которой полное уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц, может быть представлено зависимостью между критериями подобия, то есть зависимостью, связывающей безразмерные величины, определенным образом полученные из существующих в процессе параметров [11]. Отсюда следует, что если для рассматриваемого явления существует некоторая функциональная зависимость, то есть известны параметры, но неизвестно его математическое описание, то можно получить критерии подобия. При этом количество параметров сокращается за счет их выражения через размерности основных величин (масса,

длина, время, температура, сила тока, количество вещества и сила света). Аналогичный подход использован в ряде исследований, например в [12] для построения модели газового потока в магистральном газопроводе.

В соответствии с этим подходом уравнение (1) можно записать в виде

$$P = f(P_1, P_2, \dots, P_{(n-r)}), \quad (2)$$

где $P, P_1, P_2, \dots, P_{(n-r)}$ — безразмерные комплексы;

n — исходное число параметров в функции;

r — количество основных (первичных) величин, с помощью которых может быть представлена размерность исходных параметров.

В гидродинамике используются три первичные единицы измерений: масса M , время T , длина L [13, 14]. В качестве соответствующих им параметров можно выбрать, например параметры H [м], ρ_r [кг/м³], g [м/с²]. Выбор производится так, чтобы в этих параметрах присутствовали все три основные величины. Число критериев подобия всегда равно разности между числом участвующих в процессе параметров (n) и основных величин (r). В данном случае $r = 3$, $n = 7$, то есть число критериев подобия — 4.

Таким образом, уравнение (2) можно переписать в виде:

$$P = f(P_1, P_2, P_3). \quad (3)$$

Выражения для безразмерных комплексов P_i определяются в соответствии с теорией размерности [15]. Функцию (1) можно представить через выбранные параметры в виде:

$$[U_{кр}] = [g]^{A_1} [H]^{A_2} \cdot [\rho_{ж}]^{A_3} \quad (4)$$

или через первичные единицы измерений:

$$M^0 L T^{-1} = (M^0 L^1 T^{-2})^{A_1} (M^0 L^1 T^0)^{A_2} \times (M^1 L^{-3} T^0)^{A_3}. \quad (5)$$

Приравняв показатели степеней одинаковых символов основных единиц измерения в левой и правой частях уравнения (5), получают систему трех линейных уравнений:

$$\begin{cases} 0 = 0 \cdot A_1 + 0 \cdot A_2 + 0 \cdot A_3 \\ 1 = A_1 + A_2 + (-3) \cdot A_3 \\ -1 = (-2) \cdot A_1 + 0 \cdot A_2 + 0 \cdot A_3 \end{cases}, \quad (6)$$

решением которой будут значения коэффициентов $A_1 = A_2 = \frac{1}{2}$, $A_3 = 0$.

Тогда уравнение (4) примет вид:

$$[U_{кр}] = [g]^{1/2} [H]^{1/2} = \sqrt{[g][H]}. \quad (7)$$

Безразмерный комплекс можно записать в виде

$$P = \frac{U_{кр}}{\sqrt{gH}}. \quad (8)$$

Размерности величин плотности жидкости и плотности газа одинаковы, поэтому безразмерный комплекс P_1 можно представить в виде:

$$P_1 = \frac{\rho_{ж}}{\rho_r}. \quad (9)$$

При нахождении безразмерных критериев подобия необходимо учитывать, насколько это возможно, их сходство с реальными процессами. В данном случае необходимо учесть, что плотность газа в реальном газопроводе изменяется прямо пропорционально давлению газа, из чего следует, что безразмерные критерии по модели и в реальном газопроводе будут различны. Логично предположить, что при прочих равных условиях жидкость легче вынести при большей плотности газа. В этом случае критическая скорость выноса, вычисленная по модели, будет применима на реальном газопроводе только для меньшего угла. Тогда можно предположить, что безразмерный комплекс имеет вид:

$$P_1 = \frac{\rho_{ж} \cdot \sin \alpha}{\rho_r}. \quad (10)$$

Аналогично находятся выражения P_2 и P_3 :

$$P_2 = \frac{v_{ж}}{\sqrt{gH^3}}; \quad (11)$$

$$P_3 = \frac{V}{H^3}. \quad (12)$$

После определения всех безразмерных комплексов уравнение (3) можно представить в виде:

$$\frac{U_{кр}}{\sqrt{gH}} = f\left(\frac{\rho_{ж*}\sin\alpha}{\rho_r}, \frac{\mu_{ж}}{\sqrt{gH^3}}, \frac{V}{H^3}\right) \quad (13)$$

или с учетом выражений (10)–(12) в виде критериального уравнения:

$$U_{кр} = A_0 * \left(\frac{\rho_{ж*}\sin(\alpha)}{\rho_r}\right)^{A_1} \times \\ \times \left(\frac{\mu_{ж}}{\sqrt{gH^3}}\right)^{A_2} * \left(\frac{V}{H^3}\right)^{A_3} * \sqrt{gH}, \quad (14)$$

где $A_0 - A_3$ — постоянные числовые коэффициенты.

Для получения конкретных значений этих коэффициентов использована программа COMSOL Multiphysics [16].

Уравнение, полученное в ходе моделирования и обработки данных, имеет вид

$$U_{кр} = 3,56 * \left(\frac{\rho_{ж*}\sin(\alpha)}{\rho_r}\right)^{0,197} \times \\ \times \left(\frac{\mu_{ж}}{\sqrt{gH^3}}\right)^{-0,027} * \left(\frac{V}{H^3}\right)^{0,031} * \sqrt{gH}. \quad (15)$$

Для оценки адекватности модели использовались значения параметров, которые были получены в ходе продувки скважины через газосборный трубопровод на Уренгойской установке комплексной подготовки газа, проведенной в январе 2023 года. Оценка выполнена на основе F-критерия Фишера [16]:

$$F = \frac{S_{факт.}^2}{S_{ост.}^2}, \quad (16)$$

где $S_{факт.}^2$ — фактическая дисперсия;
 $S_{ост.}^2$ — остаточная дисперсия.

Дисперсия, характеризующая ошибку опыта, рассчитывается по формуле:

$$S_{факт.}^2 = \frac{1}{n-m-1} \sum_{l=1}^N (Y_l - \bar{Y}_l)^2, \quad (17)$$

где n — число наблюдений;

m — число изменяющихся экспериментальных факторов;

Y_l — измеренное значение критической скорости в опыте;

l — порядок значения скорости газового потока;

Y_l — рассчитанное по формуле (15) значение критической скорости.

Дисперсия, характеризующая ошибку опыта (остаточную дисперсию), рассчитывается по формуле:

$$S_{ост.}^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{l=1}^N \sum_{t=1}^m (Y_{lt} - Y_l)^2, \quad (18)$$

где m — число повторений опытов;

Y_{lt} — измеренное значение критической скорости при повторном проведении эксперимента t .

Модель считается адекватной, если выполняется условие $F \leq F_{табл.}$, при этом табличное значение $F_{табл.}$ выбирается исходя из принятого уровня значимости [16]. В данном исследовании он принят равным 0,05, или 5 %, т.е. выполнение условия $F \leq F_{табл.}$ означает, что уравнение (15) адекватно описывает процесс выноса жидкостного скопления из пониженного участка трубопровода в 95 % случаев.

Расчет скорости потока газа $U_{кр}$ произведен для трех экспериментов. Исходные данные для расчета: плотность газового потока $\rho_r = 1,2 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, остальные данные взяты из таблицы 1. Объем накопленной жидкости V принят равным 20 м^3 .

Полученные значения дисперсии $S_{факт.}^2 = 0,01214$, а $S_{ост.}^2 = 0,0094$. Значение критерия Фишера $F = 1,29$. Для 5 %-ого уровня значимости $F_{табл.} = 1,4$ [16]. Неравенство $F \leq F_{табл.}$ выполняется, следовательно, полученная модель адекватна.

Выводы

Проблема образования жидкостных скоплений в газотранспортной сети несет высокие риски при ее эксплуатации. Поэтому задача выноса воды из

шлейфов газосборной сети актуальна практически для всех газовых месторождений. Особенную остроту она имеет для северных месторождений, т.к. из-за экстремально низких температур зимой вода мгновенно превращается в ледяную пробку.

Анализ известных методов выноса воды из шлейфов кустов газовых скважин показал, что на практике используется практически один метод периодической очистки — продувка на факел. Он обладает высокой эффективностью, однако приводит к безвозвратным потерям добытого газа, загрязнению окружающей среды и т.п.

Оптимальным способом выноса воды с точки зрения энергозатрат является вынос самим потоком газа. Это возможно, если скорость потока превышает некоторую критическую скорость. При этом параметрами, влияющими на процесс выноса жидкостного скопления из пониженного участка шлейфа, являются

диаметр трубопровода, угол наклона пониженного участка трубопровода, плотность жидкости и газа, вязкость жидкости, объем жидкостного скопления.

В результате проведенных исследований на основе теории размерностей и π -теоремы получено критериальное уравнение для определения критической скорости потока газа ($U_{кр}$), которая способна обеспечить вынос воды из U-образного колена.

Процесс выноса жидкостного скопления потоком газа был смоделирован в программе COMSOL Multiphysics. Адекватность полученной модели проверена на экспериментальных данных, полученных на Уренгойском НГКМ. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности построения на основе данной модели автоматической системы управления кустом газовых скважин.

Список источников

1. Сонич В.П., Черемисин Н.А., Батурин Ю.Е. Влияние снижения пластового давления на фильтрационно-емкостные свойства пород // Нефтяное хозяйство. 1997. № 9. С. 52-57.
2. Краснов А.Н. Особенности эксплуатации газосборной системы в условиях накопления жидкости // Нефтегазовое дело. 2018. № 3, Т. 16. С. 118-126. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-118-126. EDN: HWWIDB.
3. Прахова М.Ю., Краснов А.Н., Хорошавина Е.А., Шаловников Э.А. Предупреждение гидратообразования в системах промыслового сбора газа Ямбургского газоконденсатного месторождения // Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: сб. тр. IV Всеросс. заочн. науч.-практ. интернет-конф. 2016. С. 116-123. EDN: VZBSVX.
4. Краснов А.Н., Прахова М.Ю., Сулейманов И.Н., Хорошавина Е.А., Лялин В.Е.

Непрерывный мониторинг обводненности газовых скважин // Естественные и технические науки. 2017. № 10 (112). С. 40–46. EDN: ZRZWEL.

5. Скоробогач М.А. Проблемы эксплуатации системы сбора газа на месторождении Медвежье // Технологии нефти и газа. 2011. № 6. С. 42–47. EDN: OXWWJT.

6. McNeil R.G., Lillico D.R. An Effective Method for Modeling Stagnant Liquid Columns in Gas Gathering Systems // Petroleum Society's 5th Canadian International Petroleum Conference, June 8-10, 2004. 2004.

7. McNeil R., Lillico D.R. An Effective Method for Modeling Non-Moving Stagnant Liquid Columns in Gas Gathering Systems // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2007. No. 46. P. 10.2118/07-05-03.

8. Coleman S.B., Clay H.B., McCurdy D.G., Norris H.L. Applying Gas-Well Load-Up Technology // Journal of Petroleum Technology, SPE Paper No. 20283. March 1991. P. 344-349.

9. Прахова М.Ю., Хорошавина Е.А., Краснов А.Н., Коловертнов Г.Ю. Инновационная технология эксплуатации газосборных коллекторов в условиях Крайнего Севера // Территория Нефтегаз. 2018. № 4. С. 14-19. EDN: XTUZVZ.

10. Гужов И.А., Ротов А.А., Трифонов А.В. Оценка эффективности инженерных решений по реконструкции газосборной системы на поздней стадии разработки Уренгойского месторождения // Эффективность освоения запасов углеводородов. Ухта: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. С. 62-70.

11. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.

12. Усольцев М.Е. Удаление скоплений жидкости из пониженных участков газопровода потоком транспортируемого газа: дисс. ... канд. техн. наук. СПб: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2012. 128 с.

13. Иванов М.Г. Размерность и подобие. Долгопрудный, 2013. 68 с.

14. Тирский Г.А. Подобие и физическое моделирование // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 8. С. 122–127.

15. Minami K., Shoham O. Transient Two-Phase Flow Behavior in Pipelines: Experiment and Modeling // International Journal of Multiphase Flow. 1994. Vol. 20, No. 4. P. 739-752.

16. Смирнов Н.В., Дунин-Бирковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969.

References

1. Sonich V.P., Cheremisin N.A., Baturin Yu.E. Vliyanie snizheniya plastovogo davleniya na fil'tratsionno-emkostnye svoistva porod [Effect of Reservoir Pressure Decrease on the Filtration and Capacitive Properties of Rocks]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 1997, No. 9, pp. 52-57. [in Russian].

2. Krasnov A.N. Osobennosti ekspluatatsii gazosbornoi sistemy v usloviyakh nakopleniya zhidkosti [Features of Gas-Collection System Operation under Liquid Accumulation]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, No. 3, Vol. 16, pp. 118-126. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-118-126. EDN: HWWIDB. [in Russian].

3. Prakhova M.Yu., Krasnov A.N., Khoroshavina E.A., Shalovnikov E.A. Preduprezhdenie gidratoobrazovaniya v sistemakh promyslovogo sbora gaza Yamburgskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya [Prevention of Hydrate Formation

in Industrial Gas Gathering Systems of the Yamburg Gas Condensate Field]. *Sbornik trudov IV Vserossiiskoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii «Problemy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov dobychi, transporta i pererabotki nefti i gaza»* [Proceedings of the IV All-Russian Correspondence Scientific and Practical Internet Conference «Problems of Automation of Technological Processes of Oil and Gas Production, Transportation and Processing»]. 2016, pp. 116-123. EDN: VZBSVX. [in Russian].

4. Krasnov A.N., Prakhova M.Yu., Suleimanov I.N., Khoroshavina E.A., Lyalin V.E. Nepre-ryvnyi monitoring obvodnennosti gazovykh skvazhin [Continuous Monitoring of Gas Well Water Cut]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki — Natural and Technical Sciences*, 2017, No. 10 (112), pp. 40–46. EDN: ZRZWEL. [in Russian].

5. Skorobogach M.A. Problemy ekspluatatsii sistemy sbora gaza na mestorozhdenii Medvezh'e [Problems at Medvezhye Gas Field Gathering System Exploitation]. *Tekhnologii nefti i gaza — Oil and Gas Technologies*, 2011, No. 6, pp. 42–47. EDN: OXWWJT. [in Russian].

6. McNeil R.G., Lillico D.R. An Effective Method for Modeling Stagnant Liquid Columns in Gas Gathering Systems. *Petroleum Society's 5th Canadian International Petroleum Conference, June 8-10, 2004*. 2004.

7. McNeil R., Lillico D.R. An Effective Method for Modeling Non-Moving Stagnant Liquid Columns in Gas Gathering Systems. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2007, No. 46, pp. 10.2118/07-05-03.

8. Coleman S.B., Clay H.B., McCurdy D.G., Norris H.L. Applying Gas-Well Load-Up Technology. *Journal of Petroleum Technology, SPE Paper No. 20283*. March 1991, pp. 344-349.

9. Prakhova M.Yu., Khoroshavina E.A., Krasnov A.N., Kolovertnov G.Yu. Innovatsionnaya tekhnologiya ekspluatatsii gazosbornykh kolektorov v usloviyakh Krainego Severa [Innovative Technology of Gas-Collecting Systems Operating in the High North Conditions]. *Territoriya Neftegaz — Neftegaz Territory*, 2018, No. 4, pp. 14-19. EDN: XTUZVZ. [in Russian].

10. Guzhov I.A., Rotov A.A., Trifonov A.V. Otsenka effektivnosti inzhenernykh reshenii po rekonstruktsii gazosbornoi sistemy na pozdnei stadii razrabotki Urengoi'skogo mestorozhdeniya [Evaluation of the Efficiency of Engineering Solutions for Reconstruction of the Gas Gathering System at a Late Stage of Development of the Urengoy Field]. *Effektivnost' osvoeniya zapasov*

uglevodorodov [Efficiency of Development of Hydrocarbon Reserves]. Ukhta, Gazprom VNIIGAZ, 2010, pp. 62-70. [in Russian].

11. Venikov V.A., Venikov G.V. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Theory of Similarity and Modeling]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 439 p. [in Russian].

12. Usol'tsev M.E. *Udalenie skoplenii zhidkosti iz ponizhennykh uchastkov gazoprovoda potokom transportiruемого газа: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Removal of Liquid Accumulations from Low-Lying Sections of a Gas Pipeline by the Flow of Transported Gas: Cand. of Engin. Sci. Diss.]. Saint-Petersburg, Nats. mineral'no-syr'evoi un-t «Gornyi», 2012. 128 p. [in Russian].

13. Ivanov M.G. *Razmernost' i podobie* [Dimensionality and Similarity]. Dolgoprudnyi, 2013. 68 p. [in Russian].

14. Tirskii G.A. *Podobie i fizicheskoe modelirovanie* [Similarity and Physical Modeling]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal — Soros Educational Journal*, 2001, Vol. 7, No. 8, pp. 122–127. [in Russian].

15. Minami K., Shoham O. Transient Two-Phase Flow Behavior in Pipelines: Experiment and Modeling. *International Journal of Multiphase Flow*, 1994, Vol. 20, No. 4, pp. 739-752.

16. Smirnov N.V., Dunin-Birkovskii I.V. *Kurs teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki* [Course in Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1969. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 18.12.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2025; принята к публикации 22.01.2025.

The article was submitted 18.12.2024; approved after reviewing 15.01.2025; accepted for publication 22.01.2025.

Научная статья

УДК 004.032.26

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-115-129

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ВЫНОС ЖИДКОСТНЫХ СКОПЛЕНИЙ ИЗ ГАЗОСБОРНОЙ СЕТИ

**Геннадий Юрьевич Коловертнов****Gennady Yu. Kolovertnov***доктор технических наук,**профессор кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии,**Уфимский государственный нефтяной технический университет,**Уфа, Россия***Омар Халед Абдулджалил Ахмед Аль-Кадаси****Omar Kh. Al-Qadasi***старший преподаватель кафедры автоматизации,**телекоммуникации и метрологии,**Уфимский государственный нефтяной технический университет,**Уфа, Россия*

Актуальность

На завершающей стадии эксплуатации нефтегазоконденсатных месторождений возникают проблемы оттока газа и снижения массового расхода, уменьшения температуры транспортируемого газа и увеличения обводненности скважин, что, в свою очередь, способствует скоплению жидкости в трубопроводах и шлейфах. Комплексное действие всех перечисленных факторов вызывает резкое образование ледяных пробок в сезон заморозков, что нарушает нормальную работу всего промысла. Для предотвращения уменьшения пропускной способности трубопровода необходимо оперативно устранять скопившуюся жидкость. Оптимальным вариантом является вынос воды потоком самого транспортируемого газа. Для этого скорость газового потока должна быть не меньше некоторой критической скорости, значение которой зависит от многих параметров, в частности, от диаметра трубопровода, угла наклона его восходящего участка, плотностей газа и жидкостного скопления в пониженном участке, вязкости и объема жидкостного скопления.

Цель исследования

Повышение эффективности работы автоматической системы управления удалением скопленной воды в газотранспортной сети и получить модель, связывающая параметры, по которой можно рассчитать в режиме реального времени перепад давления между кустом газовых скважин и зданием переключающей аппаратуры, обеспечивающий критическую скорость газового потока.

Ключевые слова

газотранспортная сеть, шлейф, жидкостное скопление, π -модель, критическая скорость газового потока

Методы исследования

Использование математической модели, описывающей динамику выноса водных скоплений в процессе транспортировки газа, для определения критической скорости газового потока и исследование границы ее применимости для разных шлейфов; определение диаметров шлейфов, для которых целесообразно использовать вынос жидкостных скоплений из шлейфов потоком газа.

Результаты

Очистка шлейфов от жидкостных скоплений является эффективным способом восстановления работоспособности скважин. Результаты исследований показывают, что при поддержании необходимой скорости потока поток природного газа может эффективно удалять накопленную воду из газосборной сети. Каждый шлейф имеет свое собственное значение, которое зависит от множества факторов, таких как диаметр трубопровода, угол наклона восходящего участка, объем скопления жидкости, плотность газа и жидкости в нисходящем участке и другие переменные.

В результате исследований выявлено, что эффективнее всего проводить очистку при малых диаметрах трубопровода (до 200 мм) — в этом случае выносятся любые объемы жидкостного скопления в пониженных участках. С увеличением диаметров и объемов вынос жидкости затрудняется и при определенных условиях становится невозможен.

Для создания требуемой скорости необходимо обеспечить определенный перепад давления между шлейфом и входом переключающей аппаратуры. Одним из возможных решений является установка дополнительного компрессора малой мощности на входе в дожимную компрессорную станцию, чтобы ускорить расчет необходимого перепада давления.

Для цитирования: Коловертнов Г. Ю., Аль-Кадаси О. Х. Оценка скорости газового потока, обеспечивающего вынос жидкостных скоплений из газосборной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 115-129. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-115-129>.

Original article

EVALUATION OF THE GAS FLOW VELOCITY, PROVIDING REMOVAL OF LIQUID ACCUMULATIONS FROM THE GAS GATHERING NETWORK

Relevance

At the final stage of oil and gas condensate field operation there are problems of gas outflow and mass flow rate reduction, decrease of temperature of transported gas and increase of well water cut, which, in its turn, promotes liquid accumulation in pipelines and plumes. The complex action of all the above factors causes a sharp formation of ice plugs in the frost season, which disrupts the normal operation of the entire field. To prevent reduction of pipeline throughput capacity it is necessary to promptly remove the accumulated liquid. The optimal option is to carry the water out by the flow of the transported gas itself. For this purpose, the gas flow velocity should be not less than some critical velocity, the value of which depends on many parameters, in particular, the pipeline diameter, the angle of inclination of its upstream section, the densities of gas and liquid

Keywords

gas transportation network, plume, liquid accumulation, π -model, critical gas flow velocity

accumulation in the downstream section, viscosity and volume of liquid accumulation.

Aim of research

The main aim of the research is to improve the efficiency of the automatic control system for the removal of accumulated water in the gas gathering network and to obtain a model linking the parameters, by which it is possible to calculate in real time the pressure drop between the cluster of gas wells and the building of switching equipment, providing a critical rate of gas flow.

Research methods

Using a mathematical model describing the dynamics of water accumulation removal in the process of gas transportation to determine the critical velocity of gas flow, and investigate the limits of its suitability for different plumes. Determine for what diameters of plumes it is reasonable to use the removal of liquid accumulations from plumes by gas flow.

Results

Cleaning of plumes from liquid accumulations is an effective way to improve well performance. The results show that by maintaining the required flow rate, the natural gas flow can effectively remove accumulated water from the gas gathering network. Each plume has its own value, which depends on a variety of factors such as pipeline diameter, upstream inclination angle, liquid accumulation volume, gas and liquid density in the downstream section and other variables.

As a result of the research, it was revealed that the most effective cleaning is carried out at small pipeline diameters (up to 200 mm) — in this case any volumes of liquid accumulation in the downstream sections are removed. With increasing diameters and volumes, the liquid removal becomes more difficult and under certain conditions impossible.

To create the required velocity, it is necessary to provide a certain pressure drop between the plume and the inlet building of the switching equipment. One of the possible solutions is to install an additional compressor of low capacity at the inlet of the booster station to speed up the calculation of the required pressure drop.

For citation: Kolovertnov G. Yu., Al-Qadasi O. Kh. Otsenka skorosti gazovogo potoka, obespechivayushchego vynos zhidkostnykh skopleniy iz gazosbornoy seti [Evaluation of the Gas Flow Velocity, Providing Removal of Liquid Accumulations from the Gas Gathering Network]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 115-129 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-115-129>.

Введение

Многие крупные нефтегазоконденсатные месторождения (НГКМ) Российской Федерации, расположенные на Крайнем Севере, в настоящий момент переходят в завершающую стадию эксплуатации или так называемую стадию падающей добычи. Для неё характерны такие признаки, как снижение пластового давления, уменьшение объемов добываемого газа, обводнение газовых скважин, скопление жидкости в пониженных участках газосборной сети (шлейфов).

Тем не менее, эти месторождения остаются и еще долго будут оставаться важным активом ПАО «Газпром». Поэтому проводится большое количество исследований, направленных на сохранение экономической рентабельности добычи в условиях падающих дебитов и возникающих осложнений, таких как возрастание обводненности продукции скважин, постепенное разрушение забоя и т.п.

Проблема эксплуатации НГКМ в завершающей стадии эксплуатации соб-

ственно одна — отсутствие в мировой практике готовых технических решений и, как следствие, необходимость проведения специальных исследований, направленных главным образом на изменение используемых технологий.

С точки зрения управления эта стадия является наиболее сложной, т.к. во-первых, становится все сложнее выдерживать критерий экономической эффективности добычи, а во-вторых, постоянно возрастает количество технологических осложнений, таких как обводненность забоя и его разрушение. Как следствие, возрастает вероятность образования ледяных пробок и гидратов. Изменения в работе скважин происходят гораздо чаще по сравнению со стадией промышленной эксплуатации. Поэтому данных, получаемых в результате проведения периодических гидродинамических исследований, становится явно недостаточно для оперативного реагирования на возникающие осложнения.

Кроме того, скважинное оборудование (насосно-компрессорные трубы (НКТ)) и газосборная сеть (ГСС) рассчитывались, исходя из минимальных гидравлических потерь при максимальном расходе газа, при этом обеспечивался перманентный вынос воды со всех участков системы. Так, например, объекты обустройства Уренгойского месторождения проектировались для обеспечения максимальных объемов добычи газа, пик которой был достигнут 30 лет назад. С тех пор объемы добываемого газа сократились в несколько раз. В настоящий момент, на завершающем этапе разработки, при сокращении объемов добываемого газа и параметрах существующей ГСС уже нет условий для постоянного выноса воды (в установившемся режиме), соответственно, увеличивается фонд скважин и шлейфов, работающих с накоплением жидкости. Этому способствует и постоянно повышающа-

яся обводненность газа из-за подтягивания газо-водяного контакта (ГВК) к забою скважин. Со временем ситуация будет только усугубляться, поэтому газодобывающие предприятия рассматривают и испытывают различные технологии и методики, позволяющие адаптировать существующую ГСС под многократно уменьшившиеся расходы газа.

Перечисленные задачи являются темой многих исследований [1–8], предлагающих различные способы их решения, как технологические, так и конструктивные. Эти методы направлены на снижение негативных факторов, связанных с накоплением жидкости, например, на предотвращение самозадавливания скважин или полного их останова из-за возрастания давления в верхней точке скважины.

Существует много способов и систем очистки шлейфа и трубопровода от жидкостных скоплений. Однако самым часто применяемым способом поддержания фонда скважин и газосборной сети в рабочем состоянии является продувка на факел. Скважина останавливается на время для того, чтобы переключить шлейф на свечу или на первичный сепаратор, после чего снова запускается. Если пластового давления ещё достаточно, то продувка шлейфа производится со стороны скважины в сторону установки комплексной подготовки газа (УКПГ). Если же пластового давления оказывается недостаточно, то шлейф продувается со стороны УКПГ, где давление газа обеспечивается компрессорной станцией. Увеличение перепада давления за счет разницы давлений на входе в УКПГ и на свече приводит к увеличению скорости газожидкостного потока, что позволяет, как правило, освободить внутреннюю полость шлейфа от накопившейся жидкости [8].

Данный способ имеет ряд существенных недостатков, таких как безвозврат-

ная потеря части извлекаемой продукции и загрязнение окружающей среды, но основной проблемой данного метода является физическая невозможность постоянно продувать большое количество точек системы. Использование других методов требует разработки локальных систем, регулирующих вынос воды из скважин.

Обзор известных концепций построения систем управления кустом газовых скважин

Кустовое расположение скважин является эффективной мерой сокращения затрат на разработку месторождений, но в то же время требует соблюдения дополнительных условий: исключения взаимозадавливания и обратных перетоков между скважинами куста, а также между кустами, подключенными к общему коллектору. Последний фактор имеет особое значение, когда добыча газа осуществляется из разных пластов НГКМ [9].

Генеральная цель при эксплуатации любого газового промысла — это отбор газа при минимальных затратах пластовой энергии. Такой подход не только увеличивает жизненный цикл освоения месторождения, но и удлиняет бескомпрессорный период его эксплуатации. Однако достичь этого можно различными способами, поэтому системы управления кустом газовых скважин (КГС) строятся по различным алгоритмам, в зависимости от конкретной цели управления [10–12].

Например, система управления, описанная в [10] и реализованная в ООО «Газпром добыча Ямбург» на Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении, ставит целью автоматически поддерживать максимально возможное давление в шлейфе куста добывающих скважин, предусмотренное технологическим режимом с учетом их индивидуальных особенностей. Такой

подход обеспечивает автоматическую защиту скважин, не допуская выхода их параметров за установленные максимальные и минимальные ограничения. Работа КГС автоматически стабилизируется за счет минимизации влияния случайных скачков давления, возникающих в газовом коллекторе во время его эксплуатации.

Эта система реализована на базе программного логического контроллера (ПЛК) контролируемого пункта (КП), который уже установлен непосредственно на кусте в существующей и эксплуатируемой системе телемеханики (СТМ) КГС. Управляющие воздействия от ПИД-регуляторов, настраиваемых индивидуально для каждой скважины, реализуются посредством установленных на скважинах куста клапанов-регуляторов, автоматически изменяющих положение рабочего органа и, как следствие, дебит скважины.

В работе [13] рассматриваются системы автоматического регулирования (САР) дебита скважин, являющиеся элементом концепции двухуровневой интеллектуализации газового промысла. В соответствии с этой концепцией система автоматического управления промыслом (САУП) является центральным элементом, обеспечивающим оптимальный сценарий работы газового промысла, а САР, расположенные на КГС, реализуют этот сценарий на скважинах. Их основная задача — поддержание рассчитанного САУП дебита газа скважины посредством расположенного на ней клапана-регулятора. Для успешной работы системы должен быть организован постоянный канал передачи данных между САР и САУП для обмена информацией, где САУП передает в САР уставки и целевые параметры, а САР передает в САУП диагностическую информацию по каждой скважине.

Однако рассмотренные системы неприменимы на старых месторождениях, например Уренгойском, на которых при проектировании не предусматривалась установка каких-либо исполнительных устройств на скважинах, т.е. возможность оперативного регулирования дебита отсутствует. Кроме того, на КГС таких месторождений отсутствует стационарное электроснабжение. Поэтому реализация управляющих воздействий возможна фактически только на стороне здания переключающей аппаратуры (ЗПА). Такое ограничение возможностей заставляет шире использовать локальные САУ, позволяющие устранить или уменьшить влияние отдельных влияющих на работу КГС факторов.

Удалять воду из пониженных участков шлейфа можно за счёт регулирования режима работы ДКС. Например, в [14] предлагается осуществлять кратковременный останов добычи газа на промысле посредством переключения ДКС на холостой ход с последующим включением ее в штатный режим работы и подачи добываемого газа в магистральный газопровод.

За период остановки промысла для переключения ДКС в трубопроводах образуются жидкостные пробки на пониженных участках трассы, и жидкость в стволах скважин скапливается на забое, частично поглощаясь в пласт. Далее при достаточно быстром переключении ДКС на обычную работу в газопровод происходит «выплесывание» жидкой фазы из скважин и соединительных трубопроводов. Очевидным недостатком данного технического решения является то, что для его осуществления требуется хоть и кратковременная, но полная остановка ДКС с последующим резким запуском на полную мощность. Причём повторение данного действия происходит достаточно часто. Так, например, для месторождения «Медвежье» требуется полная

остановка ДКС на 10 мин с периодичностью 1 раз в сутки [15].

Кроме того, как уже говорилось ранее, на некоторых Уренгойских УКПГ, находящихся на этапе падающей добычи, производится объединение газовых промыслов (ГП), а также объединение нескольких шлейфов скважин в один, при котором газ с одних ГП окончательно компримируется на других. В этом случае даже кратковременная остановка одного ГП для последующей продувки может привести к остановке всего узла.

На сеноманских ДКС Уренгойского НГКМ существует опыт удаления воды из шлейфов путём периодического понижения входного давления [16]. В данном техническом решении давление понижается для всего фонда скважин и всей ГСС. Проблема заключается в том, что создать контролируемое и необходимое по величине и времени воздействие именно в нужной точке данный способ не позволяет, а наоборот, воздействует только в тех местах, где оно нежелательно.

Эффективным способом восстановления работоспособности скважин является продувка скважин и шлейфов через газосборный коллектор с подачей газа на УКПГ, которая осуществляется за счёт установки дополнительного маломощного компрессора [17].

Система управления содержит установленные на каждой скважине преобразователи температуры и давления, включенные в систему телеметрии и позволяющие получать данные в реальном времени, например типа РТП-04. Такие же преобразователи устанавливают в контролируемых точках: в начале шлейфа на кустовых коллекторах, на входе в ЗПА и на пониженных участках шлейфа, где может скапливаться жидкость. Эти точки определяются индивидуально для каждого месторождения в зависимости от

рельефа местности, технологической схемы ГП и других факторов. По перепаду давлений «устье скважин — кустовой коллектор» можно качественно судить об изменении расхода газа со скважин. Перепад давлений «кустовой коллектор — ЗПА» позволяет судить об изменении сопротивления шлейфа и определять развитие ледяных или гидратных пробок в шлейфе. Перепады давлений между контролируемыми точками шлейфа позволяют судить о месте возникновения пробок и контролировать их разрушение под воздействием повышенного расхода. На входе в ЗПА на каждом кустовом коллекторе устанавливаются автоматические регуляторы. При увеличении гидравлического сопротивления шлейфа, свидетельствующего об образовании ледяной пробки, за счет увеличения степени сжатия дополнительного компрессора понижается давление в общем коллекторе ЗПА. Выбор конкретных скважин или шлейфов со скоплением жидкости для снижения давления производится автоматическими регуляторами.

Недостаток данной системы — отсутствие определения конкретного значения перепада давления, который надо создать для обеспечения критической скорости газового потока и выноса им жидкости.

Поэтому задача дальнейшего развития автоматической системы удаления жидкости из шлейфа куста газовых скважин для управления их работой является актуальной.

Постановка задачи исследования

Проведенный обзор систем управления позволяет сделать вывод, что некоторые проблемы эксплуатации ГСС могут быть решены изменением концепции построения автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) — газовым про-

мыслом, например за счет более широкого использования различных моделей, в том числе когнитивных, виртуальных анализаторов, введения элементов предиктивной диагностики, непрерывного мониторинга некоторых параметров и т.д. То же самое относится и к концепциям построения локальных систем автоматического управления (САУ).

Наиболее действенным методом выноса воды из шлейфа является вынос скопления жидкости посредством энергии самого транспортируемого газа без выпуска газа в атмосферу. Однако для повышения эффективности работы автоматической системы управления удалением воды необходимо не только получить математическую модель, описывающую динамику выноса водных скоплений в процессе транспортировки газа, для определения критической скорости газового потока, но и исследовать границы ее применимости для разных шлейфов.

Материалы и методы

Проблема скопления воды в пониженных участках шлейфов газосборных сетей возникает на завершающей стадии разработки месторождения, когда происходит снижение пластового давления и увеличение содержания в газе пластовой жидкости. Эти факторы создают условия для накопления жидкости в трубопроводах ГСС, что приводит к ряду эксплуатационных проблем, включая рост потерь давления по длине шлейфов, залповые выбросы жидкости во входные сепараторы установок комплексной подготовки газа, а также увеличение риска льдо- и гидратообразования.

Наиболее сложными участками шлейфов ГСС с точки зрения образования водных скоплений являются пониженные участки, так называемые U-образные колена, т.к. наличие в них застойной

зоны приводит к формированию газоигдратных отложений (рисунок 1).

Такие участки понижения трассы образуются в местах перехода через реки, ручьи, овраги или при переходе на более высокий участок рельефа местности (рисунок 2).

Исследования показывают, что при движении газожидкостного потока по шлейфу ключевыми параметрами являются диаметр трубопровода H , поскольку от него зависит пропускная способность

шлейфа; угол наклона восходящего участка α , который влияет на режим течения потока; плотность жидкости $\rho_{ж}$, оказывающая существенное влияние на давление в шлейфе, и ее количество $V_{ж}$. К влияющим факторам также можно отнести плотность газа и вязкость жидкостного скопления $\mu_{ж}$.

На основе теории размерностей и π -теоремы получена связывающая эти параметры математическая модель для определения критической скорости

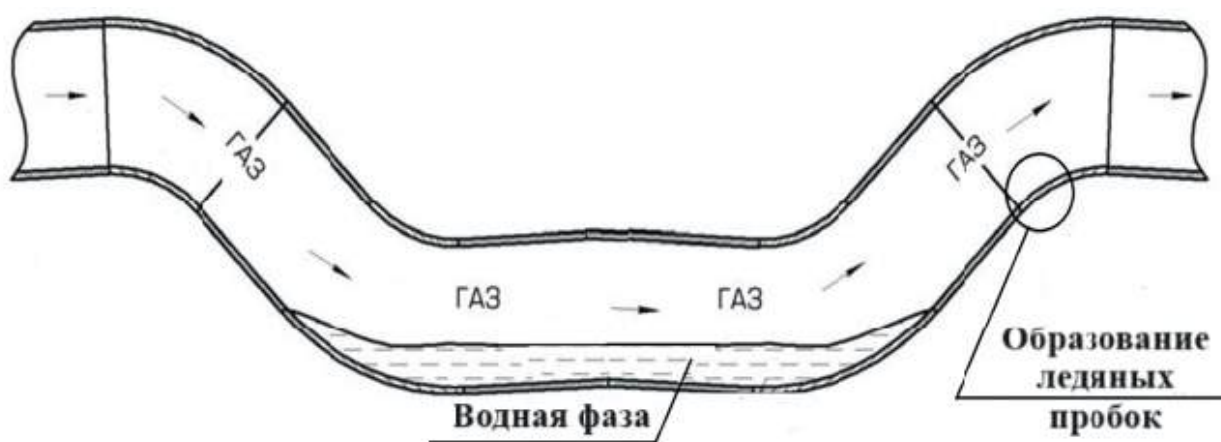


Рисунок 1. Скопление воды на пониженном участке шлейфа

Figure 1. Water accumulation on the lowered section of the plume



Рисунок 2. Шлейфы газосборной сети

Figure 2. Gas gathering network loops

потока газа ($U_{кр}$), которая способна обеспечить вынос воды из U-образного колена. Её встраивание в систему управления КГС позволяет при обнаружении водного скопления в режиме реального времени рассчитать эту скорость и необходимый для ее обеспечения перепад давления шлейф — вход ЗПА.

Перед практическим использованием способа выноса жидкостных скоплений потоком газа необходимо провести дополнительные исследования по полученной модели для определения границ его применимости.

Результаты и их обсуждение

Шлейфы исследуемого куста газовых скважин представляют собой трубопроводы небольшой протяженности примерно от 2 до 12 км диаметром от 200 до 500 мм [1]. Их назначение — транспортировка газа до УКПГ за счет его собственной энергии (давления пласта). Скорость движения газа или газожид-

костной смеси по шлейфу зависит от диаметра шлейфа и перепада давления между КГС и входом в ЗПА (рисунок 3).

Для определения критической скорости потока, которая обеспечит вынос жидкости самим газом, необходимо для каждого шлейфа выполнить индивидуальный расчет. Его цель — определить, каким будет перепад давлений в трубопроводе для обеспечения требуемой скорости газового потока, которой будет достаточно для выполнения его самоочистки.

Необходимо также учитывать, что возможность выноса зависит от объема водного скопления. Для определения границ применимости модели проведены численные эксперименты. Параметры ГСС, при которых производился расчет, представлены в таблице 1.

Трубопровод проходит в грунте, температура которого около 293 К. Давление в очищаемом газопроводе P_2 можно

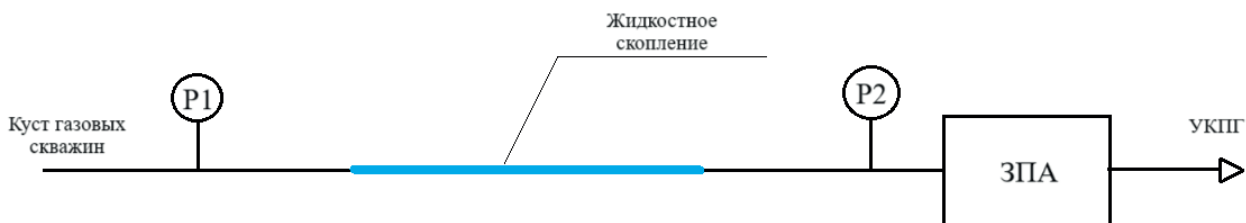


Рисунок 3. Очищаемый участок газосборной системы

Figure 3. Cleaned section of the gas gathering system

Таблица 1. Значения параметров ГСС для расчета скорости потока

Table 1. Values of gas gathering network parameters for calculation of flow velocity

Наименование параметра	Значение
Диаметр газопровода H , м	0,2; 0,3
Плотность жидкостного скопления $\rho_{ж}$, кг/м ³	1000
Вязкость жидкостного скопления $\mu_{ж}$, мм ² /с	50
Угол наклона пониженного участка трубопровода α , °	30
Давление на устье скважины P_1 , МПа	6,8
Плотность газа $\rho_г$, кг/м ³	1,2

изменять от 0,5 до 6,8 МПа, расход газа по газопроводу-шлейфу равен 40 м³/с.

Расчет проведен при четырех различных объемах жидкостного скопления: 10 %, 25 %, 50 %, 75 % заполнения трубопровода водой. В абсолютных единицах это соответствует объемам 2,35; 3,92; 7,85; 11,78 м³.

Результаты расчетов для шлейфа диаметром 200 мм приведены на рисунке 4 и в таблице 2.

По полученным графикам видно, что с увеличением жидкостного скопления в пониженном участке шлейфа куста газовых скважин при малом диаметре трубопровода требуемая скорость газового

потока изменяется незначительно, как и значение давления. Это позволяет производить очистку шлейфа предложенным техническим решением при любых объемах жидкостных скоплений.

На рисунке 5 и в таблице 3 показаны результаты аналогичных расчетов для диаметра 300 мм.

Таким образом, предложенный способ очистки пониженных участков шлейфов куста газовых скважин следует применять на небольших диаметрах трубопровода, поскольку в таких шлейфах вынос воды происходит при любом объеме заполнения трубопровода.

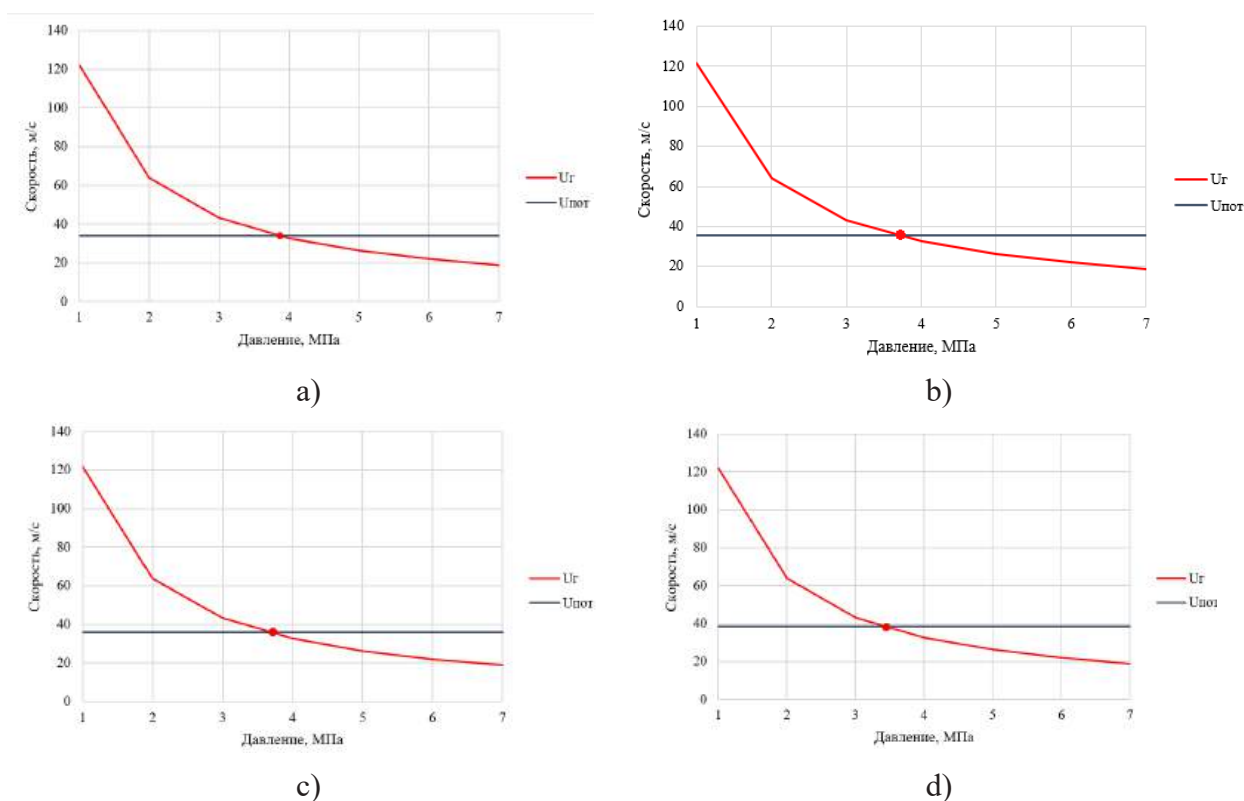


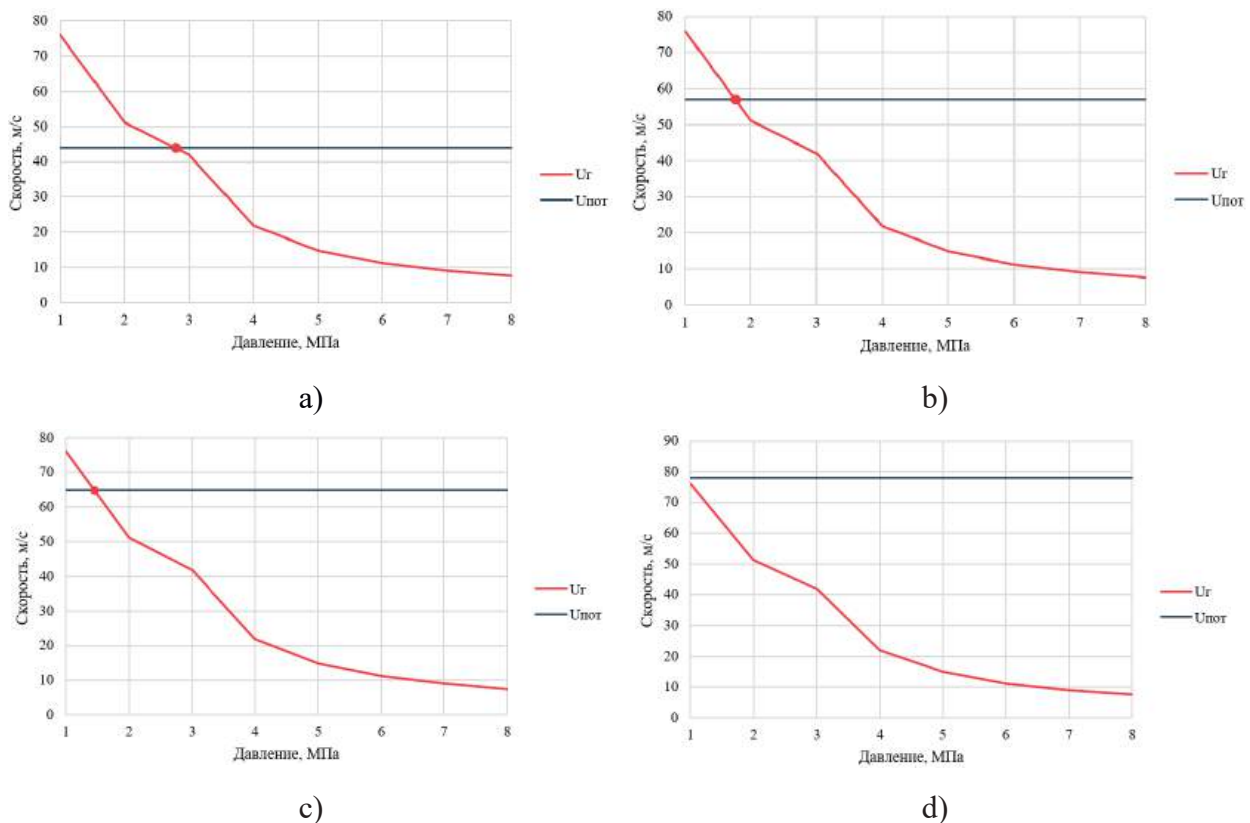
Рисунок 4. Результаты расчета скорости газового потока v_r (красная линия) и критической скорости газожидкостной смеси $v_{кр}$ (синяя линия) для различного объема жидкостного скопления в шлейфе диаметром 200 мм

Figure 4. Calculation results of gas flow velocity v_r (red line) and critical velocity of gas-liquid mixture $v_{кр}$ (blue line) for different volumes of liquid accumulation in a 200 mm diameter plume

Таблица 2. Значения критической скорости газожидкостной смеси и давления на входе в ЗПА для различного объема жидкостного скопления в шлейфе диаметром 200 мм

Table 2. Values of the critical velocity of the gas-liquid mixture and pressure at the inlet to the switchgear building for different volumes of liquid accumulation in a 200 mm diameter plume

Объем жидкостного скопления, % (м³)	Критическая скорость газожидкостной смеси, м/с	Давление на входе в ЗПА, МПа
10 (2,35)	33,99	3,9
25 (3,92)	35,5	3,7
50 (7,85)	36,1	3,6
75 (11,78)	38,5	3,4



a) объем жидкостного скопления 10 %, b) объем жидкостного скопления 25 %, c) объем жидкостного скопления 50 %, d) объем жидкостного скопления 75 %

a) liquid accumulation volume 10 %, b) liquid accumulation volume 25 %, c) liquid accumulation volume 50 %, d) liquid accumulation volume 75 %

Рисунок 5. Результаты расчета скорости газового потока v_r (красная линия) и критической скорости газожидкостной смеси $v_{кр}$ (синяя линия) для различного объема жидкостного скопления в шлейфе диаметром 300 мм

Figure 5. Calculation results of gas flow velocity v_r (red line) and critical velocity of gas-liquid mixture $v_{кр}$ (blue line) for different volumes of liquid accumulation in a 300 mm diameter plume

Таблица 3. Значения критической скорости газожидкостной смеси и давления на входе в ЗПА для различного объема жидкостного скопления в шлейфе диаметром 300 мм

Table 3. Values of the critical velocity of the gas-liquid mixture and pressure at the inlet to the switchgear building for different volumes of liquid accumulation in a 300 mm diameter plume

Объем жидкостного скопления, % (м ³)	Критическая скорость газожидкостной смеси, м/с	Давление на входе в ЗПА, МПа
10 (5,3)	44,41	2,8
25 (8,83)	57,3	1,8
50 (17,67)	65,2	1,5
75 (26,5)	—	—

При больших диаметрах описанное техническое решение не может быть реализовано непосредственно, но его можно использовать после замены трубопровода на трубы меньшего диаметра или после применения технологии «труба в трубе».

Выводы

Очистка пониженных участков шлейфа газовых скважин от жидкостных скоплений является рутинной и часто выполняемой операцией практически для всех северных месторождений, находящихся на завершающем этапе эксплуатации.

Удаление таких скоплений через газосборный коллектор возможно самим потоком газа, если будет обеспечена необходимая для этого так называемая критическая скорость потока. Её конкретное значение индивидуально для каждого шлейфа и зависит от таких факторов, как диаметр трубопровода, угол наклона его восходящего участка, объем жидкостного скопления, плотность газа и жидкостного скопления в пониженном участке и других.

Для создания критической скорости необходимо создать определенный пере-

пад давления между шлейфом и входом в ЗПА, например при помощи дополнительно установленного на входе в ДКС малоомощного компрессора. Для оперативного расчета требуемого перепада давления в систему управления работой куста газовых скважин встраивается математическая модель, позволяющая в режиме реального времени определять саму критическую скорость и соответствующий ей перепад давления.

Очистка шлейфов «самовыносом» жидкостных скоплений является эффективным способом восстановления работоспособности скважин. Результаты исследований показывают, что очистку шлейфа этим способом эффективнее всего проводить при малых диаметрах трубопровода (до 200 мм) — в этом случае выносятся любые объемы жидкостного скопления в пониженных участках. С увеличением диаметров и объемов вынос жидкости затрудняется и при определенных условиях становится невозможен. В таких случаях его использование возможно только после замены на трубы меньшего диаметра или после применения технологии «труба в трубе».

Список источников

1. Краснов А.Н., Прахова М.Ю., Хорошавина Е.А. Автоматическое удаление жидкости из низконапорных шлейфов и коллекторов газовых промыслов // Евразийский Союз Ученых. 2018. № 12 (57). С. 41–46.
2. Краснов А.Н. Особенности эксплуатации газосборной системы в условиях накопления жидкости // Нефтегазовое дело. 2018. № 3, Т. 16. С. 118–126. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-118-126. EDN: HWWIDB.
3. Ротов А.А., Сулейманов В.А., Истомин В.А., Чельцова Т.В., Митницкий Р.А. Основные технические решения по предотвращению накопления жидкости в газосборных сетях // Вести газовой науки. 2015. № 3. С. 109–115. EDN: WJGQFL.
4. Усольцев М.Е. Удаление скоплений жидкости из пониженных участков газопровода потоком транспортируемого газа: дисс. ... канд. техн. наук. СПб: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2012. 128 с.
5. Дикамов Д.В., Ротов А.А., Изюмченко Д.В., Истомин В.А., Елистратов А.В., Чельцова Т.В. Влияние технических мероприятий по борьбе с накоплением жидкости в газосборных сетях на режимы эксплуатации скважин // Научно-технический сборник «Вести газовой науки», 2016. № 2(26). С. 78–83. EDN: YKMXOL.
6. Гимпу Д.С., Гимпу М.С. Решение проблем эксплуатации длинных трубопроводов от кустов скважин до ЗПА, при обустройстве месторождений на Гыданском и Ямальском полуостровах // Технические науки в России и за рубежом: матер. III Междунар. науч. конф. (г. Москва, июль 2014 г.). М.: Буки-Веди, 2014. С. 108–112.
7. Скоробогач М.А. Совершенствование методов управления системой добычи газа на основе рационального использования пластовой энергии: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2012. 119 с.
8. Истомин В.А., Квон В.Г., Тройникова А.А., Нефёдов П.А. Особенности предупреждения льдо- и гидратообразования в системах сбора газа на поздней стадии эксплуатации сеноманских залежей месторождений Западной Сибири // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 2. С. 25–30. EDN: XAGIQB.
9. Пат. 62656 РФ, МПК Е 21 В 43/12. Система автоматического поддержания давления на кусте скважин / В.Я. Бырко, А.Ф. Поеджаев. 2006143143/22, Заявлено 05.12.2006; Оpubл. 24.04.2004. Бюл. 12.
10. Арно О.Б., Николаев О.А., Арабский А.К., Гункин С.И., Турбин А.А., Смердин И.В., Талыбов Э.Г., Пономарев В.Л., Железный С.П. Система автоматического управления работой куста газовых и газоконденсатных скважин в условиях Севера // Газовая промышленность. 2019. Спецвыпуск № 1 (782). С. 12–17. EDN: XQILSB.
11. Пат. 2559268 РФ, МПК Е 21 В 47/00, Е 21 В 43/00. Система адаптивного автоматического управления производительностью куста газовых скважин / А.В. Кононов, К.В. Степовой, С.В. Мороз. 2014105000/03, Заявлено 12.02.2014; Оpubл. 10.08.2015. Бюл. 22.
12. Пат. 2643884 РФ, МПК F 17 D 5/00. Способ автоматического управления технологическими процессами куста газовых и газоконденсатных скважин / О.Б. Арно, А.К. Арабский, С.И. Гункин и др. 2017102304, Заявлено 25.01.2017; Оpubл. 06.02.2018. Бюл. 4.
13. Пospelова Т.А. и др. Система автоматического регулирования газовых скважин в режиме реального времени // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 1. С. 26–36. DOI: 10.33285/2782-604X-2022-1(582)-26-36. EDN: ASUMLU.
14. Пат. 2346147 РФ, МПК Е 21 В 43/00. Способ эксплуатации скважин и системы сбора газа в компрессорный период разработки газовых и газоконденсатных месторождений / Е.Н. Астафьев, И.И. Байдин, В.А. Истомин, А.Ю. Максимчук. 2007122304/03, Заявлено 15.06.2007; Оpubл. 10.02.2009. Бюл. 4.
15. Скоробогач М.А. Проблемы эксплуатации системы сбора газа на месторождении Медвежье // Технологии нефти и газа. 2011. № 6. С. 42–47. EDN: OXWWJT.
16. Отчет о проведении комплексного обследования УКПГ-5 Уренгойского НГКМ ООО «Газпром добыча Уренгой». СПб: ООО «НПЦ «Знание», 2016. 188 с.
17. Пат. 2597390 РФ, МПК Е 21 В 43/00. Способ эксплуатации газового промысла при коллекторно-лучевой организации схемы сбора на завершающей стадии разработки месторождения / Г.Ю. Коловертнов, А.Н. Краснов, С.Н. Федоров, М.Ю. Прахова, Е.А. Хорошавина, С.В. Щербинин. 2015122859/03, Заявлено 15.06.2015; Оpubл. 10.09.2016. Бюл. 25.

References

1. Krasnov A.N., Prakhova M.Yu., Khoroshavina E.A. Avtomaticheskoe udalenie zhidkosti iz nizkonapornykh shleifov i kollektorov gazovykh promyslov [Automatic Removal of Liquid from Low-Pressure Plumes and Collectors of Gas Fields]. *Evraziiskii Soyuz Uchenykh — Eurasian Union of*

Scientists, 2018, No. 12 (57), pp. 41–46. [in Russian].

2. Krasnov A.N. Osobennosti ekspluatatsii gazosbornoi sistemy v usloviyakh nakopleniya zhidkosti [Features of Gas-Collection System Operation under Liquid Accumulation]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, No. 3, Vol. 16, pp. 118–126. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-4-118-126. EDN: HWWIDB. [in Russian].

3. Rotov A.A., Suleimanov V.A., Istomin V.A., Chel'tsova T.V., Mitnitskii R.A. Osnovnye tekhnicheskie resheniya po predotvrashcheniyu nakopleniya zhidkosti v gazosbornykh setyakh [Main Technical Solutions for Preventing Liquid Accumulation in Gas Gathering Networks]. *Vesti gazovoi nauki — News of Gas Science*, 2015, No. 3, pp. 109–115. EDN: WJGQFL. [in Russian].

4. Usol'tsev M.E. *Udalenie skoplenii zhidkosti iz ponizhennykh uchastkov gazoprovoda potokom transportiruemogo gaza: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Removal of Liquid Accumulations from Low-Lying Sections of a Gas Pipeline by the Flow of Transported Gas: Cand. of Engin. Sci. Diss.]. Saint-Petersburg, Nats. mineral'no-syr'evoi un-t «Gornyi», 2012. 128 p. [in Russian].

5. Dikamov D.V., Rotov A.A., Izyumchenko D.V., Istomin V.A., Elistratov A.V., Chel'tsova T.V. Vliyanie tekhnicheskikh meropriyatiy po bor'be s nakopleniem zhidkosti v gazosbornykh setyakh na rezhimy ekspluatatsii skvazhin [Impact of Engineering Arrangements for Prevention of Liquid Accumulation in Gas-Collecting Systems to Well Operation Modes]. *Vesti gazovoi nauki — News of Gas Science*, 2016, No. 2(26), pp. 78–83. EDN: YKMXOL. [in Russian].

6. Gimpu D.S., Gimpu M.S. Reshenie problem ekspluatatsii dlinnykh truboprovodov ot kustov skvazhin do ZPA, pri obustroistve mestorozhdenii na Gydanskom i Yamal'skom poluostrovakh [Solving the Problems of Operating Long Pipelines from Well Clusters to ZPA during Field Development on the Gydan and Yamal Peninsulas]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom» (g. Moskva, iyul' 2014 g.)* [Proceedings of III International Scientific Conference «Technical Sciences in Russia and Abroad» (Moscow, July 2014). Moscow, Buki-Vedi Publ., 2014, pp. 108–112. [in Russian].

7. Skorobogach M.A. *Sovershenstvovanie metodov upravleniya sistemoy dobychi gaza na osnove ratsional'nogo ispol'zovaniya plastovoi energii: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving Gas Production System Management Methods Based on Rational Use of Reservoir Energy: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 2012. 119 p. [in Russian].

8. Istomin V.A., Kvon V.G., Troinikova A.A., Nefedov P.A. Osobennosti preduprezhdeniya l'do i gidratoobrazovaniya v sistemakh sbora gaza na pozdnei stadii ekspluatatsii senomanskikh zalezhei mestorozhdenii Zapadnoi Sibiri [Some Features of Ice and Gas Hydrates Prevention in Gas-Gathering Systems at the Development Latest Stage of Cenomanian Fields in Western Siberia]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya — Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2016, No. 2, pp. 25–30. EDN: XAGIQB. [in Russian].

9. Byrko V.Ya., Poezzhaev A.F. *Sistema avtomaticheskogo podderzhaniya davleniya na kuste skvazhin* [Automatic Pressure Maintenance System on a Well Cluster]. Patent RF, No. 62656, 2004. [in Russian].

10. Arno O.B., Nikolaev O.A., Arabskii A.K., Gunkin S.I., Turbin A.A., Smerdin I.V., Talybov E.G., Ponomarev V.L., Zheleznyi S.P. Sistema avtomaticheskogo upravleniya rabotoi kusta gazovykh i gazokondensatnykh skvazhin v usloviyakh Severa [The System of Automatic Control of the Cluster of Gas and Gas Condensate Wells Operation in the Northern Conditions]. *Gazovaya promyshlennost' — Gas Industry*, 2019. Special Issue No. 1 (782), pp. 12–17. EDN: XQILSB. [in Russian].

11. Kononov A.V., Stepovoi K.V., Moroz S.V. *Sistema adaptivnogo avtomaticheskogo upravleniya proizvoditel'nost'yu kusta gazovykh skvazhin* [Adaptive Automatic Control System for the Performance of a Cluster of Gas Wells]. Patent RF, No. 2559268, 2015. [in Russian].

12. Arno O.B., Arabskii A.K., Gunkin S.I. e.a. *Sposob avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami kusta gazovykh i gazokondensatnykh skvazhin* [Method for Automatic Control of Technological Processes of a Cluster of Gas and Gas Condensate Wells]. Patent RF, No. 2643884, 2018. [in Russian].

13. Pospelova T.A. e.a. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya gazovykh skvazhin v rezhime real'nogo vremeni [Automatic System of Gas Wells Control in Real Time]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK — Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex*, 2022, No. 1, pp. 26–36. DOI: 10.33285/2782-604X-2022-1(582)-26-36. EDN: ASUMLU. [in Russian].

14. Astaf'ev E.N., Baidin I.I., Istomin V.A., Maksimchuk A.Yu. *Sposob ekspluatatsii skvazhin i sistemy sbora gaza v kompressornyi period razrabotki gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenii* [Method of Operating Wells And Gas Gathering Systems during the Compressor Period

of Development of Gas and Gas Condensate Fields]. Patent RF, No. 2346147, 2009. [in Russian].

15. Skorobogach M.A. Problemy ekspluatatsii sistemy shora gaza na mestorozhdenii Medvezh'e [Problems at Medvezhye Gas Field Gathering System Exploitation]. *Tekhnologii nefii i gaza — Oil and Gas Technologies*, 2011, No. 6, pp. 42–47. EDN: OXWWJT. [in Russian].

16. *Otchet o provedenii kompleksnogo obsledovaniya UKPG-5 Urengoi'skogo NGKM OOO «Gazprom dobycha Urengoi»* [Report on the Comprehensive Survey of UKPG-5 of the Urengoy OGCF of Gazprom Dobycha Urengoy LLC]. Saint-

Petersburg, OOO «NPTs «Znanie», 2016. 188 p. [in Russian].

17. Kolovertnov G.Yu., Krasnov A.N., Fedorov S.N., Prakhova M.Yu., Khoroshavina E.A., Shcherbinin S.V. *Sposob ekspluatatsii gazovogo promysla pri kollektorno-luchevoi organizatsii skhemy shora na zavershayushchei stadii razrabotki mestorozhdeniya* [Method of Operating a Gas Field with a Collector-Beam Organization of the Collection Scheme at the Final Stage of Field Development]. Patent RF, No. 2597390, 2016. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 18.12.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 24.01.2025.

The article was submitted 18.12.2024; approved after reviewing 17.01.2025; accepted for publication 24.01.2025.

Научная статья

УДК 004.4

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-130-140

ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ СОБЕСЕДОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА



Данил Мирсаяфович Кабиров

Danil M. Kabirov

*магистрант кафедры «Информационные технологии и прикладная математика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*



Ольга Аркадьевна Денисова

Olga A. Denisova

*доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Физика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*

Актуальность

Актуальность разработки платформы для автоматизации собеседований с использованием искусственного интеллекта определяется рядом факторов. Концепция этого продукта затрагивает две важные области: информационные технологии и управление человеческими ресурсами. Во-первых, многие отрасли активно нуждаются в замене устаревших методов организации HR-процессов инновационными решениями с использованием искусственного интеллекта. Во-вторых, в ходе работы затрагивается изучение возможностей интеграции различных методов машинного обучения в процессы подбора персонала, что является актуальной темой на протяжении последних 5 лет.

Нынешняя реализация традиционного подхода к подбору персонала часто сталкивается со многими трудностями: от высокой трудоемкости процессов отбора кандидатов до сложности оценки их профессиональных и личных качеств. В связи с этим поиск и внедрение инновационных решений, нацеленных на оптимизацию и улучшение процесса подбора специалистов, выходит на передний план.

Цель исследования

Разработать веб-платформу для автоматизации процесса подбора персонала с использованием технологий искусственного интеллекта, которая позволит повысить эффективность найма и точность оценки кандидатов.

Методы исследования

Анализ существующих бизнес-процессов, разработка программного обеспечения с использованием Next.js и Prisma и алгоритмов машинного обучения для генерации тестовых заданий, распознавания лиц и анализа эмоционального фона кандидатов.

Ключевые слова

искусственный интеллект,
машинное обучение,
нефтегазовая отрасль,
проведение
собеседований,
HR-менеджер,
соискатель,
веб-платформа,
автоматизация

Результаты

Разработана веб-платформа, которая успешно автоматизирует процесс подбора персонала в нефтегазовой отрасли за счет интеграции технологий искусственного интеллекта для генерации тестовых заданий, распознавания лиц и анализа эмоционального фона кандидатов. Платформа обеспечивает высокую производительность и масштабируемость за счет использования современных технологий, таких как Next.js, Prisma, WebSockets и peer-to-peer соединения. Реализованный функционал, включающий создание и публикацию вакансий, регистрацию пользователей и онлайн-собеседования, значительно повышает эффективность и точность оценки кандидатов, что делает платформу конкурентоспособной на рынке.

Для цитирования: Кабиров Д. М., Денисова О. А. Платформа для автоматизации проведения собеседований с применением искусственного интеллекта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 130-140. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-130-140>.

Original article

A PLATFORM FOR AUTOMATING INTERVIEWS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Relevance

The relevance of developing a platform for automating interviews using artificial intelligence is determined by a number of factors. The concept of this product touches on two important areas: information technology and human resource management. Many industries actively need to replace outdated methods of organizing HR processes with innovative solutions using artificial intelligence. Secondly, in the course of the work, the study of the possibilities of integrating various machine learning methods into recruitment processes is touched upon, which has been an urgent topic for the past 5 years.

The current implementation of the traditional approach to recruitment often faces many difficulties, from the high complexity of the candidate selection processes to the difficulty of assessing their professional and personal qualities. In this regard, the search and implementation of innovative solutions aimed at optimizing and improving the recruitment process is coming to the fore.

Aim of research

To develop a web platform for automating the recruitment process using artificial intelligence technologies, which will improve the efficiency of hiring and the accuracy of evaluating candidates.

Research methods

Analysis of existing business processes, software development using Next.js and Prisma, and machine learning algorithms for generating test tasks, facial recognition and analyzing the emotional background of candidates.

Results

A web platform has been developed that successfully automates the recruitment process in the oil and gas industry by integrating artificial intelligence technologies to generate test tasks, face recognition and analyze the emotional background of candidates. The platform provides high performance and scalability through the use of modern technologies such as Next.js, Prisma, WebSockets and peer-to-peer connections.

Keywords

artificial intelligence, machine learning, oil and gas industry, conducting interviews, HR manager, job seeker, web platform, automation

The implemented functionality, including the creation and publication of vacancies, user registration and online interviews, significantly increases the efficiency and accuracy of evaluating candidates, which makes the platform competitive in the market.

For citation: Denisova O. A., Kabirov D. M. Platforma dlya avtomatizatsii provedeniya sobesedovaniy s primeneniym iskusstvennogo intellekta [A Platform for Automating Interviews Using Artificial Intelligence]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 130-140 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-130-140>.

Введение

Повышение конкурентоспособности компаний на рынке требует постоянного совершенствования их бизнес-процессов. Автоматизация — один из наиболее эффективных способов достижения этой цели. Тема подбора персонала не является исключением из правил. Автоматизация собеседований становится все более популярной, предлагая ряд преимуществ, таких как повышение эффективности работы, сокращение расходов на персонал, улучшение обслуживания клиентов, повышение производительности и уменьшение количества ошибок. В связи с этим использование искусственного интеллекта для автоматизации процесса подбора персонала является одной из наиболее актуальных тем в крупных компаниях.

Реализация традиционного подхода к подбору персонала на рынке труда часто сталкивается со многими трудностями, начиная от высокой сложности процессов отбора кандидатов и заканчивая сложностью оценки их профессиональных и личностных качеств [1]. В связи с этим на первый план выходит поиск и внедрение инновационных решений, направленных на оптимизацию и совершенствование процесса подбора персонала. Анализ рынка показывает, что общая выручка крупнейших HR-tech компаний России за 2024 год достигла около 34,1 млрд руб., что свидетельствует о росте на 21,8 % по сравнению с 2023 годом. Этот значительный прирост

демонстрирует высокую динамику развития сектора и его способность адаптироваться к изменяющимся условиям рынка. Такие темпы развития указывают на усиление интереса к HR-технологиям и их роль в стратегическом управлении человеческими ресурсами.

Искусственный интеллект (ИИ) способен существенно преобразовать сектор управления персоналом, предлагая решения для автоматизации рутинных задач, повышения точности оценки кандидатов и снижения влияния человеческого фактора на отбор кандидатов. Использование ИИ в процессе собеседования может способствовать гораздо более объективному и эффективному процессу подбора персонала.

Эффективная автоматизация процесса подбора персонала может значительно повысить качество и безопасность работы новых сотрудников, например, нефтегазовая отрасль требует от сотрудников высокого уровня специализированных знаний и навыков. Кроме того, важность подбора персонала в этой области возрастает из-за высоких рисков, связанных с охраной труда и ответственностью за крупномасштабные и рискованные проекты.

Автоматизация процесса найма имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартным подходом. Автоматизированные системы могут обрабатывать большие объемы информации быстрее, чем это возможно вручную, искусственный интеллект сводит к минимуму риск

человеческой ошибки, что особенно важно при анализе больших данных, использование предварительного анализа данных о кандидатах отсеивает неподходящих соискателей еще до этапа собеседования. Системы, основанные на искусственном интеллекте, могут постоянно совершенствоваться путем анализа результатов и обратной связи, что со временем повышает их эффективность [2].

Технологии и инструменты, использованные при разработке веб-платформы

Для разработки платформы, предназначенной для автоматизации собеседований с использованием искусственного интеллекта, был выбран Next.js в качестве основного инструмента. Этот фреймворк на основе JavaScript быстро развивается и становится всё более популярным [3]. Next.js используется для создания веб-приложений с использованием современных методов и инновационной архитектуры. Одним из основных преимуществ Next.js, определивших его выбор, является рендеринг на стороне сервера. Это существенно новый подход в области разработки. Отличительной особенностью этого фреймворка является то, что приложения на его основе работают не только на стороне клиента, но и на стороне сервера, что позволяет создавать клиент-серверные веб-приложения в рамках единого проекта.

Основное правило построения архитектуры на Next.js — это разбиение кода на компоненты. Весь код разбит на независимые модули. Каждый модуль отвечает за определенную функциональность и может использоваться в разных местах проекта. Чтобы следовать этому принципу, необходимо соблюдать правила проектирования архитектуры Next.js. Строгие принципы компонентной архитектуры подразумевают использование определенной иерархии папок и

файлов в проекте. Каждая страница веб-приложения должна быть создана в виде отдельного файла в специальном каталоге.

Для упрощения реализации связи между базой данных и приложением было решено использовать объектно-реляционное отображение Prisma. Это современный инструмент для работы с базами данных в веб-приложениях, упрощающий взаимодействие с базами данных и ускоряющий разработку [4]. Одним из главных преимуществ Prisma является возможность написания структур данных на языке GraphQL SDL. Этот язык прост в чтении и эффективен при изменении схем баз данных. Используя Prisma, можно отправлять запросы к базе данных через Graph API вместо стандартного устаревшего подхода к написанию кода на языке SQL.

Технологии WebSockets и peers были выбраны для реализации асинхронных запросов и возможности подключения пользователей из разных сетей с целью проведения видеосовещаний в режиме реального времени [5].

Технология WebSockets обеспечивает двустороннее соединение между браузером пользователя и API платформы через один TCP-сокет (рисунок 1). Такой подход в отличие от стандартного HTTP, при котором клиент отправляет запрос на сервер, а затем ожидает ответа, реализует установку постоянно открытого соединения между браузером клиента и серверным приложением. Эта технология используется для обмена данными в режиме реального времени. Большим преимуществом является то, что нет необходимости отправлять запросы на подтверждение на сервер в ожидании ответа, что делает передачу данных мгновенной при таком подходе. Открытое соединение клиент — сервер снижает нагрузку на базу данных, так как нет необходимости принимать бес-

конечные запросы. Такой подход способствует более быстрому обмену информацией. Еще одним отличием от HTTP-запросов является возможность сервера передавать данные без предварительного запроса от клиента.

Пирь (peers) — это пользователи, находящиеся в разных сетях и устанавливающие подключение друг к другу

(рисунк 2). Пиринговая сеть (p2p — peer-to-peer) основана на равноправии участников. Данный подход позволяет реализовать обмен запросами, например видео и аудио, между клиентами напрямую, минуя сервер. Это устраняет посредничество сервера веб-приложения между пользователями.

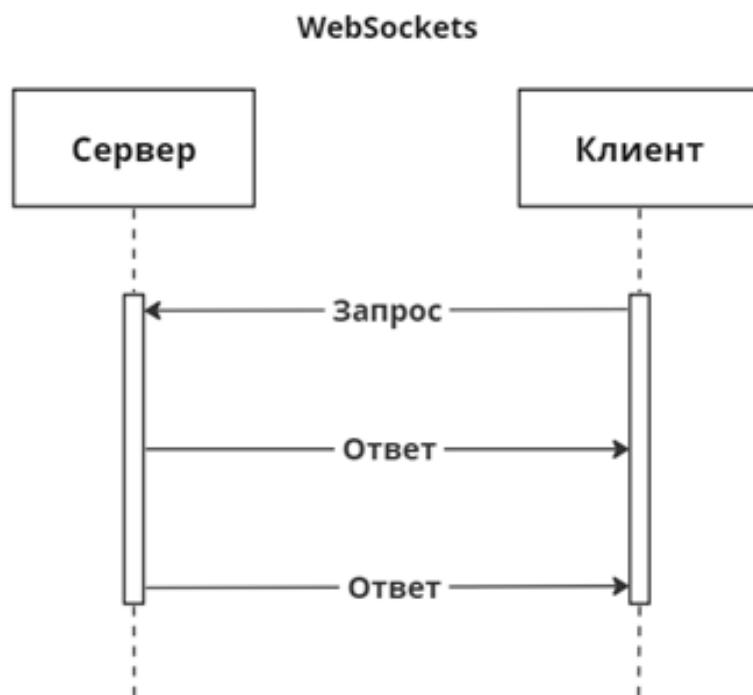


Рисунок 1. Схема WebSockets соединения

Figure 1. WebSockets connection scheme

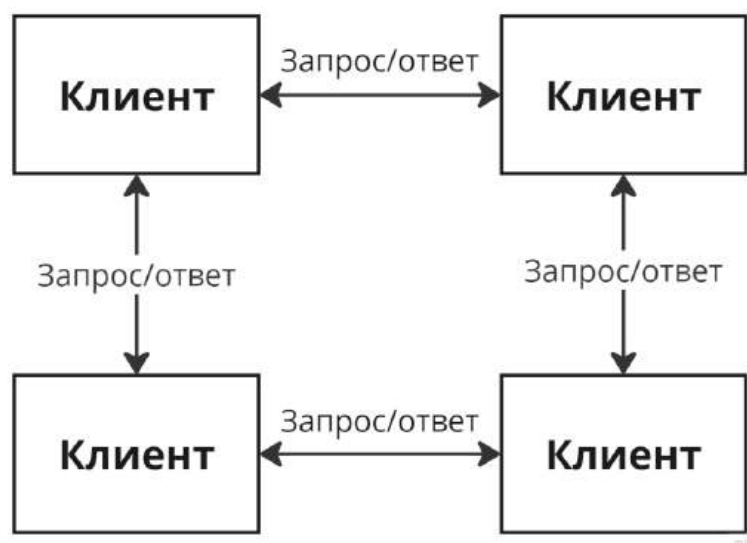


Рисунок 2. Схема p2p соединения

Figure 2. The p2p connection scheme

Выбор алгоритмов искусственного интеллекта для интеграции в платформу

Чтобы выбрать алгоритмы искусственного интеллекта для интеграции в платформу автоматизации собеседований, необходимо рассмотреть методы, позволяющие генерировать тестовые задания, распознавать лица и анализировать эмоциональный фон кандидата.

Генерация тестовых заданий подразумевает использование генеративных моделей. Лучшим выбором для реализации этой функциональности являются рекуррентные нейронные сети (RNN) и трансформаторы.

Методы компьютерного зрения и глубокого обучения, а именно сверточные нейронные сети (CNN), способные классифицировать объекты, лучше всего подходят для реализации распознавания человеческих лиц и эмоций на основе невербальных знаков [6].

Рекуррентные нейронные сети используются для работы с текстовыми данными. Анализируя, находя корреляции и запоминая их, они могут генерировать данные на основе тех, по которым проводилось обучение, различая контекст. Примером рекуррентной нейронной сети, используемой для создания генеративных моделей, является сеть Элмана. Эта нейронная сеть имеет контекстуальный слой, в который копируется состояние внутреннего слоя нейронов на каждой итерации сети, что позволяет легко воспроизводить временные ряды и последовательности, такие как порядок слов в предложении, и даже классифицировать их [7].

Уравнение Элмана:

$$h_t = \sigma_h(W_h x_t + U_h h_{t-1} + b_h),$$

$$y_t = \sigma_y(W_y h_t + b_y),$$

где x_t — вектор входного слоя;

h_t — вектор скрытого слоя;

y_t — вектор выходного слоя;

W , U , b — матрица и вектор параметров;

σ_h , σ_y — функция активации.

В отличие от RNN трансформеры создают модели долгосрочных зависимостей во входных текстовых данных. Это позволяет им генерировать, запоминать намного больше данных, что улучшает выдаваемый ими результат.

Уравнение трансформеров:

$$Q = W_Q X, K = W_K X, V = W_V Y,$$

где W_Q — вес запросов;

W_K — вес ключей;

W_V — вес значений.

Для распознавания лиц применяют сверточные нейронные сети [8]. Главная их особенность — это распознавание образов на изображениях. Обучение сверточных нейронных сетей проводится путем подачи на вход изображений с объектом, который надо распознать. Нейросеть учится выделять объект на фоне его окружения, манипулируя настройками изображения до этапа полного вырезания объекта, классифицируя его. Обучившись на фотографиях людей, они способны эффективно выделять человеческие лица на изображениях и видео.

Анализ эмоционального фона кандидата осуществляется методом, описанным выше. Сверточная нейронная сеть, обученная на лицах людей, проходит процесс повторного обучения на лицах людей, выражающих различные эмоции. Обучение модели заканчивается на этапе, когда алгоритм безошибочно проводит кластеризацию эмоций по обучающей и тестовой выборкам [9]. Далее используя полученные модели, строится уникальный алгоритм для определения уровня уверенности кандидата по невербальным признакам.

Для интеграции выбранных методов искусственного интеллекта в веб-платформу была выбрана библиотека TensorFlow.js [10]. Данная библиотека

является посредником между написанным алгоритмом машинного обучения и браузером, позволяя запускать, тестировать и использовать модели в веб-приложениях.

Функциональные и нефункциональные требования к платформе

Платформа должна поддерживать создание и публикацию вакансий в нефтегазовой отрасли с учетом специфики квалификации кандидатов. Необходима регистрация пользователей как кандидатов и менеджеров по подбору персонала. Функционал управления вакансиями должен быть интуитивно понятным, включая создание, публикацию и настройку вакансий. Соискатели должны иметь возможность просматривать и фильтровать вакансии по категориям, таким как зарплата и требования к навыкам. Также требуется возможность кастомизации профиля и проведения онлайн-собеседований с анализом выражений лица. Для тестирования кандидатов необходимо реализовать функцию составления тестовых заданий как вручную, так и с помощью ИИ. Алгоритмы ИИ должны обеспечивать объективную оценку кандидатов и анализировать их поведение на интервью. Платформа должна быть масштабируемой, производительной и отказоустойчивой, способной обрабатывать большие объемы данных, включая резюме и результаты тестов, с соблюдением требований безопасности для хранения конфиденциальной информации.

Описание платформы

Для визуализации пользовательских сценариев и маршрутов для навигации была построена схема экранов веб-платформы, начиная с момента регистрации и авторизации пользователя (рисунок 3).

На рисунке 3 представлены экраны веб-приложения и логика маршрутизации. Зеленым цветом выделены экраны, доступные только рекрутерам, которые позволяют управлять вакансиями, оформлять имидж компании, готовить тестовые задания и проводить интервью. Структура навигации и интерфейса была разработана на основе анализа потребностей пользователей [11].

Рассмотрим принцип реализации основных страниц сайта. Первым экраном, встречающим пользователя на сайте, является экран авторизации. После ввода почты на почтовый ящик пользователя приходит письмо с ссылкой для аутентификации на сайте. Реализация отправки писем была осуществлена с помощью библиотеки `nodemailer`. После авторизации, если пользователь не регистрировался на сайте, он попадает на экран выбора роли. Данный экран предназначен для определения роли пользователя на платформе. В зависимости от роли пользователю доступны различные функции сайта, такие как создание, редактирование и удаление вакансий, возможность проведение собеседований и доступ к функциям на основе искусственного интеллекта. Процесс регистрации был создан с помощью технологии JWT (открытый стандарт для создания токенов доступа) [12] (рисунок 4).

Платформа предусматривает 3 типа профиля: для рекрутеров, соискателей и компаний. Функционал для серверной части профиля реализован исходя из основных потребностей пользователя к этой странице — получение информации о пользователе, его основных данных и действиях на сайте [13]. Также были реализованы запросы для изменения профиля, использующиеся на странице редактирования.

Рассмотрим пример реализации страницы поиска вакансий. На странице при-

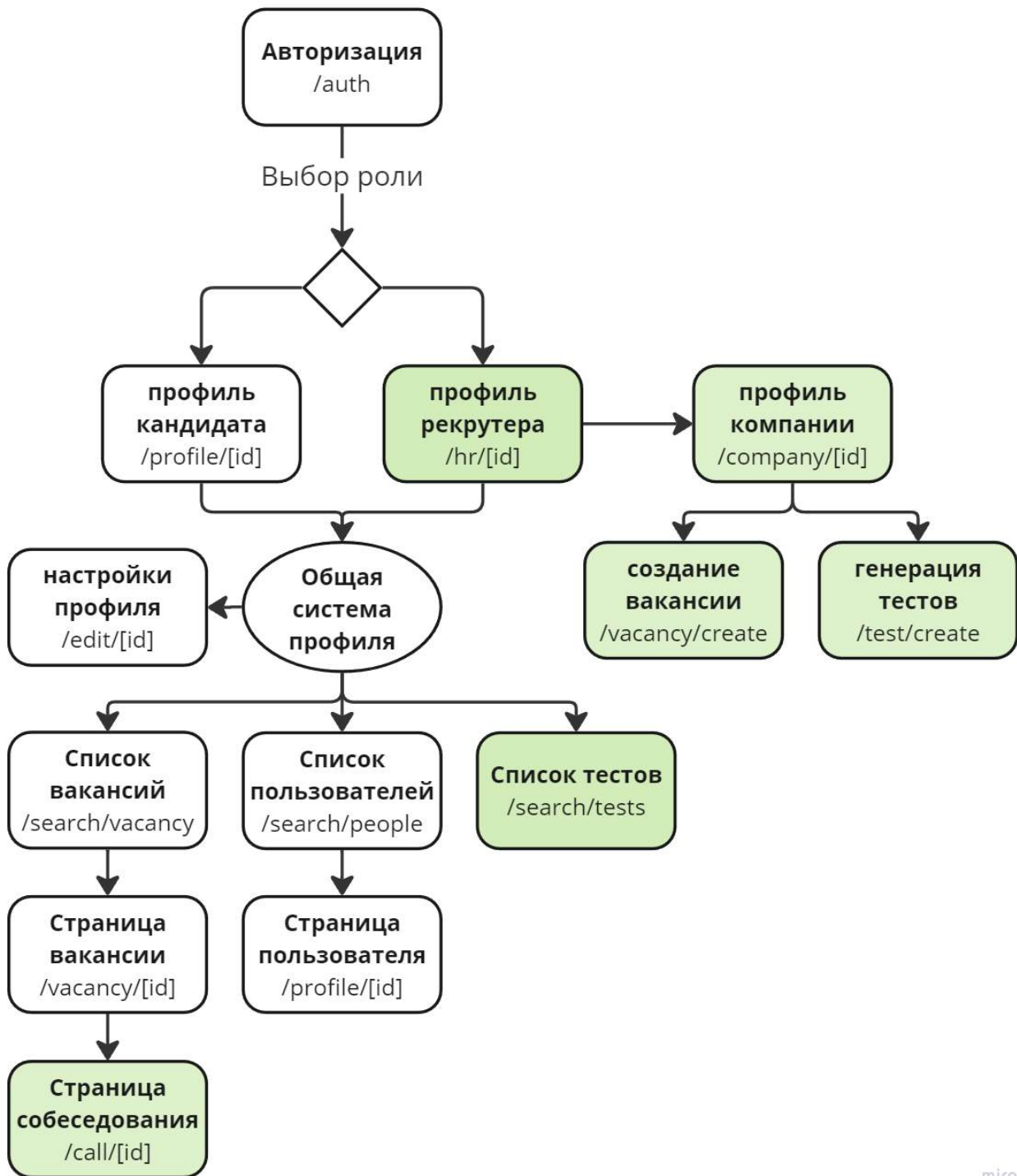


Рисунок 3. Схема экранов

Figure 3. Screen layout

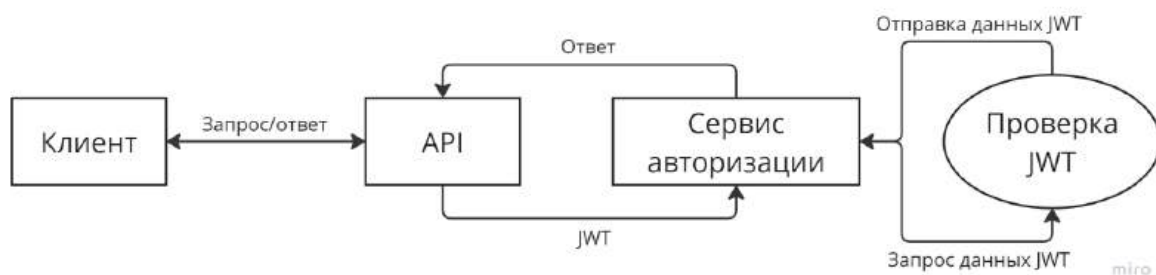


Рисунок 4. Схема работы JWT

Figure 4. JWT scheme

существуют три основных компонента: строка поиска, список вакансий и фильтры, по которым осуществляется более точный отбор. Пользователь может провести фильтрацию по нужным его критериям, данные, полученные от строки поиска и фильтров передаются в серверные функции, и далее проходит получение искомым вакансий из базы данных [14].

Создана клиент-серверная логика страниц просмотра и создания вакансий. Соискатели не имеют доступа к странице вакансии. На странице создания вакансии представлены основные поля для описания требований, условий работы и диапазона заработной платы. HR-специалист может прикреплять сгенерированные тестовые задания к вакансии для тестирования кандидатов, что выделяет платформу среди конкурентов.

Для реализации видеоконференций использовались технологии WebSockets и peer-to-peer [15]. WebSockets обеспечивают высокую производительность и низкую задержку при передаче видео и аудиоданных, а peer-to-peer соединение снижает нагрузку на сервер и улучшает качество передачи. Модуль peer-to-peer, реализованный с помощью WebRTC, обеспечивает прямое соединение между пользователями. Взаимодействие компонентов платформы осуществляется через сигнальный сервер, который управляет потоком данных и устанавливает соединения, отправляя запросы на сервер.

В результате применения данных технологий был реализован функционал видеозвонков, который дает возмож-

ность пользователям проводить собеседования для отбора кандидатов на должность в реальном времени, обеспечивая высокое качество связи и минимальную задержку.

Выводы

Проведен анализ проблемы автоматизации процесса подбора персонала в нефтегазовой отрасли с помощью искусственного интеллекта, разработана веб-платформа, которая позволяет автоматизировать процесс подбора кадров, используя технологии искусственного интеллекта, такие как генерация тестовых заданий, распознавание лица и анализ эмоционального фона кандидата.

Платформа разработана с использованием современных технологий, таких как Next.js, Prisma, WebSockets и peer-to-peer, что обеспечивает высокую производительность и масштабируемость. Реализованы функциональные и нефункциональные требования к платформе, включая создание и публикацию вакансий, регистрацию пользователей, управление вакансиями, проведение онлайн-собеседований и анализ выражений лица.

В результате применения данных технологий реализована платформа, которая позволяет автоматизировать процесс подбора кадров, обеспечивая высокую эффективность и точность оценки кандидатов. Платформа может быть использована в нефтегазовой отрасли и других секторах экономики, где требуется автоматизация процесса подбора персонала.

Список источников

1. Барнякова А.В. Роль отбора персонала в управлении персоналом организации // Science Time. 2014. № 4. С. 20-23. EDN SDGUGV.
2. Изотова А.Г., Комолова. Т.О., Блинова А.С. Методы цифровой трансформации и внедрения искусственного интеллекта на произ-

водства // Аллея науки. 2020. Т. 1, № 4(43). С. 188-192. EDN OSHMTG.

3. Rabcan J., Gumarova A., Vakhitova A., Kamalova G. Modern Frameworks for Web-Application Development // Science and Education. 2023. No. 3-3 (72). P. 33-40. DOI 10.52578/2305-9397-2023-3-2-33-40. EDN KGKWAD.

4. Кореньков В.В., Иванцова О.В., Филозова И.А. Технологии баз данных. Проектирование реляционных баз данных. М.: Курс, 2022. 128 с. ISBN 978-5-907352-79-7. EDN ENREZZ.

5. Добровольский В.С. Разнообразие веб-приложений, применение и интеграция для создания высококачественных веб-сервисов // Научный аспект. 2024. Т. 43, № 6. С. 5449-5462. EDN TIYXRV.

6. Жаворонков А.В., Забайкин Ю.В. Совершенствование алгоритма управления предприятием посредством использования алгоритмов искусственного интеллекта // Экономика строительства. 2024. № 3. С. 170-175. EDN SELFWC.

7. Селиванов С.Г., Поезжалова С.Н., Бородкина О.А. и др. Нейронные сети в АСТПП машиностроительного производства // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 4. С. 59-71. EDN PZFTYL.

8. Khusnutdinov L.R. Analysis of a Hybrid Quantum-Classical Convolutional Neural Network // Научный аспект. 2023. Vol. 19, No. 5. P. 2446-2454. EDN FYJYNA.

9. Хеин М.З. Анализ речевого сигнала для алгоритма вокализованной и невокализованной классификации // Евразийский союз ученых. 2017. № 12-1 (45). С. 43-45. EDN VSOPVB.

10. Семенюк В.В., Складчиков М.В. Разработка алгоритма распознавания эмоций человека с использованием сверточной нейронной сети средствами Python // Инженерный вестник Дона. 2023. № 12(108). С. 231-245. EDN TBESZT.

11. Омар А. Методы создания качественного дизайна пользовательского интерфейса // Вестник науки. 2019. Т. 4, № 10(19). С. 81-89. EDN UJSUTS.

12. Мичурин А. Базовая HTTP-авторизация — защита от честных людей // Системный администратор. 2005. № 5(30). С. 88-92. EDN REINBL.

13. Мичурин А. Обработка переадресованных http-запросов // Системный администратор. 2004. № 12(25). С. 62-67. EDN REIKPP.

14. Приходько С.В. Теоретические основы и общие принципы построения современных баз данных и систем управления базами данных // Матрица научного познания. 2023. № 4-1. С. 128-131. EDN TXXMMU.

15. Жильцов А.В. Систематизация понятий из области потокового распространения мультимедиа через интернет // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 12. С. 493-504. EDN YKPKZM.

References

1. Barnyakova A.V. Rol' otbora personala v upravlenii personalom organizatsii [The Role of Personnel Selection in Organizational HR Management]. *Science Time — Science Time*, 2014, No. 4, pp. 20-23. EDN SDGUGV. [in Russian].

2. Izotova A.G., Komolova T.O., Bliznova A.S. Metody tsifrovoy transformatsii i vnedreniya iskusstvennogo intellekta na proizvodstva [Methods of Digital Transformation and Implementation of Artificial Intelligence in Production]. *Alleya nauki — Alley of Science*, 2020, Vol. 1, No. 4(43), pp. 188-192. EDN OSHMTG. [in Russian].

3. Rabcan J., Gumarova A., Vakhitova A., Kamalova G. Modern Frameworks for Web-Application Development. *Science and Education*, 2023, No. 3-3 (72), pp. 33-40. DOI 10.52578/2305-9397-2023-3-2-33-40. EDN KGKWAD.

4. Koren'kov V.V., Ivantsova O.V., Filozova I.A. *Tekhnologii baz dannykh. Proektirovanie relyatsionnykh baz dannykh* [Database Technologies. Designing Relational Databases]. Moscow, Kurs Publ., 2022. 128 p. ISBN 978-5-907352-79-7. EDN ENREZZ. [in Russian].

5. Dobrovol'skii V.S. Raznoobrazie veb-prilozhenii, primeneniye i integratsiya dlya sozdaniya vysokokachestvennykh veb-servisov [Diversity of Web Applications, Application and Integration for Creating High-Quality Web Services]. *Nauchnyi aspekt — Scientific Aspect*, 2024, Vol. 43, No. 6, pp. 5449-5462. EDN TIYXRV. [in Russian].

6. Zhavoronkov A.V., Zabaikin Yu.V. Sovershenstvovanie algoritma upravleniya predpriyatiem posredstvom ispol'zovaniya algoritmov iskusstvennogo intellekta [Improving the Enterprise Management Algorithm through the Use of Artificial Intelligence Algorithms]. *Ekonomika stroitel'stva — Construction Economics*, 2024, No. 3, pp. 170-175. EDN SELFWC. [in Russian].

7. Selivanov S.G., Poezzhalova S.N., Borkina O.A. i dr. Neironnye seti v ASTPP mashinostroitel'nogo proizvodstva [Neural Networks in the Automated Control System of Mechanical Engineering Production]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy — Information Technologies and Computing Systems*, 2012, No. 4, pp. 59-71. EDN PZFTYL. [in Russian].

8. Khusnutdinov L.R. Analysis of a Hybrid Quantum-Classical Convolutional Neural Network. *Nauchnyi aspekt — Scientific aspect*, 2023, Vol. 19, No. 5, pp. 2446-2454. EDN FYJYNA.

9. Khein M.Z. Analiz rechevogo signala dlya algoritma vokalizovannoi i nevokalizovannoi klassifikatsii [Speech Signal Analysis for the Voiced and Unvoiced Classification Algorithm]. *Evraziiskii*

soyuz uchenykh — Eurasian Union of Scientists, 2017, No. 12-1 (45), pp. 43-45. EDN VSOPVB. [in Russian].

10. Semenyuk V.V., Skladchikov M.V. Razrabotka algoritma raspoznavaniya emotsii cheloveka s ispol'zovaniem svertochnoi neironnoi seti sredstvami Python [Development of an Algorithm for Recognizing Human Emotions Using a Convolutional Neural Network Using Python]. *Inzhenernyi vestnik Dona — Engineering Bulletin of the Don*, 2023, No. 12(108), pp. 231-245. EDN TBESZT. [in Russian].

11. Omar A. Metody sozdaniya kachestvennogo dizaina pol'zovatel'skogo interfeisa [Methods for Creating High-Quality User Interface Design]. *Vestnik nauki — Bulletin of Science*, 2019, Vol. 4, No. 10 (19), pp. 81-89. EDN UJSUTS. [in Russian].

12. Michurin A. Bazovaya HTTP-avtorizatsiya — zashchita ot chestnykh lyudei [Basic HTTP Authorization — Protection from Honest People]. *Sistemnyi administrator — System Administrator*, 2005, No. 5(30), pp. 88-92. EDN REINBL. [in Russian].

13. Michurin A. Obrabotka pereadresovannykh http-zaprosov [Processing Redirected http Requests]. *Sistemnyi administrator — System Administrator*, 2004, No. 12(25), pp. 62-67. EDN REIKPP. [in Russian].

14. Prikhod'ko S.V. Teoreticheskie osnovy i obshchie printsipy postroeniya sovremennykh baz dannykh i sistem upravleniya bazami dannykh [Theoretical Foundations and General Principles of Constructing Modern Databases and Database Management Systems]. *Matritsa nauchnogo poznaniya — Matrix of Scientific Knowledge*, 2023, No. 4-1, pp. 128-131. EDN TXXMMU. [in Russian].

15. Zhil'tsov A.V. Sistematizatsiya ponyatii iz oblasti potokovogo rasprostraneniya mul'timedia cherez internet [Systematization of Concepts from the Field of Streaming Multimedia Distribution via the Internet]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie — Innovations. Science. Education*, 2020, No. 12, pp. 493-504. EDN YKPKZM. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.12.2024; одобрена после рецензирования 18.12.2024; принята к публикации 25.12.2024.

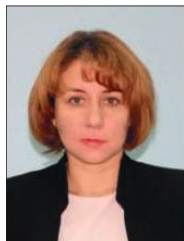
The article was submitted 11.12.2024; approved after reviewing 18.12.2024; accepted for publication 25.12.2024.

Научная статья

УДК 004.41

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-1-141-148

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ РЕЗЮМЕ СОИСКАТЕЛЕЙ

**Татьяна Михайловна Левина****Tatiana M. Levina**

кандидат технических наук, доцент 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

**Полина Станиславовна Кобзева****Polina S. Kobzeva**

студент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Мария Витальевна Трошина****Maria V. Troshina**

студент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Алмас Варисович Гафаров****Almas V. Gafarov**

студент кафедры информационных технологий,
Институт нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Актуальность

В условиях современного рынка труда наблюдается постоянный рост числа соискателей на вакансии. Вместе с тем, компании сталкиваются с огромным потоком резюме. Ручная обработка такого объема

Ключевые слова

программный модуль,
архитектура, обработка
резюме, соискатель,

информации становится нелегкой задачей из-за ограниченности времени и ресурсов.

Увеличение конкуренции на рынке труда заставляет предприятия акцентировать внимание на эффективном подборе персонала, что включает в себя не только подбор подходящих кандидатов, но и быструю и качественную обработку их резюме. Часто обработка резюме происходит вручную, что требует существенных временных затрат. Такой подход может привести к снижению качества и увеличению времени обработки резюме. Поэтому появляется необходимость в разработке программного модуля, который будет обрабатывать резюме, проверять заполнение полей, выдавать отчет об обработке и по итогам создавать «карточку кандидата».

Цель исследования

В статье ставится цель – сокращение сроков обработки резюме и минимизирование ошибок, которые могут возникать при ручной работе. Анализируется актуальность проблемы разработки программного модуля обработки резюме соискателей.

Методы исследования

Были использованы следующие методы: обзор научной литературы, анализ использования существующих методов обработки резюме.

Результаты

Обоснована необходимость использования программного модуля обработки резюме соискателей. Проведено описание ключевых аспектов актуальности разработки, включая основные проблемы, связанные с ручной обработкой резюме, и преимущества их автоматизации. Используя методологию IDEF0, проведен анализ бизнес-процесса «Получение и анализ резюме», выделены его недостатки, которые необходимо автоматизировать. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования и внедрения программных решений в области управления персоналом, а также для дальнейшего изучения и разработки подходов к автоматизации кадровых процессов.

конфигурация,
корпоративный
почтовый ящик

Для цитирования: Левина Т. М., Альмухаметова Э. И., Кобзева П. С., Трошина М. В., Гафаров А. В. Программный модуль обработки резюме соискателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 1. Т. 21. С. 141-148. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-141-148>.

Original article

SOFTWARE MODULE FOR PROCESSING JOB APPLICANTS' RESUMES

Relevance

In the conditions of the modern labor market, there is a constant increase in the number of job seekers. At the same time, companies are faced with a huge flow of resumes. Manual processing of such a volume of information becomes a difficult task due to limited time and resources.

Increasing competition in the labor market forces enterprises to focus on effective recruitment, which includes not only the selection of suitable candidates, but also the fast and high-quality processing of their resumes. Resume processing is often done manually, which requires significant time. This approach can lead to a decrease in quality and an increase in resume processing time.

Therefore, there is a need to develop a software module that will process a resume, check the completeness of fields, issue a processing report and create a «candidate card» based on the results.

Keywords

software module,
architecture, resume
processing, applicant,
configuration, corporate
mailbox

Aim of research

The article aims to reduce the processing time of a resume and minimize errors that may occur during manual work. The relevance of the problem of developing a software module for processing applicants' resumes is analyzed.

Research methods

The following methods were used: a review of the scientific literature, an analysis of the use of existing resume processing methods.

Results

The necessity of using a software module for processing job applicants' resumes is substantiated. Key aspects of the development's relevance are described, including major issues associated with manual resume processing and the benefits of automation. Using the IDEF0 methodology, an analysis of the business process «Receiving and Analyzing Resumes» was conducted, highlighting the shortcomings that need to be automated. The obtained results can be utilized for designing and implementing software solutions in personnel management, as well as for further exploration and development of approaches to HR process automation.

For citation: Levina T. M., Almukhametova E. I., Kobzeva P. S., Troshina M. V., Gafarov A. V. Programmnyi modul' obrabotki rezyume soiskatelei [Software Module for Processing Job Applicants' Resumes]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 1, Vol. 21, pp. 141-148 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-1-141-148>.

Многие организации имеют корпоративные сайты, на которых размещается необходимая информация, например, актуальные новости о деятельности компании; описание товаров и услуг; документация, с которой может ознакомиться любой желающий; контактная информация, а также объявления об открытии набора на предлагаемые вакансии [1].

Заинтересованный в работе человек может подать резюме в организацию, используя ее корпоративный сайт. В свою очередь, такая подача резюме позволяет компаниям лучше организовывать и структурировать информацию о потенциальных кандидатах, сохраняя ее в удобном и доступном формате для последующего анализа [1].

Часто обработка резюме происходит вручную, что требует существенных временных затрат. Такой подход может привести к снижению качества и увеличению времени обработки резюме, поэтому появляется необходимость в разра-

ботке программного модуля, который будет обрабатывать резюме, проверять заполнение полей, выдавать отчет об обработке и по итогам создавать «карточку кандидата». Благодаря этому можно избежать ошибок, которые могут возникать при ручной работе [2].

Модуль был разработан на платформе 1С. Данная платформа является оптимальным выбором для разработки благодаря её широкому распространению в области управления персоналом и возможности интеграции с существующими системами предприятий. Кроме того, 1С предоставляет инструменты для автоматизации обработки данных, проверки заполнения полей и формирования. Реализация модуля в 1С также позволяет адаптировать решение под требования конкретного предприятия и обеспечить соблюдение локальных нормативных требований. Это делает платформу 1С наиболее подходящей для решения задач автоматизации обработки резюме [3].

На рисунке 1 изображена архитектура, описывающая процесс работы программного модуля.

Соискатель отправляет резюме с помощью корпоративного сайта предприятия. С корпоративного сайта резюме приходит на корпоративную почту, откуда загружается в модуль обработки резюме соискателей, который расположен в системе 1С: Зарплата и управление персоналом [4].

После загрузки резюме в модуль происходит его обработка, по результату обработки резюме создается карточка кандидата и формируется отчет.

Структура метаданных разрабатываемого программного модуля представлена на рисунке 2. Дерево метаданных состоит из шести справочников (кандидаты, статусы анкет, должности, гражданство, военная служба, образование) и одного отчета (обработка резюме) [5].

На рисунке 3 представлено содержимое подсистемы «Обработка резюме», которая состоит из иерархического справочника «Кандидаты» и пяти справочников нормативно-справочной информации (НСИ): «Военная служба», «Гражданство», «Должности», «Образование», «Статусы резюме».

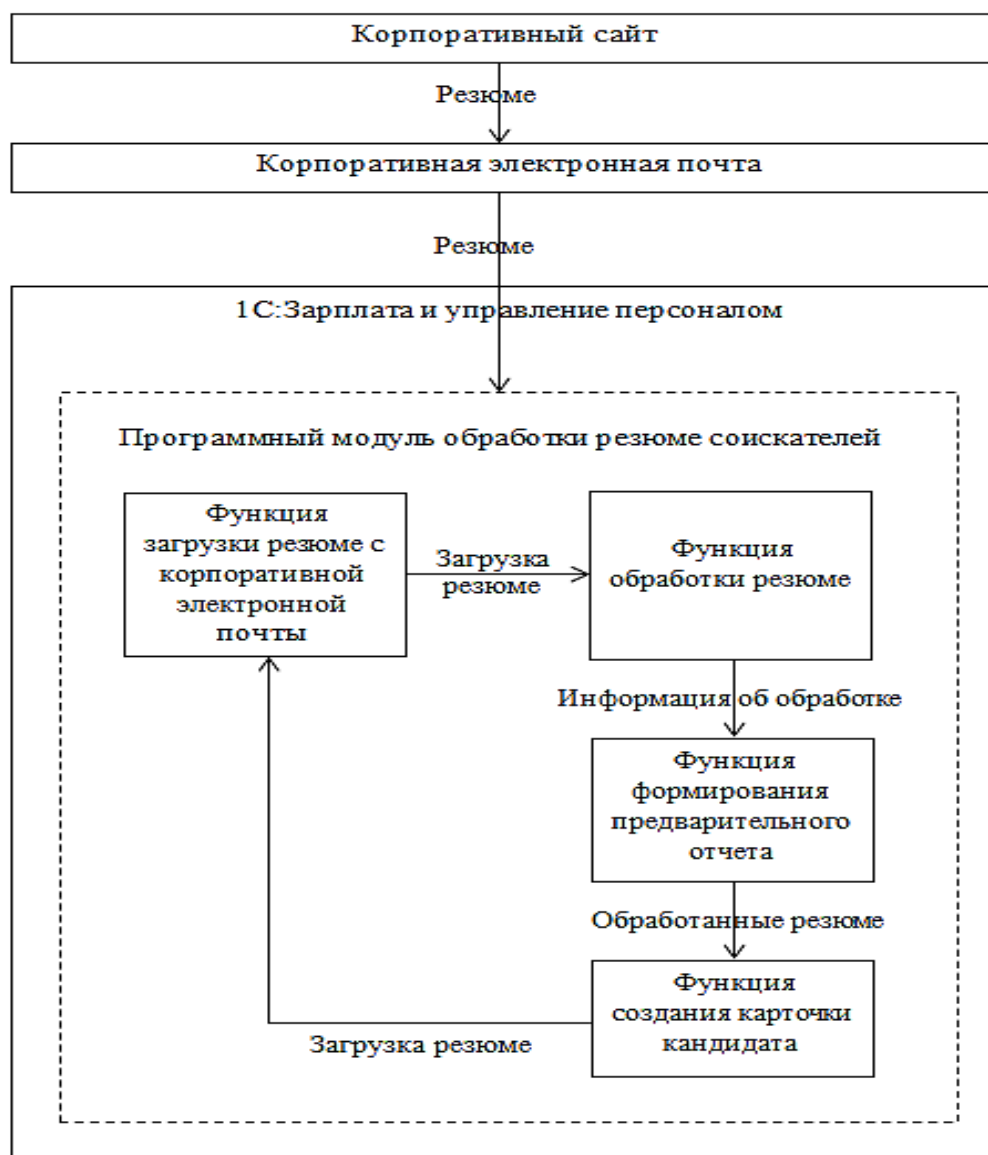


Рисунок 1. Архитектура технического решения

Figure 1. Architecture of the technical solution

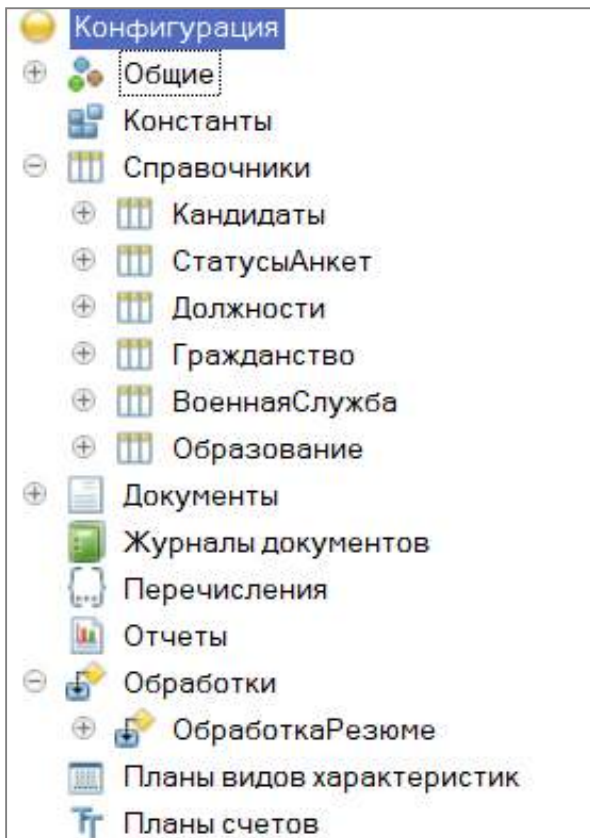


Рисунок 2. Структура дерева программного модуля

Figure 2. Structure of the module tree software

Для начала загрузки резюме с почты и их обработки необходимо нажать на вкладку «Обработка резюме» в разделе «Сервис». Чтобы началась загрузка, необходимо нажать на кнопку «Загрузить», после чего начнется подключение к электронной почте. Если подключение успешно, файлы загрузятся во временную папку, а затем начнется их обработка. Временная папка нужна для временного хранения загруженных с почты резюме.

На рисунке 4 представлен фрагмент кода, с помощью которого происходит подключение к почте, считывание и загрузка необходимых файлов из полученных писем.

Программа проверяет заполнение темы письма, а также присутствие вложенного файла формата xls. Если все верно, начинает загрузку. После чего появляется сообщение об успешной обработке. Также присутствует возможность проверки на одинаковые файлы, повторно один и тот же файл не загружается и не обрабатывается, но если при-



Рисунок 3. Интерфейсное окно программы

Figure 3. The program interface window

```

    &НаКлиенте
1 Процедура ОбменФайлами_Принять (Команда)

    Сообщения.Очистить();
    УчетнаяЗапись = Новый ИнтернетПочтовыйПрофиль;
    УчетнаяЗапись.Пользователь = "pkspks00@mail.ru";
    УчетнаяЗапись.Пароль = "wFNeE8BA8tpKk15XU0FR";

    УчетнаяЗапись.АдресСервераPOP3 = "pop.mail.ru";
    УчетнаяЗапись.АдресСервераSMTP = "smtp.mail.ru";

    УчетнаяЗапись.ИспользоватьSSLPOP3 = Истина;
    УчетнаяЗапись.ПортPOP3 = 995;

    УчетнаяЗапись.ИспользоватьSSLSMTP = Истина;
    УчетнаяЗапись.ПортSMTP = 465;

    УчетнаяЗапись.АутентификацияSMTP = СпособSMTPАутентификации.ПоУмолчанию;
    УчетнаяЗапись.ПользовательSMTP = УчетнаяЗапись.Пользователь;
    УчетнаяЗапись.ПарольSMTP = УчетнаяЗапись.Пароль;

    ИнтернетПочта = Новый ИнтернетПочта;

    Попытка
        ИнтернетПочта.Подключиться(УчетнаяЗапись);
    Исключение
        Возврат;
    КонечПопытки;

    ЗаголовкиВсехПисем = ИнтернетПочта.ПолучитьЗаголовки(); // массив

    НужныеПисьма = Новый Массив;
    Для каждого ТекущийЗаголовок Из ЗаголовкиВсехПисем Цикл
        Если Не ЗначениеЗаполнено(ТекущийЗаголовок.Тема) Тогда // Проверяем, что тема письма не заполнена
            НужныеПисьма.Добавить(ТекущийЗаголовок);
        КонечЕсли;
    КонечЦикла;

    Если НужныеПисьма.Количество() = 0 Тогда
        ПоказатьПредупреждение("Почтовый ящик пуст");
    Иначе
        // Обработка каждого письма с файлами:
        Для Индекс = 0 По НужныеПисьма.Количество() - 1 Цикл
            Письмо = ИнтернетПочта.Выбрать(Ложь, НужныеПисьма).Получить(Индекс);

            // Сохраняем файлы из письма:
            Для каждого Вложение Из Письмо.Вложения Цикл
                Если Прав(Вложение.ИмяФайла, 4) = ".xls" Тогда
                    УникальноеИмяФайла = СтрЗаменить(Вложение.ИмяФайла, "\", " ");
                    Вложение.Данные.Записать(ТекущийКаталог + "\" + УникальноеИмяФайла);
                    Сообщения.ДобавитьСтроку("Файл "" + УникальноеИмяФайла + "" успешно обработан!");
                КонечЕсли;
            КонечЦикла;
        КонечЦикла;
    КонечЕсли;

    ИнтернетПочта.Отключиться();

```

Рисунок 4. Подключение к электронной почте, считывание и загрузка необходимых файлов из полученных писем

Figure 4. Connecting to email, reading and downloading necessary files from received emails

существуют изменения в резюме, то они обновляются.

Для просмотра загруженных резюме необходимо перейти в справочник «Кандидаты». На рисунке 5 представлен результат загрузки резюме в справочник «Кандидаты».

Для просмотра карточки кандидата необходимо дважды щелкнуть по нужной строке (рисунок 6). Информация представлена только для просмотра.

Основные ожидаемые результаты от внедрения описанного программного модуля следующие:

- сокращение временных затрат на обработку резюме за счёт автоматизации ручных операций;

- повышение точности обработки данных и снижение вероятности ошибок, связанных с человеческим фактором;

- упрощение формирования отчетов и «карточек кандидатов», что обеспечивает более структурированный и доступный формат данных.

При дальнейшей разработке и редактировании программы будут применены такие подходы, как тестирование функциональности на этапе разработки, регулярное обновление в соответствии с отзывами пользователей и адаптация под новые требования, что позволит повысить надежность программного модуля.

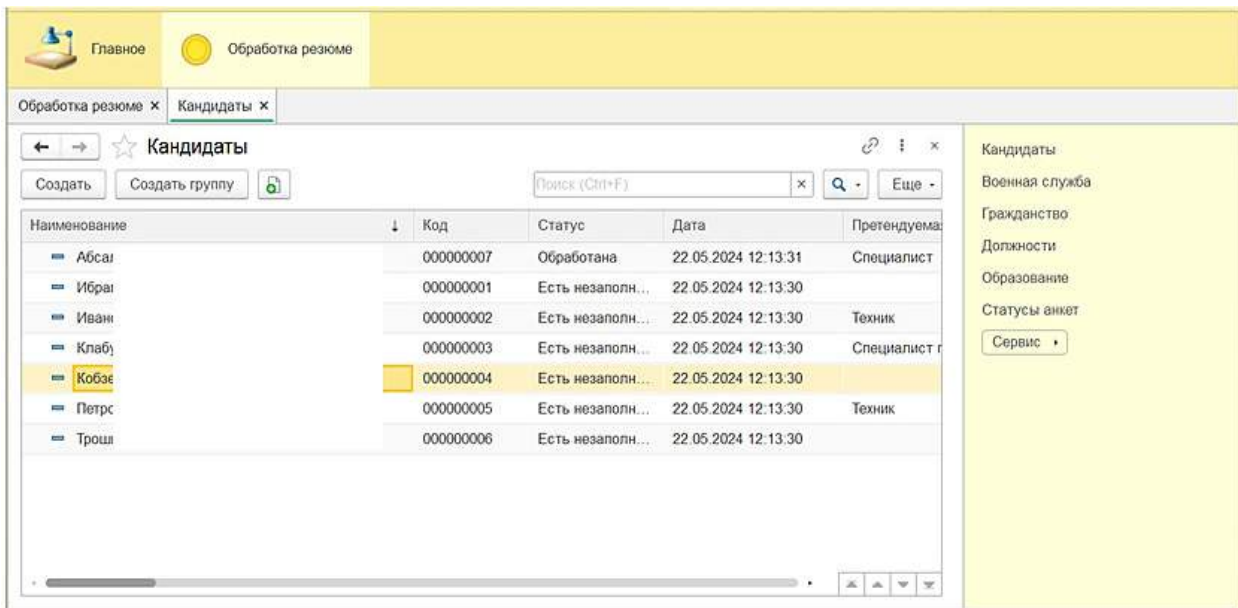


Рисунок 5. Окно программы со списком кандидатов

Figure 5. Program window with a list of candidates

★ Иванов Иван Иванович (Анкета кандидата)

Статус анкеты: Есть незаполненные поля Дата: 22.05.2024 12:13:30

Должность: Техник Оклад: 0,00

Личные данные

ФИО: Иванов Иван Иванович

Телефон: 89191535510 E-mail: IIIIII@yandex.ru Дата рождения: 26.03.2003

Гражданство: Гражданин РФ

Военная служба: подлежу призыву, но еще не служил

Образование | Профессиональный опыт | Дополнительные знания/навыки | Страница дополнительно | Согласие на обработку персональных данных

Основное общее образование: Лицей 1 Медаль средней школы: ☒

Высшее образование: бакалавриат

N	Учебное заведение	Форма обучения	Специальность / ср. балл	Практика
1	ИНН УГНТУ в г.Салавате 2020-2024	Очное	Автоматизированное управление ...	Газпром УИТиС, кафедра ИнТех УГНТУ, Нили ПЕТОИ

Дополнительное образование

N	Учебное заведение	Годы учебы	Специальность
1	ИНН УГНТУ в г.Салавате	22.05.2023-30.06....	Оператор наземных средств управления беспилотны...
2	ФГБОУ ВО "Уфимский государственный нефтяной тех...	с 01 сентября 20...	Дополнительная образовательная программа "Smart li...

Рисунок 6. Карточка кандидата

Figure 6. Candidate's card

Выводы

Обоснована целесообразность разработки программного модуля для автоматизации обработки резюме соискателей. Основное внимание уделено актуальным требованиям цифровизации и необходимости оптимизации кадрового процесса. Модуль, разработанный на базе платформы 1С, устранит недостатки суще-

ствующих подходов к обработке резюме, такие как значительные временные затраты и вероятность ошибок, связанных с ручной обработкой данных. Его внедрение обеспечит сокращение времени обработки, повышение точности данных и улучшение качества подбора персонала.

Список источников

1. Кобзева П.С., Нигаматуллин Р.Р. Автоматизация обработки резюме соискателей // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля. 2024. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024.

2. Нестерова К.А. Автоматизация подбора и управления персоналом // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития [Электронный ресурс]. 2022. № 3. С. 350-355. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44745887_38476235.pdf. EDN: RSEHLJ.

3. Бакунова О.М., Анохин Е.В. Применение электронного документооборота в программе 1С // Международный журнал инновационных технологий в экономике [Электронный ресурс]. 2022. № 4 (16). С. 64-66. URL: <https://core.ac.uk/download/326574262.pdf>.

4. Вострых А.В. Архитектура информационной системы решения задач оценки эффективности специализированных программных продуктов // Вестник Воронежского института ФСИН России [Электронный ресурс]. 2023. № 1. С. 34-41. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_52259675_55288064.pdf.

5. Масалова Ю.А. Инновационный менеджмент в управлении персоналом: учеб. пособие для вузов. М.: Юрайт, 2021. 191 с. ISBN 978-5-534-13908-2.

References

1. Kobzeva P.S., Nigmatullin R.R. Avtomatizatsiya obrabotki rezyume soiskatelei [Automation of Processing Applicants' Resumes]. *Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya* [Integration of Science and Education in

Oil and Gas Universities]. 2024. Ufa, UNPTs «Izdatel'stvo UGNTU», 2024. [in Russian].

2. Nesterova K.A. Avtomatizatsiya podbora i upravleniya personalom [Automation of Personnel Selection and Management]. *Obshchestvo, obrazovanie, nauka v sovremennykh paradigmatkh razvitiya – Society, Education, Science in Modern Development Paradigms* [Electronic Resource]. 2022, No. 3, pp. 350-355. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44745887_38476235.pdf. EDN: RSEHLJ. [in Russian].

3. Bakunova O.M., Anokhin E.V. Primenenie elektronnoho dokumentooborota v programme 1S [Application of Electronic Document Management in the 1C Program]. *Mezhdunarodnyi zhurnal innovatsionnykh tekhnologii v ekonomike – International Journal of Innovative Technologies in Economics* [Electronic Resource], 2022, No. 4 (16), pp. 64-66. URL: <https://core.ac.uk/download/326574262.pdf>. [in Russian].

4. Vostrykh A.V. Arkhitektura informatsionnoi sistemy resheniya zadach otsenki effektivnosti spetsializirovannykh programmnykh produktov [Architecture of the Information System for Solving Problems of Assessing the Effectiveness of Specialized Software Products]. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii – Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia* [Electronic Resource], 2023, No. 1, pp. 34-41. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_52259675_55288064.pdf. [in Russian].

5. Masalova Yu.A. *Innovatsionnyi menedzhment v upravlenii personalom: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Innovative Management in Personnel Management: Textbook for Universities]. Moscow, Yurait Publ., 2021. 191 p. ISBN 978-5-534-13908-2. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 16.01.2025; одобрена после рецензирования 23.01.2025; принята к публикации 30.01.2025.

The article was submitted 16.01.2025; approved after reviewing 23.01.2025; accepted for publication 30.01.2025.

ОБ АВТОРАХ

Аль-Кадаси Омар Халед Абдулджалил Ахмед (Йеменская Республика, Россия)

старший преподаватель кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Альмухаметова Элина Ильнуровна

ассистент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Баскаков Вячеслав Викторович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

Васильков Никита Дмитриевич

главный специалист проектного комплекса «Электродвижение», ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия

Габидуллина Зульфия Газинуровна

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

Гамисония Гиорги Кахаберович

аспирант кафедры «Уфимская высшая школа экономики и управления», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Гафаров Алмас Варисович

студент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Гвилава Лаша Раулиевич

магистрант кафедры «Техносферная безопасность и управление качеством», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич

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

Денисова Ольга Аркадьевна

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Физика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Загидуллин Булат Ильшатович

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

Зайцева Алина Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

Иванов Максим Дмитриевич

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

Кабиров Данил Мирсаяфович

магистрант кафедры «Информационные технологии и прикладная математика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Калитка Владислав Сергеевич

кандидат химических наук, директор проектного комплекса «Электродвижение», ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия

Кантюков Никита Русланович

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

Кильмаков Дмитрий Константинович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

Кириллов Роман Вячеславович

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

Кобзева Полина Станиславовна

студент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Коловертнов Геннадий Юрьевич

доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Краснов Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Култаев Дим Ринатович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» в г. Кумертау, Кумертау, Россия

Левина Татьяна Михайловна

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Махиянов Артур Валерьевич

аспирант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Попов Евгений Игоревич

аспирант кафедры кибернетических систем, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Саттаров Роберт Радилович

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

Соловьев Богдан Алексеевич

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

Терегулов Тагир Рафаэлевич

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

Трошина Мария Витальевна

студент кафедры информационных технологий, Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Хазиева Регина Тагировна

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

Хузияхметов Билус Альфредович

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

ABOUT THE AUTHORS

Almukhametova Elina I.

Assistant of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Al-Qadasi Omar Kh. (Republic of Yemen, Russia)

Senior Lecturer of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Baskakov Vyacheslav V.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

Denisova Olga A.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of Physics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Gabidullina Zulfiya G.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Technology Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Gafarov Almas V.

Student of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Gamisonia Giorgi K.

Postgraduate Student of Ufa school of excellence, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Gizatullin Farit A.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher of Advanced Engineering School «Motors of the Future», Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Gvilava Lasha R.

Undergraduate Student of Technosphere Safety and Quality Management Department, Samara State Technical University, Samara, Russia

Ivanov Maksim D.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kabirov Danil M.

Undergraduate Student of Information Technology and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kalitka Vladislav S.

Candidate of Chemical Sciences, Director of the Electric Propulsion Project Complex, National Research Center «Zhukovsky Institute», Moscow, Russia

Kantyukov Nikita R.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khazieva Regina T.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khuziakhmetov Bilus A.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kilmakov Dmitriy K.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

Kirillov Roman V.

Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kobzeva Polina S.

Student of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Kolovertnov Gennady Yu.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Krasnov Andrey N.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kultaev Dim R.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

Levina Tatiana M.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry (Branch in Salavat), Ufa State Petroleum Technological University, Salavat, Russia

Makhiyanov Arthur V.

Postgraduate Student of Automation, Telecommunications and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Popov Evgeniy I.

Postgraduate Student of the Cybernetic Systems Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Sattarov Robert R.

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Solovev Bogdan A.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Teregulov Tagir R.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Technology Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Troshina Maria V.

Student of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Vasilkov Nikita D.

Chief Expert of the Electric Propulsion Project Complex, National Research Center «Zhukovsky Institute», Moscow, Russia

Zagidullin Bulat I.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zaitseva Alina A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa University of Science and Technology» in Kumertau, Kumertau, Russia

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc. (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 10 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без

использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.

11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.

12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.

13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».

14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям,
отклоняются для доработки**

Requirements for the materials, provided for publication in the journal

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be 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.