

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3, т. 20, 2024

Electrical and data processing facilities and systems

№ 3, т. 20, 2024

Подписной индекс ПБ092 в каталоге «Почта России».

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

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



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

№ 3, т. 20, 2024

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: 06.11.2024 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19.18.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 133.

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

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

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ
с готовых электронных файлов.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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



Зам. главного редактора:

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



Члены редакционной коллегии:

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

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

No. 3, Vol. 20, 2024

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 06.11.2024. Paper format 60×84/8.
Offset printing. 19.18 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 133.

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., Абдрахманов В. Х., Габидуллина З. Г.

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОЦЕССОВ
ОБРАЗОВАНИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
СВЕЧАХ И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ
ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ 9

Петушков М. Ю., Холодилов С. С.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ СИГНАЛА
ТОКА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ 17

Саттаров Р. Р., Махиянов А. В., Миниахметова С. О.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ
ДВУХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ 28

Макулов И. А., Васильев П. И., Хазиева Р. Т.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА
ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ ПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ 38

Максудов Д. В.

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА В ОЗОНАТОРЕ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ 47

Купцов Д. В., Хазиева Р. Т.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРЯДНЫХ
УСТРОЙСТВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО
ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА 56

Шумихин А. Ю., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ПОДСТАНЦИИ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK 67

Яшин А. Н.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВАТТМЕТРОГРАММЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ
ШТАНГОВОГО ГЛУБИННОГО НАСОСА В ДИНАМОГРАММУ 80

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Кулакова Е. С., Батыркаева А. М.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОПОСРЕДОВАННЫМИ
ВЫБРОСАМИ КАМПУСА 89

Закирничная М. М., Палладина Я. А.

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ПОМОЩЬЮ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО
ПОКАЗАТЕЛЯ АМПЛИТУДЫ НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВЕЙВЛЕТ-КАРТИН 98

Хакимов Э. Р., Сулейманов И. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ МАРШРУТИЗАЦИОННОГО
И КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 107

Андреанов В. С., Кича М. А.

ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ
В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ 117

МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Кузьминская Е. В., Скороспешкин М. В., Осипов В. В.

ПОВЕРКА ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАШИННОГО ЗРЕНИЯ 125

Переверзин П. В., Переверзин А. П., Фетисов В. С., Миловзоров Д. Г.

РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ
ПОГРУЖЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В ПРОЦЕССЕ КАРОТАЖА
НА БУРИЛЬНЫХ ТРУБАХ 135

Хурамин Д. Р., Уликанов Р. Р., Коледин С. Н.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОБЪЕМА ФАЗ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ В ТРУБОПРОВОДЕ СТЕНДА 145

Об авторах 157

Список опечаток в № 2 т. 20, 2024 163

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

Gizatullin F. A., Abdrakhmanov V. Kh., Gabidullina Z. G.

INSTALLATION FOR OPTICAL REGISTRATION OF THE PROCESSES OF FORMATION OF SPARK DISCHARGES IN SEMICONDUCTOR SPARK PLUGS AND IGNITION OF FLAMMABLE MIXTURES UNDER TEST BENCH CONDITIONS	9
--	---

Petushkov M. Yu., Kholodilov S. S.

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS FOR CURRENT SIGNAL SYNCHRONIZATION IN DIAGNOSTICS OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS	17
--	----

Sattarov R. R., Makhiyanov A. V., Miniakhmetova S. O.

COMPUTER SIMULATION OF A WIND TURBINE BASED ON TWO SYNCHRONOUS GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS	28
---	----

Makulov I. A., Vasiliev P. I., Khazieva R. T.

MODELING OF THE INDUCTION HEATING PROCESS OF A PIPELINE FOR INDUSTRIAL EQUIPMENT	38
---	----

Maksudov D. V.

INFLUENCE OF BARRIER DISCHARGE POWER ON THE EFFICIENCY OF OZONE FORMATION IN A HONEYCOMB STRUCTURE OZONIZER	47
--	----

Kuptsov D. V., Khazieva R. T.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF CHARGERS BY USING A MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT	56
---	----

Shumikhin A. Yu., Kirillov R. V., Khazieva R. T.

COMPUTER SIMULATION OF OPERATION OF SUBSTATION RELAY PROTECTION IN MATLAB SIMULINK PACKAGE	67
---	----

Yashin A. N.

CONVERSION OF THE WATTMETROGRAM OF THE ELECTRIC DRIVE OF A SUCKER-ROD PUMP INTO A DYNAMOGRAM	80
---	----

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

Kulakova E. S., Batyrkaeva A. M.

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF CAMPUS INDIRECT EMISSIONS 89

Zakirnichnaya M. M., Palladina Ya. A.

IDENTIFYING THE MAIN FAULTS OF CENTRIFUGAL PUMPING UNITS USING
A COLORIMETRIC AMPLITUDE INDICATOR BASED ON WAVELET PATTERN
MODELING 98

Khakimov E. R., Suleymanov I. N.

MODELING OF THE CONTROL MODULE OF ROUTING AND SWITCHING
EQUIPMENT 107

Andrianov V. S., Kicha M. A.

CAPABILITIES OF RADIO TRANSMITTERS FOR UNDERWATER
COMMUNICATION IN INFORMATION SYSTEMS 117

METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

Kuzminskaya E. V., Skorospeshkin M. V., Osipov V. V.

VERIFICATION OF DIGITAL MEASURING INSTRUMENTS
USING MACHINE VISION 125

Pereverzin P. V., Pereverzin A. P., Fetisov V. S., Milovzorov D. G.

DEVELOPMENT OF MODERN SYSTEMS FOR MEASURING THE DEPTH
OF A DRILLING RIG DURING THE LOGGING ON A DRILL PIPE 135

Khuramshin D. R., Ulikanov R. R., Koledin S. N.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR DETERMINING THE VOLUME OF PHASES
OF A TWO-PHASE MIXTURE IN THE PIPELINE OF THE STAND 145

About the Authors 157

List of errata in No. 2, vol. 20, 2024 163

Научная статья

УДК 621.317.7.087.6

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-9-16

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕЧАХ И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ

**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

**Вали Хызырович Абдрахманов****Vali Kh. Abdrakhmanov**

кандидат технических наук,
доцент кафедры электроники и физики наноструктур,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Зульфия Газинуровна Габидуллина****Zulfya G. Gabidullina**

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

Актуальность

В ходе совершенствования систем зажигания авиационных двигателей возникает необходимость применения средств оптической регистрации быстротекущих импульсных процессов искрообразования в свечах. Использование традиционных средств оптической регистрации с помощью высокоскоростных фоторегистраторов в составе испытательных стендов связано со значительными временными и материальными затратами. Альтернативой для существующих фоторегистрирующих установок может являться применение современных средств вычислительной техники на основе использования ПЗС-сенсоров, управляемых микроконтроллером. Разработка подобной установки имеет существенный практический интерес для решения задач повышения эффективности систем зажигания современных и перспективных авиационных двигателей.

Ключевые слова

емкостная система
зажигания,
полупроводниковая свеча,
измерители энергии,
оптический
фоторегистратор

Цель исследования

Разработка установки для оптической высокоскоростной регистрации динамических процессов образования и развития искровых разрядов в полупроводниковых свечах емкостных систем зажигания и процессов воспламенения топливовоздушных смесей в авиационных двигателях.

Методы исследования

В ходе разработки установки использовались методы и средства регистрации параметров быстротекущих импульсных процессов с привлечением необходимых датчиков получения измерительной информации, средств передачи и преобразования информации, в том числе, средств приема оптической информации и использованием ПЗС-сенсора.

Результаты

Разработана структурная схема установки для оптической регистрации параметров быстротекущих импульсных разрядных процессов в полупроводниковых свечах емкостных систем зажигания. Установка является альтернативой существующим высокоскоростным фоторегистраторам для оценки динамических процессов образования и развития искровых разрядов, а также процессов воспламенения топливовоздушных смесей в авиационных двигателях в условиях испытательных стендов.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №23-29-00713, <https://rscf.ru/project/23-29-00713/>.

Для цитирования: Гизатуллин Ф. А., Абдрахманов В. Х., Габидуллина З. Г. Установка для оптической регистрации процессов образования искровых разрядов в полупроводниковых свечах и воспламенения горючих смесей в условиях испытательных стендов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 9-16. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-9-16>.

Original article

INSTALLATION FOR OPTICAL REGISTRATION OF THE PROCESSES OF FORMATION OF SPARK DISCHARGES IN SEMICONDUCTOR SPARK PLUGS AND IGNITION OF FLAMMABLE MIXTURES UNDER TEST BENCH CONDITIONS

Relevance

In the course of improving aircraft engine ignition systems, it becomes necessary to use optical recording devices for fast-moving pulsed spark formation processes in spark plugs. The use of traditional optical recording devices using high-speed photo recorders as part of test benches is associated with significant time and material costs. An alternative to existing photo recording devices may be the use of modern computing devices based on the use of CCD sensors controlled by a microcontroller. The development of such a device is of significant practical interest for solving the problems of increasing the efficiency of ignition systems of modern and prospective aircraft engines.

Aim of research

Development of a setup for optical high-speed recording of dynamic processes of formation and development of spark discharges in semiconductor spark plugs of capacitive ignition systems and processes of ignition of fuel-air mixtures in aircraft engines.

Keywords

capacitive ignition system, semiconductor spark plug, energy meters, optical photo recorder

Research methods

During the development of the installation, methods and means for recording the parameters of fast-flowing pulse processes were used, using the necessary sensors for receiving measurement information, means for transmitting and converting information, including means for receiving optical information and using a CCD sensor.

Results

A structural diagram of the setup for optical recording of parameters of fast-flowing pulse discharge processes in semiconductor spark plugs of capacitive ignition systems has been developed. The setup is an alternative to existing high-speed photo recorders for assessing dynamic processes of formation and development of spark discharges, as well as processes of ignition of fuel-air mixtures in aircraft engines under test bench conditions.

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00713, <https://rscf.ru/project/23-29-00713/>.

For citation: Gizatullin F. A., Abdrakhmanov V. Kh., Gabidullina Z. G. Ustanovka dlya opticheskoy registratsii protsessov obrazovaniya iskrovykh razryadov v poluprovodnikovykh svechakh i vosplameneniya goryuchikh smesey v usloviyakh ispytatel'nykh stendov [Installation for Optical Registration of the Processes of Formation of Spark Discharges in Semiconductor Spark Plugs and Ignition of Flammable Mixtures under Test Bench Conditions]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 9-16 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-9-16>.

Введение

Системы зажигания как элементы систем воспламенения авиационных двигателей имеют особую специфику в составе электрооборудования летательных аппаратов. Отличительная особенность систем зажигания состоит в том, что искровые разряды в свечах являются быстротекущими и воздействуют на воспламеняемую топливовоздушную смесь комплексно, причем это воздействие имеет многие разнородные составляющие, в том числе, электро- и газодинамическую, тепловую и химическую. Данное обстоятельство значительно осложняет задачи исследования и оценки эффективности разрядов в свечах, разработки обоснованных и достоверных методик проектирования систем зажигания, обеспечивающих достижение требуемых пусковых характеристик камер сгорания и воспламенителей.

В ходе исследования, разработки и совершенствования широко применяемых в настоящее время емкостных

систем зажигания с полупроводниковыми свечами различных типов возникают задачи, решение которых требует применения средств оптической регистрации процессов образования и развития искровых разрядов в свечах, процессов инициирования воспламенения топливовоздушных смесей. Эти задачи классифицируются по следующим основным направлениям [1–8].

1. Исследование влияния параметров разрядных цепей систем зажигания на закономерности механизма образования разрядов в полупроводниковых свечах, содержащих две стадии разрядов — подготовительную и искровую, причем подготовительная стадия разрядов формируется в материале полупроводника, а искровая — в междуэлектродном зазоре свечи над поверхностью полупроводникового материала.

2. Исследование механизмов воспламенения горючих смесей искровыми разрядами, определение преобладающего влияния группы тепловых и нете-

пловых теорий воспламенения в зависимости от схемотехники систем зажигания и интегральных параметров потока горючих смесей в зоне образования искровых разрядов.

3. Исследование пространственно-временных характеристик плазменного выброса из разрядных камер стреляющих полупроводниковых свечей в зависимости от конструктивных особенностей разрядных камер стреляющих свечей.

4. Исследование влияния стадий разряда в полупроводниковых свечах — подготовительной и искровой на износ полупроводникового материала и электродов в функции параметров разрядных цепей, влияющих на энергетические характеристики искровых разрядов.

5. Исследование воспламеняющей способности полупроводниковых свечей в условиях специализированных огневых стендов с учетом механизмов стабилизации пламени в камерах сгорания и пусковых воспламенителях.

6. Исследование закономерностей образования и развития ядра пламени, инициированного искровым разрядом в свече в условиях, характеризующих особенности наземных и высотных запусков авиационных газотурбинных двигателей.

Оптическая регистрация развития искровых разрядов и образования ядер пламени в горючей смеси при решении названных выше задач может проводиться, в том числе с использованием высокоскоростных фоторегистраторов типа СФР, высокоскоростных фоторегистрирующих установок типа ВФУ-1 в режиме фотохронографа и кадрированной микросъемки, с использованием осциллографов с высокоскоростными кинокамерами.

Особая актуальность использования средств оптической регистрации быстротекущих импульсных процессов связана

с результатами работ [2, 7], где доказано, что воспламеняющая способность емкостных систем зажигания в условиях высотных запусков двигателей однозначно определяется величиной критерия воспламеняющей способности емкостных систем зажигания в виде функции энергетических параметров искровых разрядов в свечах, причем геометрические размеры искровых разрядов и начального ядра пламени, образованного искрой, имеют корреляционную зависимость от величины критерия воспламеняющей способности. При проектировании новых газотурбинных двигателей в техническом задании на разработку системы зажигания задаются энергетические характеристики системы зажигания и, как правило, протяженность плазменного выброса из разрядных камер полупроводниковых свечей.

Использование традиционных средств оптической регистрации быстротекущих импульсных процессов в составе испытательных стендов связано со значительными временными и материальными затратами, перечисленные выше задачи могут решаться более эффективно с применением современных средств вычислительной техники.

Постановка задачи и решение

Основная сложность при создании регистрирующей установки связана с тем, что процессы образования искровых разрядов в свечах и инициирования воспламенения горючей смеси являются быстротекущими. Современные ПЗС-сенсоры позволяют регистрировать динамические процессы с высокой частотой, ограничением является относительно невысокая скорость вывода требуемой информации [9]. Оптимальным решением вопроса в данном случае будет являться вывод информации не о каждом кадре при высокоскоростной съемке, а об отдельных кадрах с

частотой, достаточной для дальнейшей обработки и описания исследуемых процессов.

Структурная схема разрабатываемой установки для оптической регистрации параметров быстротекущих импульсных процессов приведена на рисунке 1. Состав установки является универсальным для решения обозначенных выше исследовательских задач. В частности, в установке предусматривается возможность фиксации времени задержки выброса плазмы искровых разрядов из разрядных камер стреляющих полупроводниковых свечей по отношению к моменту возникновения разряда у основания разрядной камеры. Регистрируется также длительность существования плазменного выброса после выхода из разрядной камеры с оценкой динамики

развития ядра пламени в горючей смеси, инициированного искровым разрядом.

ПЗС-сенсор как основной блок установки воспринимает поток излучения от полупроводниковой свечи F через фокусирующее устройство. Управление ПЗС-сенсором осуществляется с помощью микроконтроллера. Съемка ПЗС-сенсором ведется с большой скоростью, и для временного хранения полученного изображения используется память *FIFO* для упорядочения процесса восприятия и обработки информации. Преобразование информации с выхода ПЗС в аналоговом виде в цифровой код возможно с использованием аналого-цифрового преобразователя. Упрощенный вариант, принятый при создании регистрирующей установки, предполагает использование компаратора вместо

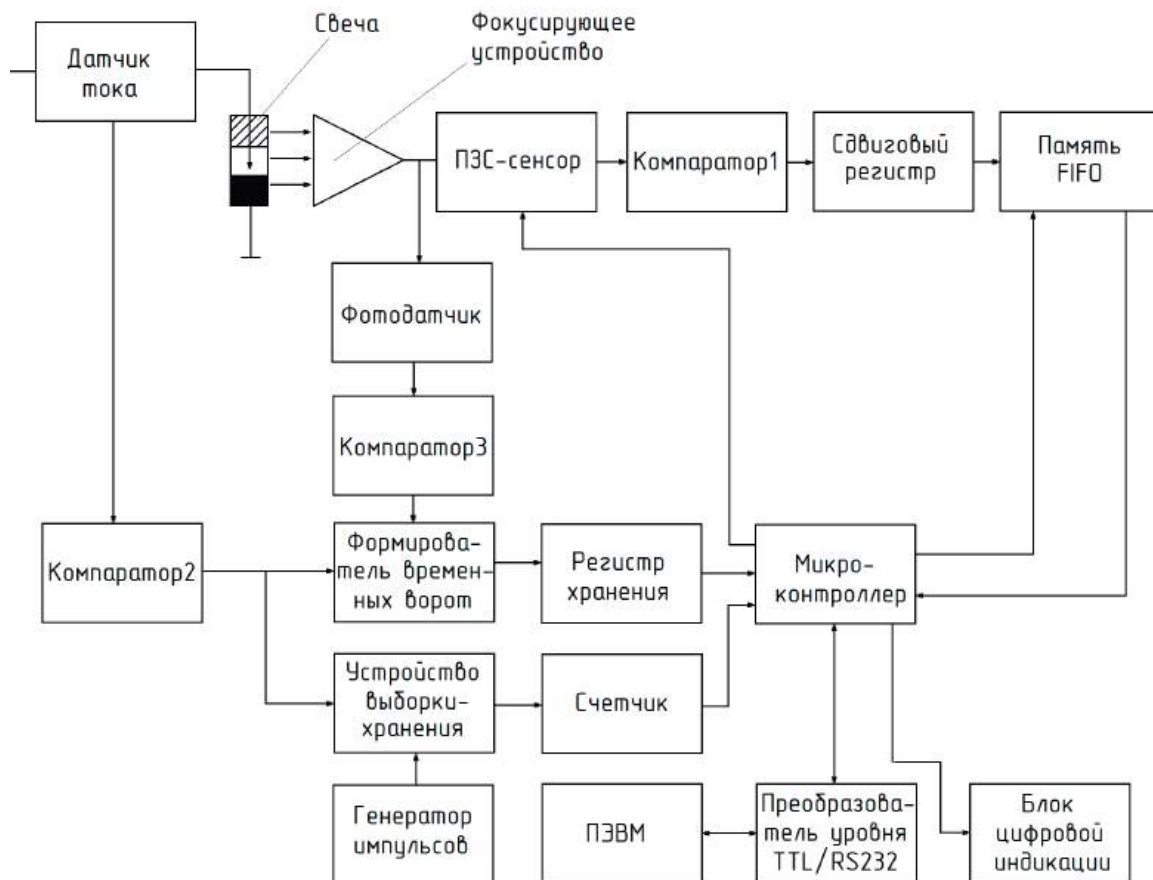


Рисунок 1. Структурная схема установки для оптической регистрации параметров быстротекущих импульсных процессов

Figure 1. Structural diagram of the installation for optical registration of fast pulsed process parameters

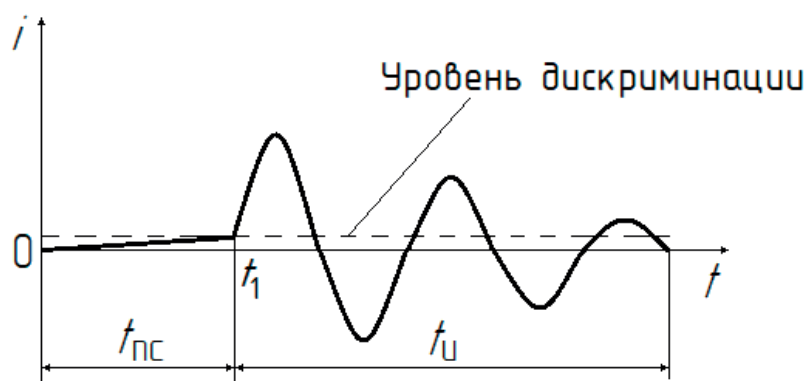
АЦП, что допустимо с незначительной погрешностью; обоснованием является то, что применяется черно-белый ПЗС; при этом требуется только выделить оттенки черного цвета.

Вводить данные на обработку в микроконтроллер удобнее и быстрее всего через параллельный порт микроконтроллера. Для этого сразу после компаратора данные преобразуются из последовательного кода в параллельный с помощью сдвигового регистра и хранятся в памяти *FIFO*. Управление работой памяти *FIFO* осуществляется микроконтроллером.

Запуск процесса съемки происходит от сигнала с датчика тока, подключенного последовательно с полупроводниковой свечой. Форма кривой разрядного тока во времени показана на рисунке 2 [1]. При появлении сигнала с датчика тока формируются также первые временные «ворота» для определения времени задержки выброса плазмы разряда из рабочей камеры свечи по отношению

к моменту появления искровой стадии разряда в свече.

Формирование временных ворот происходит по фронту импульса с выхода второго компаратора, уровень дискриминации которого соответствует току перехода подготовительной стадии разряда в искровую в момент времени t_1 (рисунок 2). Подсчет времени задержки выброса плазмы разряда заканчивается при появлении сигнала с фотодатчика, который через третий компаратор поступает на второй вход формирователя временных ворот. Для измерения длительности существования плазменного выброса используется регистр хранения. Временные ворота закрываются при исчезновении сигнала с фотодатчика. Длительность искровой стадии разряда по сигналу с датчика тока измеряется известным методом дискретного счета. Прямоугольный цифровой сигнал с выхода второго компаратора, соответствующий длительности искровой стадии разряда, поступает в устройство



$t_{\text{Пс}}$ — длительность подготовительной стадии разряда, развивающейся в материале полупроводника;

$t_{\text{и}}$ — длительность видимой искровой стадии разряда

$t_{\text{Пс}}$ — duration of the preparatory stage of the discharge developing in the semiconductor material;

$t_{\text{и}}$ — duration of the visible spark stage of the discharge

Рисунок 2. Зависимость разрядного тока через полупроводниковую свечу от времени

Figure 2. The dependence of the discharge current through a semiconductor candle on time

выборки-хранения. Этот сигнал заполняется импульсами с генератора импульсов, следующими с высокой частотой. Счетчик считает количество импульсов, которое пропорционально длительности искровой стадии разряда в полупроводниковой свече [10].

После обработки микроконтроллером всех полученных данных в режиме динамической индикации пользователь может наблюдать результат с помощью блока цифровой индикации. Для увеличения функциональных возможностей устройства регистрации и дальнейшей обработки полученных данных разрабатываемое устройство можно подключать к последовательному порту ПЭВМ с помощью блока преобразования уровня TTL/RS232. Подключение к ПЭВМ

позволяет передавать изображение, полученное с помощью ПЗС-сенсора, без дополнительных преобразований, что дает возможность создавать базу данных изображений, а не только численных данных.

Выводы

Разработанная регистрирующая установка является альтернативой существующим высокоскоростным фоторегистраторам для оценки различных показателей эффективности систем зажигания, связанных с динамическими процессами образования и развития искровых разрядов в свечах, а также с процессами воспламенения горючих смесей в условиях испытательных стендов.

Список источников

1. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2002. 249 с. ISBN 5-86911-376-8.
2. Гизатуллин Ф.А. К теории искрового воспламенения топливовоздушных смесей в газотурбинных двигателях // *Авиационная промышленность*. 2000. № 1. С. 56-60.
3. Гизатуллин Ф.А., Алимбеков Л.И. Закономерности износа полупроводниковых свечей зажигания // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2002. № 1. С. 39-42. EDN: HRMAYJ.
4. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М. Влияние особенностей разрядных камер стреляющих полупроводниковых свечей газотурбинных двигателей на характеристики плазменного выброса // *Прикладная физика*. 2018. № 3. С. 10-14. EDN: XSCUUN.
5. Вахитов Р.Ш., Гизатуллин Ф.А., Комиссаров Г.В. Разрядные процессы в системе зажигания с полупроводниковой свечой при запуске ГТД // *Авиационная промышленность*. 1979. Т. 9. С. 24-25.
6. Гизатуллин Ф.А., Байбурин И.Х. Особенности определения параметров емкостных систем зажигания для ГТД с высотным запуском // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2004. № 2. С. 44-46. EDN: HKYGOX.
7. Газизов Д.Р., Гизатуллин Ф.А. О совершенствовании методики проектирования

емкостных систем зажигания // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. С. 233. EDN: RXUPNV. URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2013/2/541.pdf> (дата обращения 02.04.2023).

8. Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М. Влияние накопленной энергии в емкостных системах зажигания газотурбинных двигателей и частоты искровых разрядов на ресурс полупроводниковых свечей зажигания // *Вестник машиностроения*. 2017. № 2. С. 87-88. EDN: YHWLEL.

9. Тришенков М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. М.: Радио и связь, 1992. 399 с. ISBN 5-256-01057-3.

10. Пат. 2210085 РФ, МПК G 01 R 29/2. Универсальный измеритель длительности искры / А.В. Шокоров, Ф.А. Гизатуллин. 2001127461/09, Заявлено 09.10.2001; Опубл. 10.08.2003. Бюл. 22.

References

1. Gizatullin F.A. *Emkostnye sistemy zazhiganiya* [Capacitive Ignition Systems]. Ufa, Ufimsk. gos. aviats. tekhn. un-t, 2002. 249 p. ISBN 5-86911-376-8. [in Russian].
2. Gizatullin F.A. K teorii iskrovogo vosplamneniya toplivovozdushnykh smesei v gazoturbinnnykh dvigatelyakh [On the Theory of Spark Ignition of Air-Fuel Mixtures in Gas Turbine Engines]. *Aviatsionnaya promyshlennost'* —

Aviation Industry, 2000, No. 1, pp. 56-60. [in Russian].

3. Gizatullin F.A., Alimbekov L.I. Zakonomernosti iznosa poluprovodnikovyykh svechei zazhiganiya [Mechanism of Semiconductor Ignition Plugs Wear]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika — Bulletin of Higher Educational Institutions. Aviation Technology*, 2002, No. 1, pp. 39-42. EDN: HRMAYJ. [in Russian].

4. Gizatullin F.A., Salikhov R.M. Vliyaniye osobennostey razryadnykh kamer strelyayushchikh poluprovodnikovyykh svechei gazoturbinnyykh dvigatelei na kharakteristiki plazmennogo vybroso [Influence of the Features of the Discharge Chambers of Semiconductor Glow Plugs of Gas Turbine Engines on Characteristics of the Plasma Ejection]. *Prikladnaya fizika — Applied Physics*, 2018, No. 3, pp. 10-14. EDN: XSCUUh. [in Russian].

5. Vakhitov R.Sh., Gizatullin F.A., Komissarov G.V. Razryadnye protsessy v sisteme zazhiganiya s poluprovodnikovoi svechoi pri zapuske GTD [Discharge Processes in the Ignition System with a Semiconductor Spark Plug during Gas Turbine Engine Start-Up]. *Aviatsionnaya promyshlennost' — Aviation Industry*, 1979, Vol. 9, pp. 24-25. [in Russian].

6. 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 GTEs with High-Altitude Starts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika — Bulletin of Higher Educational Institutions. Aviation Technology, 2004, No. 2, pp. 44-46. EDN: HKYGOX. [in Russian].

7. Gazizov D.R., Gizatullin F.A. O sovershenstvovaniy metodiki proektirovaniya emkostnykh sistem zazhiganiya [Methods to Improve Design Capacitive Ignition Systems]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2013, No. 2, pp. 233. EDN: RXUPNV. URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2013/2/541.pdf> (accessed 02.04.2023). [in Russian].

8. Gizatullin F.A., Salikhov R.M. Vliyaniye nakoplennoy energii v emkostnykh sistemakh zazhiganiya gazoturbinnyykh dvigatelei i chastoty iskrovyykh razryadov na resurs poluprovodnikovyykh svechei zazhiganiya [Influence of Accumulated Energy on Capacitive Ignition Systems of Gas Turbine Engines and the Frequency of Discharges a Resource for Semiconductor Spark Plug]. *Vestnik mashinostroeniya — Bulletin of Mechanical Engineering*, 2017, No. 2, pp. 87-88. EDN: YHWLEL. [in Russian].

9. Trishenkov M.A. Fotopriemnye ustroystva i PZS. Obnaruzhenie slabyykh opticheskikh signal [Photodetectors and CCD. Detection of Weak Optical Signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1992. 399 p. ISBN 5-256-01057-3. [in Russian].

10. Shokorov A.V., Gizatullin F.A. Universal'nyi izmeritel' dlitel'nosti iskry [Universal Spark Duration Meter]. Patent RF, No. 2210085, 2003. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; одобрена после рецензирования 17.09.2024; принята к публикации 24.09.2024.

The article was submitted 10.09.2024; approved after reviewing 17.09.2024; accepted for publication 24.09.2024.

Научная статья

УДК 621.313.333

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-17-27

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ СИГНАЛА ТОКА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

**Михаил Юрьевич Петушков****Mikhail Yu. Petushkov**

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электроники и микроэлектроники,
Магнитогорский государственный технический университет
им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Сергей Сергеевич Холодилов****Sergey S. Kholodilov**

доцент кафедры информатики и информационной безопасности,
Магнитогорский государственный технический университет
им. Г. И. Носова,
Магнитогорск, Россия

Актуальность

Диагностика синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) является одним из ключевых факторов обеспечения бесперебойной работы электроприводов различного назначения. Различные неисправности синхронных приводов, такие как нарушение исходной геометрической формы, снижение коэрцитивной силы магнитов, различные разрушения магнитов (трещины и сколы), могут быть обнаружены при анализе линейного тока, а, именно, спектральных характеристик. Методы выявления «отпечатков» на спектральных характеристиках и их сопоставления называются сигнатурным анализом. В связи с необходимостью обнаружения малейших отклонений от исходной сигнатуры необходимо точное сравнение полученного сигнала с его эталоном. Такой подход реализуется только при условии однозначного совпадения исследуемых сигналов по их периодам и группам магнитов как источников сигналов. Использование дискретного вейвлет-преобразования позволяет однозначно идентифицировать сигналы, полученные в результате взаимодействия постоянного магнита и катушек статора двигателя для каждого отдельного магнита.

Цель исследования

Статья посвящена вопросам применения теории вейвлетов для синхронизации исследуемого сигнала тока, содержащего диагностическую информацию, с эталонным сигналом исправного СДПМ, что позволит выполнить непосредственное сравнение огибающих тока и

Ключевые слова

вейвлет-преобразование,
вейвлет-анализ,
сигнатурный анализ,
спектральный анализ,
токовая диагностика,
СДПМ

выявить линейные токовые сигнатуры неисправностей в структуре магнитоэлектрической системы СДПМ.

Методы исследования

В работе применены методы теоретических и экспериментальных исследований. Для проведения теоретических исследований использовались программные пакеты Excel и MathCad; программный пакет MatLab для проведения вейвлет-анализа и анализа Фурье; программный пакет Elcut для разработки компьютерной модели и проведения имитационного моделирования; основы теории вейвлетов.

Результаты

Разработан способ синхронизации для получения данных с СДПМ, позволяющий выявить линейные токовые сигнатуры и однозначно идентифицировать периоды сигнала, отвечающие за определенную группу магнитов. Показано, что использование вейвлет-преобразования для синхронизации исследуемого сигнала существенно расширяет возможности сигнатурного анализа линейного тока.

Для цитирования: Петушков М. Ю., Холодилов С. С. Применение вейвлет-анализа для синхронизации сигнала тока при диагностике синхронных двигателей с постоянными магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 17-27. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-17-27>.

Original article

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS FOR CURRENT SIGNAL SYNCHRONIZATION IN DIAGNOSTICS OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Relevance

Diagnostics of permanent magnet synchronous motors (PMSM) is one of the key factors in ensuring the smooth operation of electric drives for various purposes. Various malfunctions of synchronous drives, such as a violation of the original geometric shape, a decrease in the coercive force of the magnets, various destruction of the magnets, such as cracks and chips, can be detected by analyzing the linear current, namely the spectral characteristic. Methods for identifying «mark» on the spectral characteristics and their comparison are referred to as signature analysis. Due to the need to detect the slightest deviations from the original signature, an accurate comparison of the original signal with its standard is necessary. This approach is implemented only under the condition of unambiguous coincidence of the studied signals in terms of their periods and groups of magnets as signal sources. Wavelet transform can be applied as a method of synchronization of two signals.

Aim of research

The article is devoted to the issues of application of wavelet theory for synchronization of the studied current signal containing diagnostic information with the reference signal of a serviceable PMSM, which will allow performing a direct comparison of current envelopes and identifying linear current signatures of faults in the structure of the magnetoelectric system of the PMSM.

Research methods

The work uses methods of theoretical and experimental research. To conduct theoretical research, the following software packages were used: Excel and MathCad; MatLab software package for wavelet analysis and

Keywords

wavelet transform, wavelet analysis, signature analysis, spectral analysis, current diagnostics, PMSM

Fourier analysis; Elcut software package for developing a computer model and conducting simulation modeling; fundamentals of wavelet theory.

Results

A synchronization method for obtaining data from the PMSM has been developed, which allows one to identify linear current signatures and uniquely identify signal periods responsible for a certain group of magnets. It has been shown that the use of wavelet transform for synchronization of the studied signal significantly expands the capabilities of signature analysis of linear current.

For citation: Petushkov M. Yu., Kholodilov S. S. *Primeneniye veyvlet-analiza dlya sinkhronizatsii signala toka pri diagnostike sinkhronnykh dvigateley s postoyannymi magnitami* [Application of Wavelet Analysis for Current Signal Synchronization in Diagnostics of Permanent Magnet Synchronous Motors]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 17-27 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-17-27>.

Введение

Широкое распространение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) обусловлено их высокой удельной мощностью. Применение СДПМ в критической инфраструктуре является основанием для предъявления высоких требований к их надежности и ставит задачу ранней функциональной диагностики накопителей без вывода из эксплуатации. Для решения задач функциональной диагностики оптимально использовать вейвлет-анализ, так как он обладает высокой чувствительностью в области малых амплитуд, а также позволяет однозначно определять время появления гармонических составляющих, являющихся диагностическими признаками тех или иных неисправностей электромагнитной системы двигателя.

Важным фактором диагностики с помощью анализа линейных токов является проблема временных измерений. Отказ одного магнита отражается на спектрограмме всего тока, и очень сложно определить время появления маркера отказа и, следовательно, отнести его к тому или иному магниту в СДПМ. Для повышения точности методов диагностики необходимо найти способы синхронизации исследуемых сигналов, полученных как в виде эталонной после-

довательности, так и в дальнейшем при проведении функциональной диагностики с использованием сигнатурного анализа тока. Далее будет показан способ синхронизации измерений с использованием вейвлет-анализа.

Синхронизация сигнала тока

Состояние магнитной системы СДПМ отражается в потребляемом или вырабатываемом токе в зависимости от режима работы [1]. Каждый магнит ротора влияет на спектральные и другие характеристики тока [2]. При этом каждый магнит несет в себе определенные свойства, такие как распределение коэрцитивной силы по объему, распределение магнитного потока, геометрические особенности, особенности крепления и др. При нормальной работе указанные выше особенности мало влияют на вращение ротора. Однако даже малейшие отличия формы тока можно обнаружить и использовать в качестве своеобразного «отпечатка пальца» или подписи, при этом данная операция может производиться как для всей магнитной системы в целом, так и для каждого отдельного магнита [3]. Выявление особенностей каждого магнита в отдельности позволит оперативно контролировать их состояние, проводить более расширенную диагностику,

применять большее количество методов сравнения сигналов для выявления большего спектра неисправностей или повышения точности диагностики [4–9].

Использование дискретного вейвлет-преобразования позволяет однозначно идентифицировать сигналы, полученные в результате взаимодействия постоянного магнита и катушек статора двигателя для каждого отдельного магнита. Для проверки этого утверждения была проведена серия моделирований и натуральных экспериментов.

В соответствии с алгоритмом декомпозиции сигнала для дискретного вейвлет-преобразования, показанным на рисунке 1, сигнал последовательно декомпозируется на аппроксимирующие детализирующие составляющие. Исходный текущий сигнал можно получить сложением любого аппроксимирующего коэффициента со всеми коэффициентами детализации, находящимися на том же уровне и выше [10], по формуле:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{k=j}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t), \quad (1)$$

где j — уровень разложения;

i^A — аппроксимирующие коэффициенты;

i^D — детализирующие коэффициенты;

$\varphi(t)$ — масштабирующая функция;

$\psi(t)$ — выбранный вейвлет;

k — номер коэффициента.

Преимуществом такого подхода в отличие от разложения Фурье является возможность избежать размытия спектра, поэтому любые малейшие изменения сигнала будут отражаться на коэффициентах детализации [11]. Именно это свойство необходимо для нахождения малейших отличий между исходным сигналом тока (опорным) и сигналом тока, полученным при работе СДПМ, сравнение которых может дать информацию о каких-либо изменениях в магнитной системе [12]. Также высокая чувствительность позволит получать более точные сигнатуры тех или иных неисправностей и изменений в структуре СДПМ. Для доказательства способности дискретного вейвлет-анализа токового сигнала выявлять малейшие изменения в структуре магнитной системы было проведено моделирование с помощью пакета MATLAB. На рисунке 2 показан

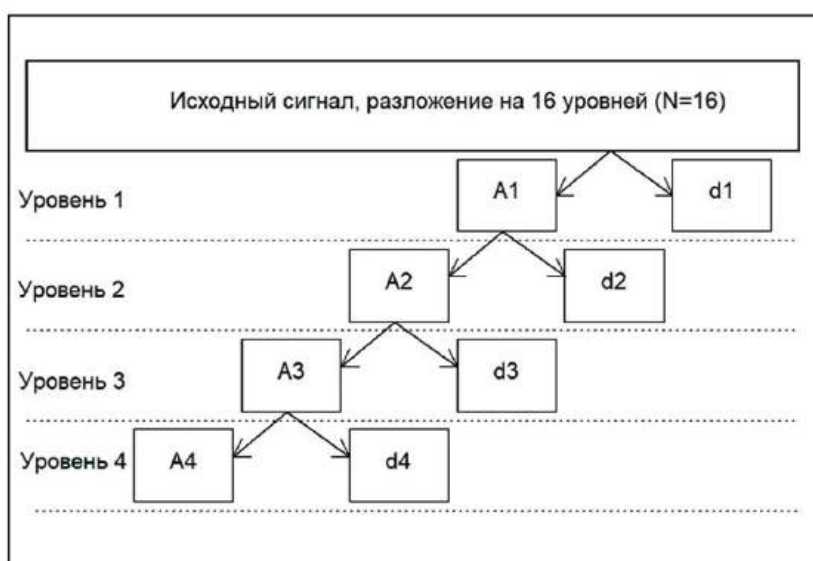


Рисунок 1. Схема декомпозиции сигнала дискретного вейвлет-преобразования

Figure 1. Signal decomposition scheme in discrete wavelet transform

сигнал одного периода «чистой» синусоиды с частотой дискретизации 3600 Гц, объединенный с графиком коэффициентов детализации вейвлета Добеши 2.

Чтобы доказать возможность улавливания мельчайших всплесков с помощью дискретного вейвлет-преобразования, добавим к «чистому» синусу небольшой провал, описываемый формулой:

$$i(t) = \begin{cases} y = \sin x, & \text{где } 0 \leq x < 62.5, 63.5 \leq x < 360 \\ y = 0.887, & \text{где } 62.5 \leq x < 63 \\ y = 0.00758x + 0.887, & \text{где } 63 \leq x < 63.5 \end{cases} \quad (2)$$

где $i(t)$ — функция тока;

y — амплитуда сигнала;

x — количество дискретных отсчетов.

На рисунке 3 приведено изображение сигнала по формуле (2). В отдельном окне выделяется провал, занимающий 1 градус и характеризующийся частотой $360f_{disc}$.

Согласно рисунку 3, на графике коэффициентов детализации очень четко отражается небольшой всплеск, незаметный на фоне основного сигнала. При этом реализуются важнейшие преимущества вейвлет-преобразования:

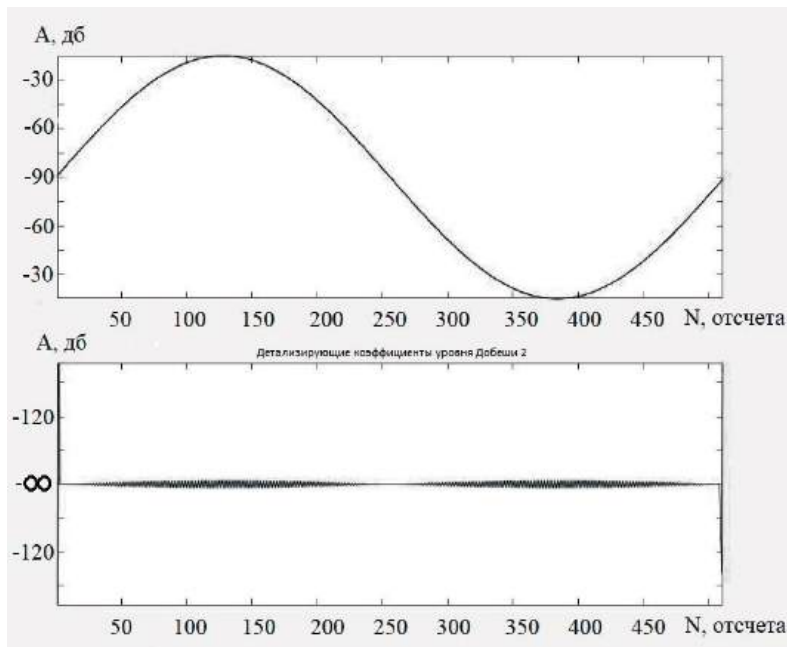


Рисунок 2. Синусоида и детализирующие коэффициенты Добеши 2

Figure 2. Sinusoid and Daubechies 2 detail coefficients

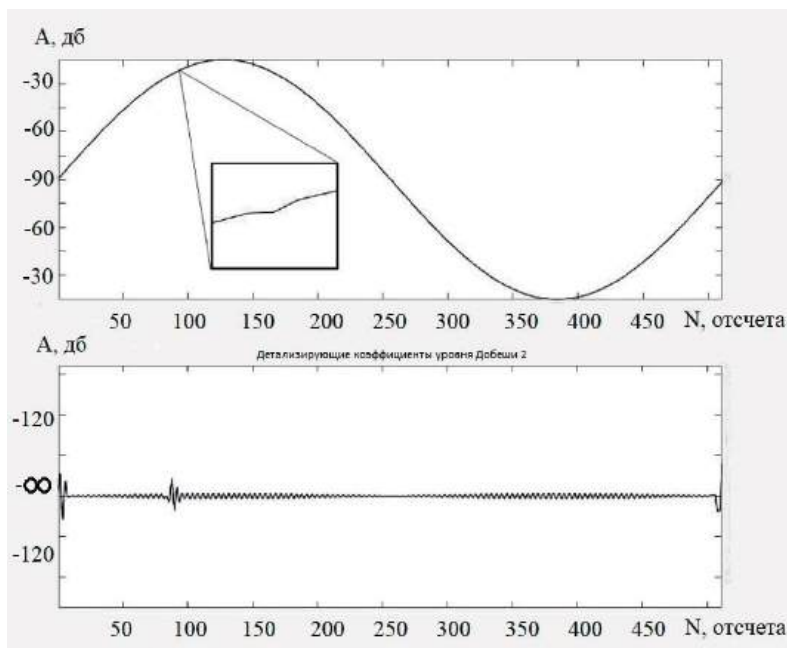


Рисунок 3. Сигнал, содержащий провал и детализирующие коэффициенты Добеши 2

Figure 3. Signal containing dip and detailing Daubechies 2 coefficients

возможность обнаруживать высшие гармоники амплитудой менее 0,1 % амплитуды исследуемого сигнала, но и идентифицировать моменты их появления. Вышеуказанные свойства вейвлет-преобразования определили возможность использования данного математического аппарата для исследования линейного тока статора СДПМ.

Аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты одномерного дискретного вейвлет-преобразования образуют матрицу коэффициентов (одномерных и двумерных), удобную для математического анализа. Для визуального представления в дальнейшем мы также будем использовать графическое представление коэффициентов разложения.

В конструкции СДПМ содержится определенное количество постоянных магнитов для каждой модели двигателя и определенная их конфигурация. В сочетании с конфигурацией обмоток статора образуется электромагнитная система, работающая как в моторном, так и в генераторном режимах [13]. В этом случае линейный токовый сигнал за один оборот ротора содержит кратное число периодов. Каждый период, по существу, содержит отпечаток магнитного потока тех магнитов, поток которых в данный момент пронизывает эту систему обмоток. Поэтому, анализируя форму линейного тока в генераторном

режиме, можно выявить признаки магнитной системы, содержащей магниты, взаимодействующие с одной обмоткой статора в данный момент времени [1].

В данной статье в качестве объекта исследования будет использована компьютерная модель двигателя Turnigy SK3530-1100, разработанная в пакете Elcut [10]. На рисунке 4 приведён фрагмент разработанной модели. Для стендовых испытаний также использовался двигатель Turnigy SK3530-1100, схема установки приведена на рисунке 5 [12].

Для выявления линейных токовых сигнатур, позволяющих однозначно идентифицировать периоды сигнала, отвечающие за определенную группу магнитов, в пакете приложений Elcut были проведены серия компьютерных симуляций, а также стендовые испытания.

В результате были получены токовые сигналы для каждой обмотки статора. За один полный оборот ротора сигнал образует 7 полных периодов, каждый из которых характеризует определенное сочетание группы из 4-х магнитов, связанных с магнитной системой статора и одной обмоткой. Экспериментальным путем, а также на основании выводов, сделанных в источнике [10], был выбран вейвлет Добеши 2, так как именно с его помощью получается наиболее однозначно

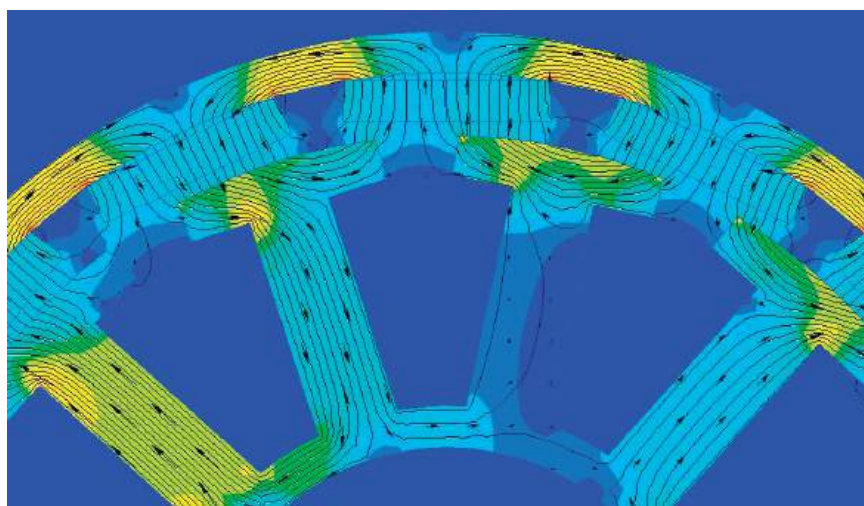


Рисунок 4. Модель магнитной системы СДПМ в Elcut

Figure 4. Model of magnetic system PMSM in Elcut

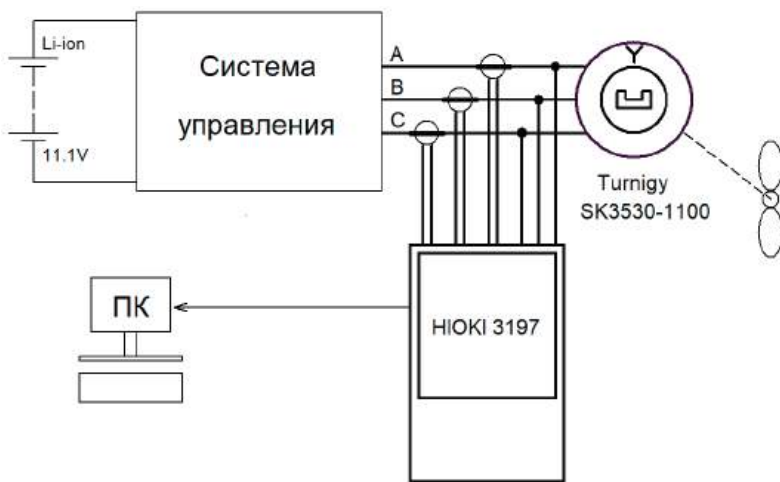


Рисунок 5. Схема стенда для снятия диагностического сигнала

Figure 5. Diagram of the stand for removing the diagnostic signal

интерпретируемый результат для всех исследованных неисправностей [1].

Целью эксперимента было выявление уникальных сигнатур для каждого периода сигнала, что в свою очередь подтвердит возможность однозначной идентификации групп магнитов. Для приема сигнала со стенда использовалась звуковая карта персонального компьютера в линейном режиме с частотой дискретизации 192 кГц. Полученный сигнал без сжатия был преобразован в последовательность чисел, разделенных на периоды, и подвергнут пакетному преобразованию формы сигнала Добеши 2 с уровнем разложения 9. Для учета влияния таких факторов, как частота дискретизации, частота вращения ротора, ускоре-

ние различных порядков, серия опытов включала варьирование всех вышеперечисленных факторов [14].

В результате испытаний была выявлена последовательность детализирующих коэффициентов уровня d2 и d3, которая появляется каждый 7-ой период, что соответствует одному полному обороту ротора, последовательность показана на рисунке 6.

Данный факт соответствует предположению, что каждая группа магнитов, связанных с магнитной системой одной обмотки, имеет свой уникальный набор детализирующих коэффициентов, существенно отличающий ее от других групп. Выявленная периодическая последовательность может быть использована для

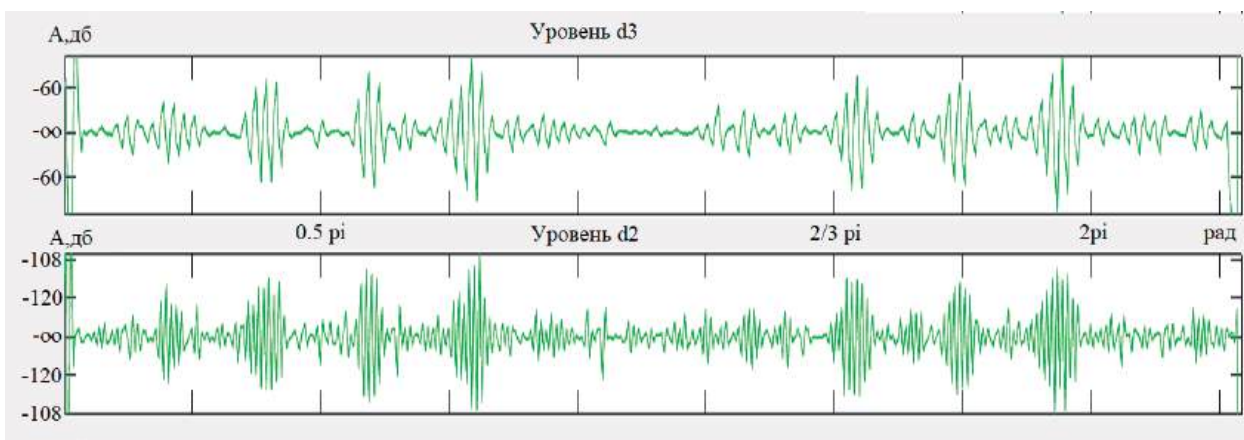


Рисунок 6. Последовательность коэффициентов, полученная при стендовых испытаниях, каждый 7-ой период

Figure 6. Sequence of coefficients obtained during bench tests, every 7th period

идентификации влияния отдельных элементов магнитной системы и, как следствие, оценки положения ротора, что в свою очередь позволяет проводить сравнение двух диагностических сигналов, снятых с одного и того же двигателя в разное время, для проведения их сравнительного анализа и выявления диагностических признаков — сигнатур, характерных для тех или иных неисправностей.

В результате эксперимента и для дальнейшего анализа был разработан способ синхронизации данных, представленный на рисунке 7 [15].

Сначала необходимо получить сигнал от СДПМ с помощью аналого-цифровой преобразователя (АЦП). Далее выделяется участок сигнала, необходимый для последующего анализа. Предлагается отсчитывать два полных оборота ротора, чтобы сравнивать все периоды одного оборота с парными периодами второго, с целью повышения точности. Следующими шагами являются разделение сигнала на отдельные периоды и выполнение дискретного вейвлет-преобразования с каждым периодом и получение матриц коэффициентов. Далее матрицы коэффициентов сравниваются друг с другом, выявляя парные сигналы. Из полученного множества матриц необходимо выбрать наиболее отличающуюся от всех остальных, например, по стандартному отклонению. Период сигнала, матрица коэффициентов которого наиболее отличается от остальных, и будет использоваться в качестве эталонного синхросигнала в дальнейшем.

При следующем снятии сигнала с того же двигателя алгоритм повторяется до этапа сравнения матриц (может потребоваться выравнивание сигнала до определенной амплитуды), далее сравнение проводится с эталонным сигналом, с учетом синхронизации. Таким образом, вновь полученный сигнал можно син-



Рисунок 7. Способ синхронизации сигналов исправного и неисправного СДПМ

Figure 7. Synchronization algorithm for received data from PMSM

хронно сравнить с исходным, сравнить их огибающие, полученные от одного и того же магнита в разное время, что и позволит обнаружить любые изменения в структуре магнитоэлектрической системы СДПМ [5–9].

Выводы

1. Показана принципиальная возможность применения вейвлет-преобразования для идентификации отдельных элементов магнитной системы СДПМ. Данный метод позволяет однозначно выявить влияние конкретных магнитов на конкретную группу обмоток, что в дальнейшем позволит выполнить непосредственное сравнение сигналов от данных групп. Приведены конкретные

примерны на основе практических исследований на стенде.

2. Разработан способ синхронизации для получения данных с СДПМ, позволяющий выявить линейные токовые сигнатуры и однозначно идентифицировать периоды сигнала, отвечающие за определенную группу магнитов.

3. Использование вейвлет-преобразования для синхронизации исследуемого сигнала существенно расширяет возможности сигнатурного анализа линейного тока. Например, анализ Фурье

можно проводить не на самом сигнале, а на разности заданных синхронизированных сигналов, что повысит чувствительность этого метода. Также применение вейвлет-анализа не ограничивается решением задачи синхронизации сигналов. Пакетный вейвлет-анализ также широко используется в анализе сигнатур токов, что в сочетании с исследуемым в данной статье способом синхронизации сигналов повышает точность диагностики.

Список источников

1. Петушков М.Ю., Холодилов С.С. Определение диагностического сигнала для мониторинга синхронных двигателей с постоянными магнитами // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023. № 4 (19). С. 95-107. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-95-107. EDN: ZDLMEC.

2. Cosmatov V., Petushkov M., Sarvarov A. Analysis of Existing Methods of Diagnosis of Electric Motors and Their Development Prospects // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, 18-22 May 2020. 2020. P. 9112030. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112030. EDN: PUOXRJ.

3. Muhammad Sarfraz Moiz, Shazaib Shamim, Muhammad Abdullah, Hamdan Khan, Imtiaz Hussain, Anas Bin Iftikhar, Tayab Din Memon. Health Monitoring of Three-Phase Induction Motor Using Current and Vibration Signature Analysis // *International Conference on Robotics and Automation in Industry*, Oct. 2019. DOI: 10.1109/ICRAI47710.2019.8967356.

4. Петушков М.Ю., Холодилов С.С. Разработка системы диагностирования синхронных двигателей // Тез. докл. 78-й Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, 20–24 апреля 2020 года. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. Т. 1. С. 317. EDN: NZHTBT.

5. Zhang J., Hang J., Cheng M. Diagnosis of Mechanical Unbalance Fault in Permanent Magnet Synchronous Machine Drives // *Electric Power Components and Systems*. 2016. No. 44 (12). P. 1408–1417. DOI: 10.1080/15325008.2016.1169463.

6. Daviu J., Popaleny P. Detection of Induction Motor Coupling Unbalanced and Misalignment via Advanced Transient Current Signature Analysis // *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, September, 2018. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8506949.

7. Song X., Wang Z., Hu J. Detection of Bearing Outer Race Fault in Induction Motors Using Motor Current Signature Analysis // *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, August, 2019. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8922036.

8. Geetha E., Nagarajan C. Induction Motor Fault Detection and Classification Using Current Signature Analysis Technique // *Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, March 2018. DOI: 10.1109/ICEDSS.2018.8544272.

9. Afshar M., Abdi S., Ebrahimi M., Mortazavizadeh S. Static Eccentricity Fault Detection in Brushless Doubly-Fed Induction Machines Based on Motor Current Signature Analysis // *IECON 2019, 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, October 2019. DOI: 10.1109/IECON.2019.8926698.

10. Kuptsov V.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu. A New Approach to Analysis of Induction Motors With Rotor Faults during Startup Based on the Finite Element Method // *Progress in Electromagnetics Research B*. 2012. No. 45. P. 269-290. DOI: 10.2528/PIERB12082916. EDN: RGMTUF.

11. Осипов Д.С. Модели и методы вейвлет-анализа несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей 0,4–110 кВ: дисс. ... д-ра техн. наук. Омск: Омский государственный технический университет, 2019. 305 с.

12. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S., Valyaev A.V. Signature Analysis of the Line Current

of Permanent Magnet Synchronous Motors // Proceedings — 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Sochi, 2021. P. 283–287. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446323. EDN: DIRIZD.

13. Toliyat Hamid A., Subhasis N., Seungdeog C., Homayoun M. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis // CRC Press. 2012. P. 161. DOI: 10.1201/b13008. ISBN 9781315221984.

14. Moskovsky S.B., Sergeev A.N., Sidorova E.I., Marudov A.A. Methods of Wavelet Analysis in Problems of Processing Experimental Data // Eastern European Scientific Journal. 2019. No. 4-4 (44). P. 44–47. EDN RJAMYW.

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

References

1. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S. Opre-delenie diagnosticheskogo signala dlya monitoringa sinkhronnykh dvigatelei s postoyannymi magnitami [Definition of a Diagnostic Signal for Monitoring Permanent Magnet Synchronous Motors]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 4 (19), pp. 95–107. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-4-95-107. EDN: ZDLMEC. [in Russian].

2. Cosmatov V., Petushkov M., Sarvarov A. Analysis of Existing Methods of Diagnosis of Electric Motors and Their Development Prospects. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, 18–22 May 2020*. 2020, pp. 9112030. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112030. EDN: PUOXRJ.

3. Muhammad Sarfraz Moiz, Shazaib Shamim, Muhammad Abdullah, Hamdan Khan, Imtiaz Hussain, Anas Bin Iftikhar, Tayab Din Memon. Health Monitoring of Three-Phase Induction Motor Using Current and Vibration Signature Analysis. *International Conference on Robotics and Automation in Industry*, Oct. 2019. DOI: 10.1109/ICRAI47710.2019.8967356. [in Russian].

4. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S. Razrabotka sistemy diagnostirovaniya sinkhronnykh dvigatelei [Development of a Diagnostic System for Synchronous Motors]. *Tezisy dokladov 78-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi kon-*

ferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya», Magnitogorsk, 20–24 aprelya 2020 goda. [Abstracts of Reports of the 78th International Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Modern Science, Technology and Education», Magnitogorsk, April 20–24, 2020]. Magnitogorsk, Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova, 2020, Vol. 1, pp. 317. EDN: NZHTBT. [in Russian].

5. Zhang J., Hang J., Cheng M. Diagnosis of Mechanical Unbalance Fault in Permanent Magnet Synchronous Machine Drives. *Electric Power Components and Systems*, 2016. No. 44 (12), pp. 1408–1417. DOI: 10.1080/15325008.2016.1169463.

6. Daviu J., Popaleny P. Detection of Induction Motor Coupling Unbalanced and Misalignment via Advanced Transient Current Signature Analysis. *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, September, 2018. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8506949.

7. Song X., Wang Z., Hu J. Detection of Bearing Outer Race Fault in Induction Motors Using Motor Current Signature Analysis. *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, August, 2019. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8922036.

8. Geetha E., Nagarajan C. Induction Motor Fault Detection and Classification Using Current Signature Analysis Technique. *Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, March 2018. DOI: 10.1109/ICEDSS.2018.8544272.

9. Afshar M., Abdi S., Ebrahimi M., Mortazavizadeh S. Static Eccentricity Fault Detection in Brushless Doubly-Fed Induction Machines Based on Motor Current Signature Analysis. *IECON 2019, 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, October 2019. DOI: 10.1109/IECON.2019.8926698.

10. Kuptsov V.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu. A New Approach to Analysis of Induction Motors with Rotor Faults during Startup Based on the Finite Element Method. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2012, No. 45, pp. 269–290. DOI: 10.2528/PIERB12082916. EDN: RGMTUF.

11. Osipov D.S. Modeli i metody veivlet-analiza nesinusoidal'nykh nestatsionarnykh rezhimov elektricheskikh setei 0,4–110 kV: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Models and Methods of Wavelet Analysis of Non-Sinusoidal Transient Modes of 0.4–110 kV Electrical Networks: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2019. 305 p. [in Russian].

12. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S., Valyaev A.V. Signature Analysis of the Line Current

of Permanent Magnet Synchronous Motors. *Proceedings — 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 goda.* Sochi, 2021, pp. 283-287. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446323. EDN: DIRIZD.

13. Toliyat Hamid A., Subhasis N., Seungdeog C., Homayoun M. *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis.* CRC Press, 2012, pp. 161. DOI: 10.1201/b13008. ISBN 9781315221984.

14. Moskovsky S.B., Sergeev A.N., Sidorova E.I., Marudov A.A. *Methods of Wavelet*

Analysis in Problems of Processing Experimental Data. *Eastern European Scientific Journal*, 2019, No. 4-4 (44), pp. 44-47. EDN RJAMYW.

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

Статья поступила в редакцию 20.09.2024; одобрена после рецензирования 27.09.2024; принята к публикации 01.10.2024.

The article was submitted 20.09.2024; approved after reviewing 27.09.2024; accepted for publication 01.10.2024.

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ДВУХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

**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. Makhiyanov**

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

**София Олеговна Миниахметова****Sofia O. Miniakhmetova**

студент кафедры «Экоинжиниринг, природообустройство
и экологические технологии»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

Актуальность

Усиливающиеся последствия изменения климата и истощение запасов полезных ископаемых привели к широкому внедрению возобновляемых источников энергии. Одним из приоритетных направлений данной области является развитие ветроэнергетики, основанной на преобразовании кинетической энергии воздушных потоков в другие формы энергии.

Выработка электричества путем использования энергии ветра производится на ветроэнергетических установках. Применение синхронных генераторов с постоянными магнитами в системе электрогенерации ветроэнергетических установок позволяет добиться высокой надежности и энергоэффективности, что, в свою очередь, делает их более долговечными и экономически целесообразными.

Таким образом, ветроэнергетика способствует диверсификации энергетической системы, обеспечивая при этом экологически чистый и экономически эффективный источник энергии для удовлетворения потребностей человечества.

Цель исследования

Изучить режимы работы при низких и нормальных скоростях ветра модели ветроустановки на основе двух синхронных генерато-

Ключевые слова

энергия, электроэнергия, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, ветровой поток, ветер, ветроэнергетика, ветроэнергетическая установка, ветроэнергетическая система, синхронный генератор с постоянными магнитами, обмотка

ров с постоянными магнитами в пакете прикладных программ Matlab (Simscape).

Методы исследования

Моделирование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами в пакете прикладных программ Matlab (Simscape).

Результаты

Было проведено исследование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами 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., Миниаметова С. О. Компьютерное моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 28-37. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37>.

Original article

COMPUTER SIMULATION OF A WIND TURBINE BASED ON TWO SYNCHRONOUS GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS

Relevance

The increasing effects of climate change and the depletion of mineral resources have led to the widespread introduction of renewable energy sources. One of the priority areas in this field is the development of wind energy, based on the conversion of kinetic energy of air currents into other forms of energy.

The generation of electricity by utilising wind energy is carried out at wind turbines. The use of permanent magnet synchronous generators in such plants allows for high reliability and efficiency, which in turn makes them more durable and economically viable.

Thus, wind energy contributes to the diversification of the energy system, while providing an environmentally friendly and cost-effective source of energy to meet the needs of mankind.

Aim of research

To study the operating modes at low and normal wind speeds of a wind turbine model based on two synchronous generators with permanent magnets in the Matlab (Simscape) software package.

Research methods

Modeling of operating modes at low and normal wind speeds of a wind turbine based on two synchronous generators with permanent magnets in the Matlab (Simscape) software package.

Results

The low and normal wind speed operation modes of a wind turbine based on two permanent magnet synchronous generators were investigated using the Matlab (Simscape) software package. This voltage regulation method can provide the ability to stabilize the voltage and maintain high efficiency at an acceptable level over a wider range of low and normal wind speeds.

Keywords

energy, electricity, energy efficiency, renewable energy, wind, wind energy, wind power plant, wind power system, permanent magnet synchronous generator, winding

For citation: Sattarov R. R., Makhyanov A. V., Miniakhmetova S. O. Komp'yuternoye modelirovaniye vetroustanovki na osnove dvukh sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami [Computer Simulation of a Wind Turbine Based on Two Synchronous Generators with Permanent Magnets]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 28-37 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-28-37>.

Введение

В эпоху глобального изменения климата и активного спроса на использование исчерпаемых природных ресурсов (природный газ, нефть, уголь, торф, уран и др.) особую значимость приобретает развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ), запасы которых восполняются естественным образом и являются практически неисчерпаемыми. К ним относятся энергия Солнца, энергия водного и воздушного потоков, энергия растительной биомассы, тепловая энергия недр Земли и др. [1].

Альтернативная энергетика призвана решить проблемы энерго- и ресурсосбережения. В отличие от невозобновляемых источников энергии ВИЭ доступны практически в любой географической точке, что позволяет странам, обладающим дефицитом исчерпаемых ресурсов, диверсифицировать свою экономику и защитить её от непредсказуемых колебаний цен на ископаемое топливо [2]. Кроме того, выбросы энергетической промышленности составляют 60 % от общего объема выбросов парниковых

газов, поэтому переход на использование углеродно-нейтральной энергетики является общемировой тенденцией [3].

Согласно данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии IRENA, к концу 2023 г. суммарная мощность ВИЭ-генерации достигла 3869 ГВт, что составило 30 % от общей установленной мощности мировой энергосистемы [4, 5]. За прошлый год мощность возобновляемой энергетики достигла рекордных 473 ГВт, из которых 382 ГВт пришлось на секторы, способные вырабатывать электроэнергию по более низкой стоимости в сравнении с традиционными источниками энергии [4].

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений в отрасли ВИЭ является ветроэнергетика. На рисунке 1 показана статистика совокупной мощности ветроэнергетики в мире в период с 2014 г. по 2023 г. За это время доля вырабатываемой мощности выросла в 2,8 раза [6].

Выработка электричества путем использования энергии ветра произво-

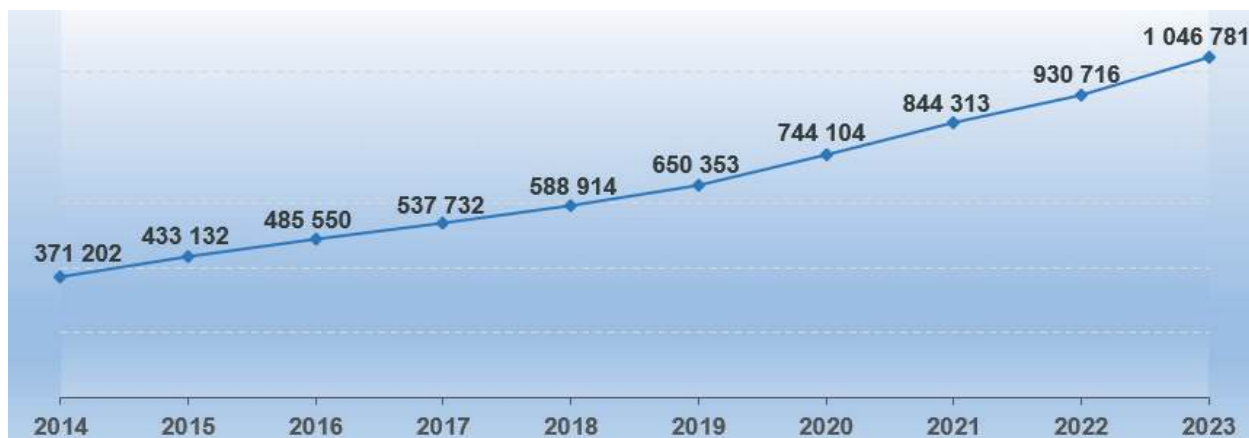


Рисунок 1. Совокупная мощность ветроэнергетики в мире [6]

Figure 1. Cumulative wind power capacity worldwide [6]

дится с помощью ветроэлектрических установок (ВЭУ), разработанных для нормальной работы при скорости ветрового потока от 3–4 до 20–25 м/с [7]. Доступность энергии ветра носит переменный характер, вследствие чего количество выработанной на ветроустановках электроэнергии колеблется, однако современные ВЭУ способны преобразовывать кинетическую энергию воздушных масс в электрическую без существенных потерь [8, 9]. Мощность ветрогенераторов варьируется от 5 до 4500 кВт, а коэффициент полезного действия лучших ветроустановок достигает 45 % [7, 10].

Экономическая эффективность ветроэнергетики определяется снижением экологических рисков и усилением энергетической безопасности, при этом главной задачей повышения рентабельности является оптимизация технологических процессов [11–13]. Несмотря на повышенные производственные и эксплуатационные затраты ВЭУ не подвергают загрязнению атмосферный воздух и способствуют сокращению расходов на энергию в долгосрочной перспективе [14]. Так, работа ветрогенератора мощностью 1 МВт за 20 лет эксплуатации экономит около 29 тыс. т угля или 92 тыс. барр. нефти, что совместно с другими элементами возобновляемой энергетики позволило сократить использование ископаемого топлива на две трети за последние 10 лет [4, 15].

В настоящее время существует много разнообразных разработок в сфере электротехники, которые с легкостью можно интегрировать в различные ВЭУ для повышения надёжности и энергоэффективности [10, 12, 13].

Во многих ВЭУ в качестве источника переменного напряжения применяют синхронные генераторы с постоянными магнитами. Такие установки характеризуются высокой надёжностью, мень-

шими потерями на трение и отсутствием необходимости в использовании внешних систем возбуждения, что делает их более эффективными и долговечными по сравнению с другими типами ВЭУ. А с применением уже двух синхронных генераторов с постоянными магнитами повышается общая мощность ветроустановки, однако следует оптимизировать управление её работы при изменяющихся погодных условиях, далее описываются соответствующие исследования.

Лабораторный стенд ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами

Рассмотрим лабораторный стенд ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами, показанный на рисунке 2, по аналогии с [16].

Лабораторный стенд содержит частотный преобразователь и асинхронный двигатель с двумя цилиндрическими концами вала исполнения IM1082, который с помощью сильфонных муфт соединен с синхронными генераторами с постоянными магнитами. В свою очередь, выводы каждого синхронного генератора выведены к выпрямителям, которые соединены с контактором, где происходит реконфигурация на параллельное или последовательное соединения в зависимости от режима работы. Далее питание идет на электрическую нагрузку.

Рассмотрим принцип действия данного стенда. При имитации нормальной скорости ветра на асинхронном двигателе с помощью частотного преобразователя ключи С1 и С2 замкнуты, а ключ С3 разомкнут так, что обмотки синхронных генераторов с постоянными магнитами оказываются подключенными параллельно, при этом выходное напряжение имеет нормальное значение, а ток равен удвоенному нормальному току

одного генератора. Выводы от контактора подключены к электрической нагрузке, с которой снимаются показания тока и напряжения. При таком режиме обеспечивается максимальная мощность данной установки при сохранении нормального значения напряжения.

При имитации минимальной пороговой пониженной скорости ветра скорость асинхронного двигателя снижается, ключи С1 и С2 размыкаются, а ключ С3 замыкается, из-за чего одноименные фазы синхронных генераторов с постоянными магнитами через выпрямители соединяются последовательно, что приводит к повышению выходного напряжения до нормального значения, ток при этом уменьшится, оказавшись равным току одного генератора. При этом мощность снижается, но является максимально возможной при данной сниженной скорости ветра.

При имитации обратного повышения скорости ветра обеспечивается обратное переключение одноименных фаз синхронных генераторов с постоянными магнитами на параллельную работу.

Таким образом, с помощью данного лабораторного стенда происходит исследе-

дование работы ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами в зависимости от скорости ветра. Во всех режимах работы сохраняется нормальный уровень напряжения, и выдается максимально возможная мощность при данной скорости ветра.

Моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами

Электрическая часть синхронной машины с постоянными магнитами описывается системой уравнений, связанных с ротором [17]:

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q,$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_d}u_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q},$$

$$T_e = 1,5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q],$$

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

R — активное сопротивление обмотки статора;

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

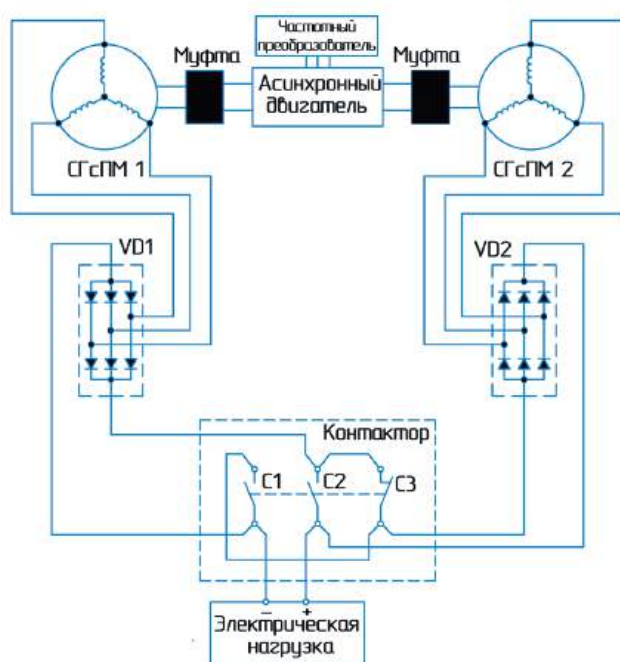


Рисунок 2. Лабораторный стенд ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами.

Figure 2. Laboratory stand of a wind turbine based on two synchronous generators with permanent magnets.

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

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 следующими уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m),$$

$$\frac{d}{dt} \theta = \omega_r,$$

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 основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами, показанной на рисунке 3 [18]. Подобные исследования были проведены в [19]. Блоки «Permanent Magnet Synchronous Machine» используются в качестве магнитоэлектрических генераторов, блоки «Universal Bridge» в качестве трехфазных выпрямителей. Частоты

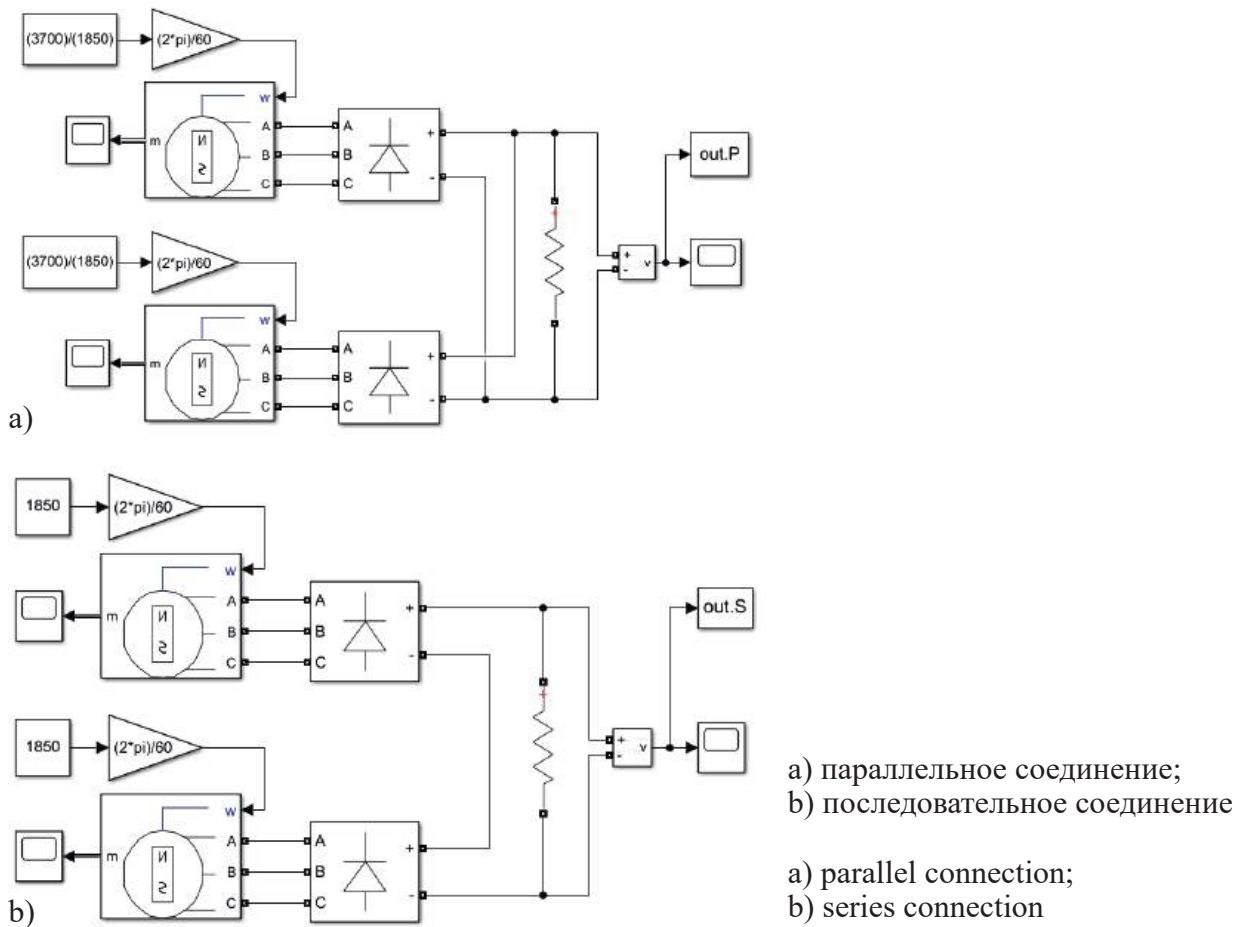


Рисунок 3. Моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами в Matlab (Simscape)

Figure 3. Modeling a wind turbine based on two synchronous generators with permanent magnets in Matlab (Simscape)

вращений (об/мин) генераторов задаются блоками «Gain» и «Constant».

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

1) ветровой поток обеспечивает вращение роторов магнитоэлектрических генераторов со скоростью 3700 об/мин, выпрямители при этом соединены параллельно;

2) ветровой поток обеспечивает вращение роторов магнитоэлектрических генераторов с пониженной скоростью 1850 об/мин, выпрямители при этом соединены параллельно.

Во втором режиме работы имитируется пониженная скорость ветрового потока, обеспечивающая вращение роторов генераторов со скоростью 1850 об/мин, выпрямители при данном

опыте соединены последовательно. 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 блоков выпрямителей позволяет суммировать напряжение магнитоэлектрических генераторов и получить среднее постоянное напряжение, близкое к номинальному.

Если в схему моделирования добавить сглаживающий конденсатор емкостью 1 мФ, то можно избавиться от пульсаций, получить наиболее выпрямленные характеристики напряжений при различных соединениях выпрямителей, показанные на рисунке 5.

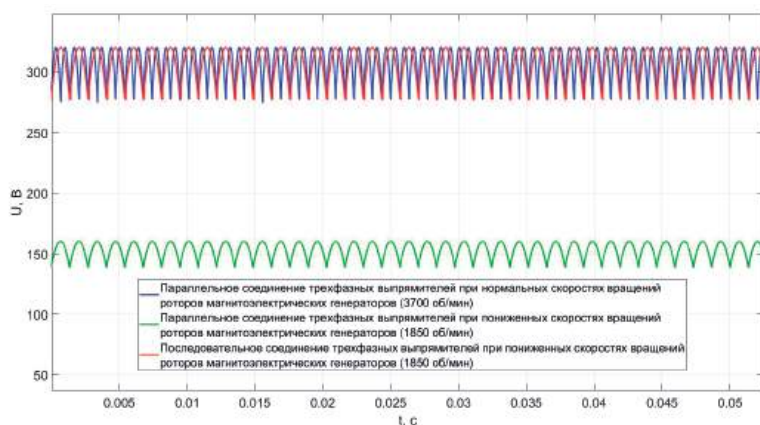


Рисунок 4. Напряжения нагрузки при параллельном и последовательном включении выпрямителей для нормальной и пониженной скорости ветра

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

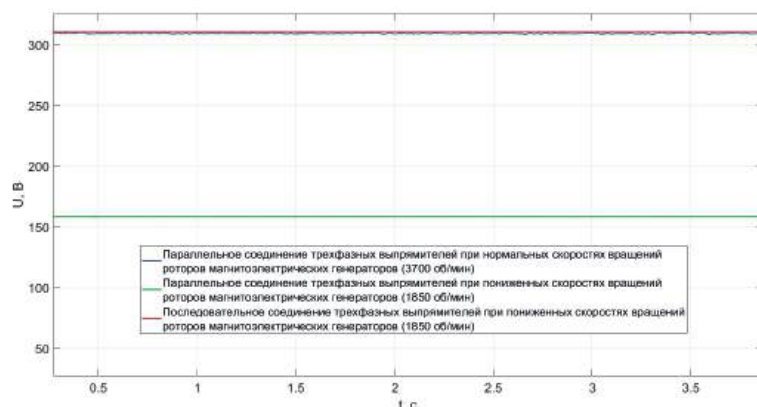


Рисунок 5. Напряжения нагрузки при параллельном и последовательном включении выпрямителей при использовании сглаживающего конденсатора

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

Выводы

Проведено исследование режимов работы при низких и нормальных скоростях ветра ветроустановки на основе

двух синхронных генераторов с постоянными магнитами 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 требу-

ются дальнейшие исследования подобной модели, в которых будут проанализированы условия работы АС-DC-АС инверторов, обмоток генераторов и нейтралей энергосистемы.

Список источников

1. Yuldashev Yu.G., Hudoyberdiev H.T., Mamarasulov A.S. Traditional and Non-Traditional Sources of Energy // *Asian Journal of Multidimensional Research*. 2022. Vol. 11, No. 3. P. 87-91. DOI: 10.5958/2278-4853.2022.00047.7.

2. Организация Объединенных Наций. Возобновляемая энергия — обеспечение более безопасного будущего. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/raising-ambition/renewable-energy> (дата обращения: 27.09.2024).

3. Пути перехода к устойчивой энергетике. Ускорение энергетического перехода в регионе ЕЭК ООН. Серия публикаций ЕЭК ООН по энергетике № 67. Женева, 2020. ISBN: 97892-10046572. DOI: <https://doi.org/10.18356/cc2016ea-ru>.

4. Ember Climate. Global Electricity Review. 2024. URL: <https://ember-climate.org/app/uploads/2024/05/Report-Global-Electricity-Review-2024.pdf> (дата обращения: 27.09.2024).

5. IRENA. Renewable Capacity Statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf (дата обращения: 27.09.2024).

6. WWEA Annual Report 2023: Record Year for Windpower. URL: <https://wwindea.org/Annual-Report2023> (дата обращения: 27.09.2024).

7. Юдаев И.В., Даус Ю.В., Гамага В.В. Возобновляемые источники энергии. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург, Лань, 2022. 328 с. ISBN: 978-5-507-48778-3.

8. Черников В.А., Прибылова Н.В., Черникова В.В. Перспективы применения ветроэнергетических установок // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: матер. национальн. научн.-практич. конф., Воронеж, 01 октября 2021 года. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. С. 274-280. EDN: COIJEV.

9. Katsarava M., Gaschler R. Fluctuations in the Wind Energy Supply Do Not Impair Acceptance of Wind Farms. *Sustainable Energy Res.* 2023. 10, 1. <https://doi.org/10.1186/s40807-022-00071-8>.

10. Пирматов Н.Б., Муминов М.У. Разработка нетрадиционной системы возбуждения автоном-

ных синхронных машин // *Universum: технические науки*. 2020. № 4-2 (73). С. 85-88. EDN: PWGKIL.

11. Двас Г.В., Цыплакова Е.Г., Никифоров Р.Р. Ветроэнергетика как фактор устойчивости региональных экономических систем // *Общество: политика, экономика, право*. 2023. № 6 (119). С. 87-93. <https://doi.org/10.24158/per.2023.6.12>.

12. Мошкин М., Путилов А. Оценка эффективности ветроэнергетики при проектировании с использованием алгоритмического моделирования // *Энергетическая политика*. 2023. № 12 (191). С. 80-91. DOI: 10.46920/2409-5516_12191_80/ EDN: CSXDCM.

13. Лапшин Ю. Перспективы развития безбашенной ветроэнергетики // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2022. № 95. С. 78-82. DOI: 10.5281/zenodo.7259015. EDN: YBYDYN.

14. Олейник Е.А., Ризаев А.О. Анализ эффективности использования ветряных установок как инновационного решения для острова Русский // Проблемы и перспективы устойчивого развития промышленности в XXI веке: от теории к практике: материалы студенческой конференции, Санкт-Петербург, 22 апреля 2021 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. С. 82-85. EDN: EJXKIZ.

15. Салопихин Д.А., Омельченко Д.П., Чебанов К.А. Перспективы развития ветроэнергетики в России // *Neftegaz.RU*. 2016. № 11-12 (59-60). С. 50-54. EDN: XVHSYL.

16. Пат. 227868 Российская Федерация, МПК H 02 P 9/10, F 03 D 9/30. Аэростатно-ветроэнергетическое устройство / Р.Р. Саттаров, А.В. Махиянов, И.И. Балгазин. № 2024104806, Заявлено 26.02.2024; Опубл. 07.08.2024. Бюл. 22.

17. Терешкин В.М. Обобщенное представление фазного напряжения многофазного преобразователя // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2019. № 1. С. 11-14. EDN: YZOTTF.

18. Sattarov R., Makhianov A. Twin-Generator Reconfigurable Set for Wind Power Plant // 2023 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research &

Practice (PEAMI), Magnitogorsk, 2023, pp. 150-154. DOI: 10.1109/PEAMI58441.2023.10299912.

19. 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.

References

1. Yuldashev Yu.G., Hudoyberdiev H.T., Mamarasulov A.S. Traditional and Non-Traditional Sources of Energ. *Asian Journal of Multidimensional Research*, 2022, Vol. 11, No. 3, pp. 87-91. DOI: 10.5958/2278-4853.2022.00047.7. [in Russian].

2. *Organizatsiya Ob"edinennykh Natsii. Vozobnovlyаемая энергия — обещание более безопасного будущего* [United Nations. Renewable Energy — Ensuring a Safer Future]. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/raising-ambition/renewable-energy> (accessed 27.09.2024). [in Russian].

3. *Puti perekhoda k ustoichivoi energetike. Uskorenie energeticheskogo perekhoda v regione EEK OON. Seriya publikatsii EEK OON po energetike № 67* [Pathways to Sustainable Energy. Accelerating the Energy Transition in the UNECE Region. UNECE Energy Series No. 67]. Zheneva, 2020. ISBN: 9789210046572. DOI: <https://doi.org/10.18356/cc2016ea-ru>. [in Russian].

4. *Ember Climate. Global Electricity Review*. 2024. URL: <https://ember-climate.org/app/uploads/2024/05/Report-Global-Electricity-Review-2024.pdf> (accessed 27.09.2024).

5. *IRENA. Renewable Capacity Statistics 2024*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf (accessed 27.09.2024).

6. *WWEA Annual Report 2023: Record Year for Windpower*. URL: <https://wwindea.org/Annual-Report2023> (accessed 27.09.2024).

7. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Gamaga V.V. *Vozobnovlyаемые источники энергии* [Renewable Energy Sources]. 3-e izd., ster. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2022. 328 p. ISBN: 978-5-507-48778-3. [in Russian].

8. Chernikov V.A., Pribylova N.V., Chernikova V.V. Perspektivy primeneniya vetroenergeticheskikh ustanovok [Prospects for the Use of Wind Power Turbines]. *Materialy natsional'noi nauchno-prakti-cheskoi konferentsii «Problemy resursoobes-pechennosti i perspektivy razvitiya*

agropromysh-lennogo kompleksa», Voronezh, 01 oktyabrya 2021 goda [Proceedings of the National Scientific and Practical Conference «Problems of Resource Availability and Prospects for the Development of the Agro-Industrial Complex», Voronezh, October 01, 2021]. Voronezh, Voronezhskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet im. Imperatora Petra I, 2021, pp. 274-280. EDN: COIJEV. [in Russian].

9. Katsarava M., Gaschler R. Fluctuations in the Wind Energy Supply Do Not Impair Acceptance of Wind Farms. *Sustainable Energy Res.*, 2023, 10, 1. <https://doi.org/10.1186/s40807-022-00071-8>.

10. Pirmatov N.B., Muminov M.U. Razrabotka netraditsionnoi sistemy возбуждения автономных синхронных машин [The Development of a Non-Traditional Excitation System of Autonomous Synchronous Machines]. *Universum: tekhnicheskie nauki — Universum: Technical Sciences*, 2020, No. 4-2 (73), pp. 85-88. EDN: PWGKIL. [in Russian].

11. Dvas G.V., Tsyplakova E.G., Nikiforov R.R. Vetroenergetika kak faktor ustoichivosti regional'nykh ekonomicheskikh sistem [Wind Energy as a Factor in the Sustainability of Regional Economic Systems]. *Obshchestvo: politika, ekonomika, pravo — Society: Politics, Economics, Law*, 2023, No. 6 (119), pp. 87-93. <https://doi.org/10.24158/pep.2023.6.12>. [in Russian].

12. Moshkin M., Putilov A. Otsenka effektivnosti vetroenergetiki pri proektirovanii s ispol'zovaniem algoritmicheskogo modelirovaniya [Evaluation of the Efficiency Wind Energy in the Design of the Plant Using Algorithmic Modeling]. *Energeticheskaya politika — Energy Policy*, 2023, No. 12 (191), pp. 80-91. DOI: 10.46920/2409-5516_12191_80/ EDN: CSXDCM. [in Russian].

13. Lapshin Yu. Perspektivy razvitiya bezbashennoi vetroenergetiki [Prospects for the Development of Towerless Wind Power]. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2022, No. 95, pp. 78-82. DOI: 10.5281/zenodo.7259015. EDN: YBYDYH. [in Russian].

14. Oleinik E.A., Rizaev A.O. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya vetryanykh ustanovok kak innovatsionnogo resheniya dlya ostrova Russkii [Analysis of the Efficiency of Using Wind Turbines as an Innovative Solution for Russky Island]. *Materialy studencheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy ustoichivogo razvitiya promyshlennosti v XXI veke: ot teorii k praktike»*, Sankt-Peterburg, 22 aprelya 2021 goda [Materials of the Student Conference «Problems and Prospects of Sustainable Industrial Development in the 21st Century: from Theory to Practice», St. Petersburg, April 22, 2021]. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarst-

vennyi lesotekhnicheskii universitet imeni S.M. Kirova, 2021, pp. 82-85. EDN: EJXKIZ. [in Russian].

15. Salopikhin D.A., Omel'chenko D.P., Chebanov K.A. Perspektivy razvitiya vetroenergetiki v Rossii [Prospects for the Development of Wind Energy in Russia]. *Neftegaz.RU — Neftegaz.RU*, 2016, No. 11-12 (59-60), pp. 50-54. EDN: XVHSYL. [in Russian].

16. Sattarov R.R., Makhiyanov A.V., Balgazin I.I. *Aerostatno-vetroenergeticheskoe ustroystvo* [Aerostat-Wind Power Device]. Patent RF, No. 227868, 2024. [in Russian].

17. Tereshkin V.M. Obobshchennoe predstavlenie faznogo napryazheniya mnogofaznogo preobrazovatelya [Generalized Presence of Phase Voltage of a Multiphase Transmitter]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta — Electronics and Electrical Equipment of Transport*, 2019, No. 1, pp. 11-14. EDN: YZOTTF. [in Russian].

18. Sattarov R., Makhiyanov A. Twin-Generator Reconfigurable Set for Wind Power Plant. 2023 *Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 150-154. DOI: 10.1109/PEAMI-58441.2023.10299912.

19. Sattarov R.R., Makhiyanov A.V. Uproshchennaya komp'yuternaya model' vetroenergeticheskoi sistemy na osnove dvukh magnitoelektricheskikh generatorov s rekonfiguriruemymi obmotkami [Development and Research of Wind Power Devices 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].

Статья поступила в редакцию 18.09.2024; одобрена после рецензирования 27.09.2024; принята к публикации 01.10.2024.

The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 27.09.2024; accepted for publication 01.10.2024.

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-38-46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ ПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Ирек Альбертович Макулов

Irek A. Makulov

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



Петр Игоревич Васильев

Petr I. Vasiliev

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



Регина Тагировна Хазиева

Regina T. Khazieva

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

Актуальность

На сегодняшний день к предприятиям предъявляются высокие требования в области качества и экономичности получаемой продукции, промышленной и экологической безопасности эксплуатируемых установок. Проблемы эксплуатации существующих установок нагрева водонефтяной эмульсии возникают из-за невозможности плавного регулирования температуры горения пламени и низкого уровня автоматизации процесса. Из-за этого в установках нагрева нефти существует вероятность ее коксования на стенках трубопровода в результате перегрева. Применение индукционных нагревательных систем, которые характеризуются высокой промышленной и пожарной безопасностью, в составе установок подготовки нефти позволяет автоматизировать процесс нагрева и исключить аварийные ситуации на промысле. Авторами создан экспериментальный стенд, предложена математическая модель процесса индукционного нагрева, которая позволяет использовать ее в процессе расчета и мониторинга состояния трубопровода, что в свою очередь позволяет избежать вероятности коксования нефти на стенках и дальнейших вышеуказанных проблем.

Ключевые слова

индукционная
нагревательная установка,
установки нагрева
водонефтяной эмульсии,
термозависимая
жидкость, частота тока

Цель исследования

Исследовать представленную математическую модель нагрева трубопровода и сравнить результаты моделирования с экспериментальной установкой.

Методы исследования

В данном исследовании использованы следующие методы: математическое моделирование нагрева труб, теория индукционного нагрева, компьютерное моделирование тепловых полей с использованием пакета Matlab.

Результаты

Создана экспериментальная установка, разработана математическая модель индукционного нагрева трубопровода, которую можно применять при проектировании и расчете установок индукционного нагрева, а также при автоматизации процесса нагрева. Произведено сравнение результатов, полученных с помощью математической модели и экспериментальной установки, которые доказали адекватность представленной модели.

Для цитирования: Макулов И. А., Васильев П. И., Хазиева Р. Т. Моделирование процесса индукционного нагрева трубопровода для промышленного оборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 38-46. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-38-46>.

Original article

MODELING OF THE INDUCTION HEATING PROCESS OF A PIPELINE FOR INDUSTRIAL EQUIPMENT

Relevance

Today, enterprises are subject to high demands in the field of quality and economy of the products obtained, industrial and environmental safety of the operated installations. Problems with the operation of existing installations for heating water-oil emulsion arise due to the impossibility of smooth regulation of the flame combustion temperature and low automation of the process, and therefore in oil heating installations there is a risk of its coking on the walls of the pipeline as a result of overheating. The use of induction heating systems, which are characterized by high industrial and fire safety, as part of oil preparation installations allows automating the heating process and eliminating emergency situations in the field. The authors proposed a mathematical model of the induction heating process, which allows it to be used in the process of calculating and monitoring the state of the pipeline, which in turn allows avoiding the likelihood of oil coking on the walls and further above-mentioned problems.

Aim of research

To study the presented mathematical model of pipeline heating and compare the simulation results with the experimental setup.

Research methods

The following methods were used in this study: study of scientific literature, methods of mathematical modeling and experiment.

Results

A mathematical model of induction heating of a pipeline has been developed, which can be used in the design and calculation of induction heating installations, as well as in the automation of the heating process. The results of the comparison of the mathematical model and the experimental setup proved the adequacy of the presented model.

Keywords

induction heating unit,
water-oil emulsion
heating units,
temperature-dependent
liquid, current frequency

For citation: Makulov I. A., Vasiliev P. I., Khazieva R. T. Modelirovaniye protsessa induktsionnogo nagreva truboprovoda dlya promyslovogo oborudovaniya [Modeling of the Induction Heating Process of a Pipeline for Industrial Equipment]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 38–46 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-38-46>.

Нагрев нефти, добываемой из скважин, является неотъемлемой частью всей цепочки процессов промышленной подготовки. На сегодняшний день значительно возросло количество низкодебитных месторождений с высоковязкой и обводненной нефтью. Как правило, на таких месторождениях используются установки подготовки нефти малой мощности (УПН-250, 500), включающие в себя печи прямого нагрева, которые выделяют тепло за счет сжигания в топочном пространстве попутного нефтяного газа. Промысловая подготовка и транспортировка нефти невозможна без нагревательных установок. Технологические установки нагрева размещают на устьях скважин для дальнейшей транспортировки продукции, а также непосредственно на сборном пункте перед замерными установками и установками обезвоживания нефти. Существующие системы нагрева водонефтяных эмульсий имеют высокую тепловую инерционность. Нагрев водонефтяной эмульсии перед процессом обезвоживания необходим для снижения вязкости и плотности нефтяной фазы, а также ослабления бронирующих оболочек вокруг глобул воды. Для ускорения процесса обезвоживания в эмульсию также вводят деэмульгаторы. При небольшом перегреве, порядка 3–5 °С, эмульгированная нефть с добавленным в нее деэмульгатором образует неразрушимую стойкую эмульсию, которую в дальнейшем очень тяжело разделить, а также при незначительных перегревах из эмульсии выделяется большое количество легких углеводородов, что является

большим убытком для нефтедобывающих предприятий [1–5].

Эксплуатация трубчатых печей зачастую сопровождается следующими дефектами:

- хрупкое разрушение труб;
- местные деформации труб с образованием отдулин вследствие локальных перегревов;
- наружное обгорание труб (высокотемпературная коррозия) (рисунок 1);
- образование сквозных свищей и прогаров в трубах (рисунок 2);
- наружная коррозия труб змеевика и дымовых труб печи продуктами сгорания топлива (низкотемпературная коррозия) [2].

Большинство этих дефектов возникает из-за локальных перегревов и невозможности плавного регулирования температуры горения пламени и низкого уровня автоматизации процесса, и поэтому в процессе нагрева нефти суще-



Рисунок 1. Высокотемпературная коррозия печных труб

Figure 1. High-temperature corrosion of stove pipes



Рисунок 2. Прогар трубы змеевика

Figure 2. Burnout of the coil pipe

ствует вероятность ее коксования на стенках трубопровода при превышении температуры греющей поверхности, что в дальнейшем сказывается на теплопередаче от стенки трубопровода к нагреваемому продукту, и в этом месте образуется прогар.

Одним из перспективных и наиболее эффективных способов подогрева нефти является применение электротехнических систем на основе индукционного нагрева, которые характеризуются высокой промышленной и пожарной безопасностью, экологичностью и высокой управляемостью процессом нагрева, а также высоким КПД теплопередачи [6–10].

Для того, чтобы избежать вероятности коксования нефти на стенках и дальнейших вышеуказанных проблем, было проведено моделирование индукционного нагрева трубопровода, а также произведены испытания на экспериментальном образце. Данные испытаний и результаты моделирования подверглись сравнению. Модель показала свою адекватность, что позволяет использовать ее в процессе расчета и мониторинга состояния трубопровода [11–13].

В качестве испытательной модели была взята труба из стали 20. Испытания производились без заполнения трубы



Рисунок 3. Экспериментальный стенд для испытания индукционного нагрева

Figure 3. Experimental setup for testing induction heating

жидкой средой. На трубу был намотан индуктор из медного силового кабеля марки РКГМ. Экспериментальный стенд показан на рисунке 3. Параметры модели приведены в таблице 1.

На обмотку индуктора в течение 5 мин подавался переменный ток частотой 35 кГц. Через каждые 30 с при помощи тепловизора серии BALTECH

Таблица 1. Исходные данные к моделированию**Table 1.** Initial data for modeling

Наименование	Значение
Длина трубы, м	1,1
Толщина стенки трубы, мм	4,5
Диаметр трубы, мм	110
Начальная температура трубы, °C	24
Теплопроводность трубы, Вт/(м·°C)	51
Теплоемкость трубы, Дж/(кг·°C)	486
Плотность материала трубы, кг/м³	7859
Магнитная проницаемость материала трубы, о.е.	100
Число витков индуктора, шт.	71
Частота тока, кГц	35
Напряжение, В	220
Сечение кабеля, мм²	16
Длина кабеля, м	25
Подводимая мощность, кВт	1,7
Ток в обмотке индуктора, А	8,5

TR-01400 замерялась температура поверхности труб. Для точности эксперимент был проведен три раза. Полученные результаты занесены в таблицу 2, где T_1 , T_2 и T_3 — соответственно температуры поверхности в первом, втором и третьем экспериментах; $T_{\text{ср.}}$ — среднее арифметическое значение этих трех величин; t — время, через которое снимались показания температуры.

В соответствии с полученными данными строится график зависимости средней температуры поверхности

трубы от времени (рисунок 4). Из графика видно, что нагрев осуществлялся линейно на всей области.

Методика математического моделирования нагрева труб приведена в [10–14]. Руководствуясь этой методикой, произведем расчет температур.

Во-первых, определяем глубину активного слоя по формуле:

$$\Delta = 503 \cdot \sqrt{\rho/(\mu \cdot f)};$$

$$\Delta = 503 \cdot \sqrt{7859/(100 \cdot 35000)};$$

$$\Delta = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

где ρ — плотность материала трубы;

Таблица 2. Результаты испытаний**Table 2.** Test results

t , с	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Температура в первом эксперименте T_1 , °C	25	34	40	50	55	61	66	72	78	83	88
Температура во втором эксперименте T_2 , °C	25	34	39	45	53	59	65	70	76	81	87
Температура в третьем эксперименте T_3 , °C	25	32	39	45	49	56	62	67	72	78	83
Среднее значение температуры $T_{\text{ср.}}$, °C	25	33,3	39,3	46,7	52,3	58,7	64,3	69,7	75,3	82	86

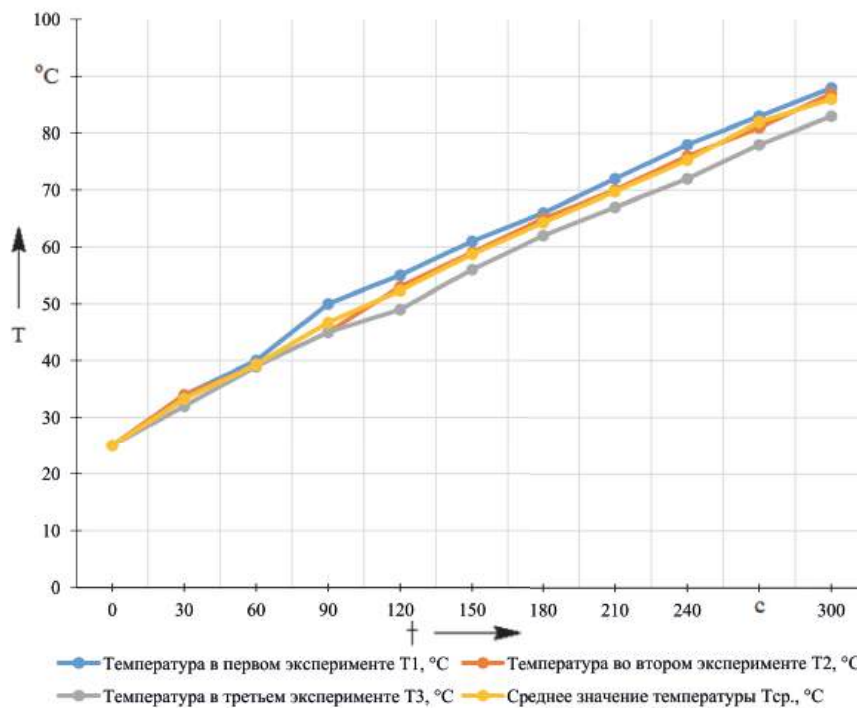


Рисунок 4. Зависимость температуры поверхности трубы от времени

Figure 4. Dependence of pipe surface temperature on time

μ — магнитная проницаемость материала трубы;

f — частота тока.

Зависимость температуры от времени следующая:

$$T(t) = 239 \cdot P_0 \cdot R / \lambda \cdot (\tau + S(\alpha, \beta, \tau)), \quad (2)$$

где $\tau = (\lambda \cdot t) / (c \cdot \rho \cdot R^2)$ — критерий Фурье;

$\alpha = \Delta / R$ — относительная глубина активного слоя;

$\beta = x / R$ — относительная координата рассматриваемой точки, в рассматриваемом случае x принимаем равным R ;

P_0 — удельная мощность;

R — внешний радиус трубы.

В формуле (2) функция $S(\alpha, \beta, \tau)$ выглядит следующим образом:

$$S(\alpha, \beta, \tau) = 2 / (\pi^3 \cdot \alpha) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (\cos(n \cdot \pi \cdot \beta) \times \sin(n \cdot \pi \cdot \alpha) \cdot (1 - e^{-n^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau}) / n^3).$$

Моделирование производилось при помощи системы компьютерной математики Mathcad.

По формуле (2) строится зависимость температуры поверхности трубы от вре-

мени, и определяются температуры поверхности в контрольных моментах времени (рисунок 5).

Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования

Для сравнения результатов моделирования с результатами эксперимента строится график зависимостей температуры от времени (рисунок 6). На рисунке 6 цифрой 1 обозначена кривая зависимости, полученная по математической модели, цифрой 2 обозначена кривая, полученная экспериментально, цифрой 3 обозначена кривая ошибки. Погрешность составила не более 17 %. Она объясняется тем, что в математической модели не производился учет теплопотерь в окружающую среду.

Таким образом, полученная модель доказывает свою адекватность. Ее можно применять при проектировании и расчете установок индукционного нагрева,

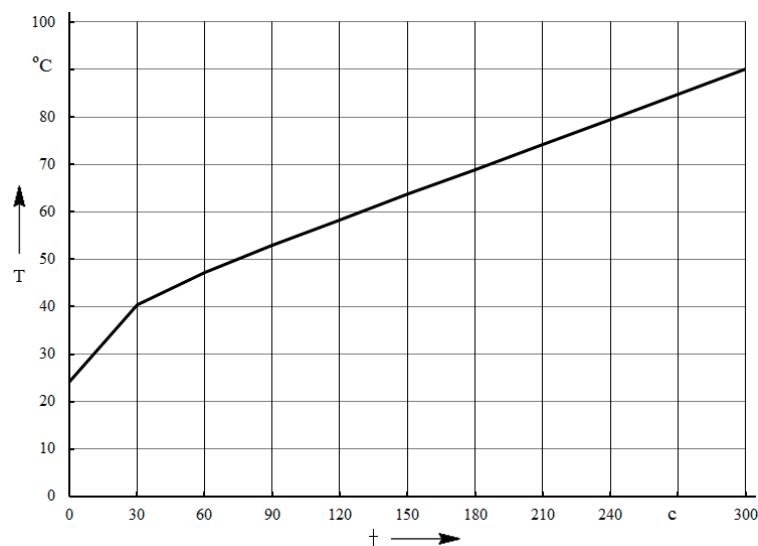


Рисунок 5. Математическая зависимость температуры от времени

Figure 5. Mathematical dependence of temperature on time

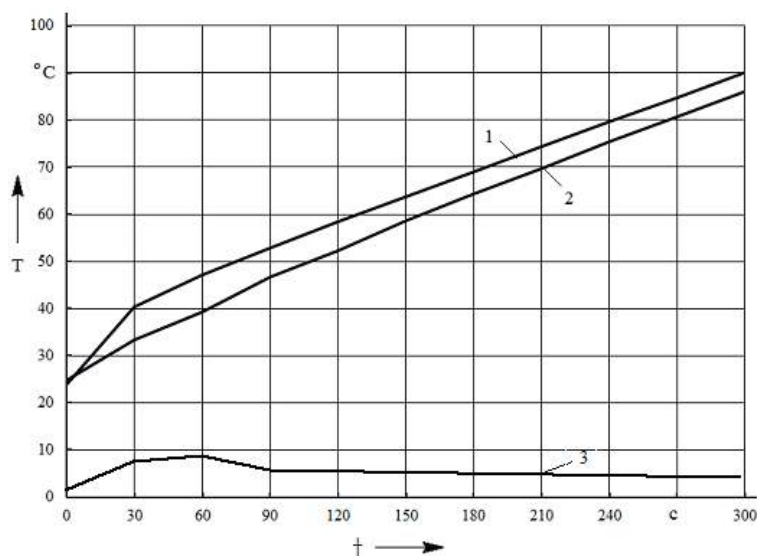


Рисунок 6. Зависимости температуры трубы от времени нагрева

Figure 6. Dependence of pipe temperature on heating time

а также при автоматизации процесса нагрева.

Выводы

Процесс нагрева высоковязких нефтей с использованием трубчатых печей является взрывопожароопасным. Наиболее перспективно использовать установки индукционного нагрева, которые позволяют снизить вероятность пожаров и взрывов на производстве ввиду отсутствия источника открытого горения.

Создан экспериментальный стенд для исследования процесса индукционного нагрева трубопровода.

Построена математическая модель процесса нагрева стальной трубы для исключения процессов коксования участков теплообменного устройства.

Испытания показали, что ошибка моделирования не превышает 17 % и объясняется тем, что в математической модели не производился учет теплопотерь в окружающую среду.

Список источников

1. Белоусов А.С. Необходимость определения оптимальной температуры подготовки высоковязкой нефти в условиях Крайнего Севера // Вестник науки. 2024. № 1. С. 1940-1943.
2. Баязитов М.И., Рубцов А.В., Ковшова Ю.С., Тляшева Р.Р. Технологическое оборудование: обеспечение надежности и энергоэффективности трубчатых печей на всех этапах жизненного цикла. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2023.
3. Багаутдинова Р.Р., Фролов Ю.А. Повышение эффективности сгорания природного газа в путевых подогревателях газа // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2024. № 1-2. С. 5-10. DOI: 10.24412/0131-4270-2024-1-2-5-10. EDN: ZHJZDQ.
4. Макулов И.А., Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Высокотехнологичные системы индукционного нагрева на ДНС // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2009. Т. 2. С. 21-25. EDN: TLDNKG.
5. Макулов И.А. Применение систем средне-частотного индукционного нагрева при транспортировке нефтепродукта // Нефтегазовое дело. 2008. № 2. С. 75-80. EDN: JWEXNN.
6. Макулов И.А., Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Проблемы и способы решения трубопроводного транспорта вязкой нефти // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2009. Т. 2. С. 16–20. EDN: TLDNKN.
7. Конесев С.Г. Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Всерос. науч.-техн. конф. (С МЕЖДУНАР. УЧАСТИЕМ), Уфа, 08–09 апреля 2011 года. Уфа: УГНТУ, 2011, С. 212–219. EDN: TLDNMB.
8. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Оценка эффективности теплового воздействия электротермических систем // Нефтегазовое дело, 2012, Т. 10. № 3. С. 92–95. EDN: UNNKX.
9. Конесев С.Г., Макулов И.А., Хлюпин П.А. Электротехнологии как средство повышения надежности и безопасности систем трубопроводного транспорта // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: матер. науч.-практ. конф. 2007. С. 375–376.
10. Макулов И.А., Никитин Ю.А. Оборудование и особенности применения индукционного нагрева в нефтегазовой промышленности // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2014. № 3. С. 50-53. EDN: SYPBWJ.
11. Sude Hatem. Simulation and Implementation of an Induction Heating System for Heating Brittle Thin Metal Sheets by Various Excitation Current Frequencies // Electrical Engineering (Other). 2024. Vol. 16, Issue 2. P. 895-908. <https://doi.org/10.29137/umagd.1439051>.
12. Aflyatunov R.R., Khazieva R.T., Vasilyev P.I. Development and Research of an Induction Heating System for a Long Pipeline // Journal of Physics: Conference Series (XV International Scientific and Technical Conference: Applied Mechanics and Systems Dynamics, AMSD 2021). 2022. No. 15. EDN: ETISZH. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012039.
13. Bermúdez A., Gómez D., Muñiz M.C., Salgado P. Transient Numerical Simulation of a Thermo Electrical Problem in Cylindrical Induction Heating Furnaces // Advances in Computational Mathematics. 2007. P. 39–62.
14. Gholami M., Verougstraete B., Vanoudenhoven R., Baron G.V., Van Assche T., Denayer J.F.M. Induction Heating as an Alternative Electrified Heating Method for Carbon Capture Process. Chemical Engineering Journal, 2022, P. 431–436. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133380.

References

1. Belousov A.S. Neobkhodimost' opredeleniya optimal'noi temperatury podgotovki vysokovязkoi nefi v usloviyakh Krainego Severa [The Need to Determine the Optimal High-Viscosity Preparation Temperatures Oil in the Conditions of the Far North]. *Vestnik nauki — Science Bulletin*, 2024, No. 1, pp. 1940-1943. [in Russian].
2. Bayazitov M.I., Rubtsov A.V., Kovshova Yu.S., Tlyasheva R.R. *Tekhnologicheskoe oborudovanie: obespechenie nadezhnosti i energoeffektivnosti trubchatykh pechei na vsekh etapakh zhiznennogo tsikla* [Technological Equipment: Ensuring Reliability and Energy Efficiency of Tubular Furnaces at All Stages of the Life Cycle]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2023. [in Russian].
3. Bagautdinova R.R., Frolov Yu.A. Povyshenie effektivnosti sgoraniya prirodnogo gaza v putevykh podogrevatelyakh gaza [Increasing the Efficiency of Natural Gas Combustion in Track Gas Heaters]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya — Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2024, No. 1-2, pp. 5-10. DOI: 10.24412/0131-4270-2024-1-2-5-10. EDN: ZHJZDQ. [in Russian].
4. Makulov I.A., Konesev S.G., Khlyupin P.A. Vysokotekhnologichnye sistemy induktsionnogo

nagreva na DNS [High-Tech Induction Heating Systems at BNS]. *Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii»* [Collection of Scientific Papers of the II All-Russian Scientific and Technical Conference «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, UGNTU, 2009, Vol. 2, pp. 21–25. EDN: TLDNKD. [in Russian].

5. Makulov I.A. Primenenie sistem srednechasotnogo induktsionnogo nagreva pri transportirovke nefteprodukta [Application of Medium-Frequency Induction Heating Systems in Petroleum Product Transportation]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2008, No. 2, pp. 75–80. EDN: JWEXNN. [in Russian].

6. Makulov I.A., Konesev S.G., Khlyupin P.A. Problemy i sposoby resheniya truboprovodnogo transporta vyazkoi nefi [Problems and Solutions for Pipeline Transportation of Viscous Oil]. *Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii»* [Collection of Scientific Papers of the II All-Russian Scientific and Technical Conference «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, UGNTU, 2009, Vol. 2, pp. 16–20. EDN: TLDNKN. [in Russian].

7. Konesev S.G. Analiz effektivnosti primeneniya nagrevatel'nykh sistem pri perekachke vyazkikh neftei [Analysis of the efficiency of using heating systems when pumping viscous oils]. III Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya (s mezhdunarodnym uchastiem) «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii» Ufa, 08–09 aprelya 2011 goda [III All-Russian Scientific and Technical Conference (with International Participation) «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, UGNTU, 2011, p. 212–219. EDN: TLDNMB. [in Russian].

8. Konesev S.G., Khlyupin P.A. Otsenka effektivnosti teplovogo vozdeistviya elektrotermicheskikh sistem [Assessment of Efficiency of Thermal Influence of Electrothermal Systems]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2012,

Vol. 10, No. 3. pp. 92–95. EDN: UNNKKX. [in Russian].

9. Konesev S.G., Makulov I.A., Khlyupin P.A. Elektrotekhnologii kak sredstvo povysheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem truboprovodnogo transporta [Electrotechnology as a Means of Improving the Reliability and Safety of Pipeline Transport Systems]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefi, nefteproduktov i gaza»* [Materials of Scientific and Practical Conference «Problems and Methods of Ensuring the Reliability and Safety of Oil, Oil Products and Gas Transportation Systems»]. 2007, pp. 375–376. [in Russian].

10. Makulov I.A., Nikitin Yu.A. Oborudovanie i osobennosti primeneniya induktsionnogo nagreva v neftegazovoi promyshlennosti [Equipment and Application Features of Induction Heating in Oil-and-Gas Industry]. *Promyshlennyye elektrootopleniye — Industrial Electric and Resistance Heating*, 2014, No. 3, pp. 50–53. EDN: SYPBWJ. [in Russian].

11. Sude Hatem. Simulation and Implementation of an Induction Heating System for Heating Brittle Thin Metal Sheets by Various Excitation Current Frequencies. *Electrical Engineering (Other)*, 2024, Vol. 16, Issue 2. P. 895–908. <https://doi.org/10.29137/umagd.1439051>.

12. Aflyatunov R.R., Khazieva R.T., Vasilyev P.I. Development and Research of an Induction Heating System for a Long Pipeline. *Journal of Physics: Conference Series XV International Scientific and Technical Conference: Applied Mechanics and Systems Dynamics, AMSD 2021, 2022*, No. 15. EDN: ETISZH. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012039.

13. Bermúdez A., Gómez D., Muñoz M.C., Salgado P. Transient Numerical Simulation of a Thermo Electrical Problem in Cylindrical Induction Heating Furnaces. *Advances in Computational Mathematics*, 2007, pp. 39–62.

14. Gholami M., Verougstraete B., Vanoudenhoven R., Baron G.V., Van Assche T., Denayer J.F.M. Induction Heating as an Alternative Electrified Heating Method for Carbon Capture Process. *Chemical Engineering Journal*, 2022, pp. 431–436. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133380.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024; одобрена после рецензирования 27.09.2024; принята к публикации 01.10.2024.

The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 27.09.2024; accepted for publication 01.10.2024.

Научная статья

УДК 537.523.9

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-47-55

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ОЗОНА В ОЗОНАТОРЕ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ

*Денис Вилевич Максудов**Denis V. Maksudov**кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия*

Актуальность

Озон применяется во многих современных технологиях, в том числе для очистки воды, воздуха и выхлопных газов.

Вместе с тем существующие технологии получения озона являются довольно энергоемкими, что препятствует их широкому распространению.

В связи с этим представляют интерес исследования, позволяющие определить параметры питания озонатора и прочие условия, при которых образование озона происходит с максимальной эффективностью по критерию удельных затрат энергии.

Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность образования озона, является удельная мощность барьерного разряда, которая зависит как от параметров его питания (частоты, формы и амплитуды приложенного напряжения), так и от конструктивных особенностей самого озонатора.

Цель исследования

Целью данной статьи является исследование зависимости концентрации озона на выходе озонатора от мощности барьерного разряда.

Объекты исследования

Озонатор.

Методы исследования

Математическое моделирование физических процессов, применение итерационного метода достижения решения.

Результаты

Разработана математическая модель физико-химических процессов в разрядных промежутках озонатора сотовой структуры, на основе которой был создан итерационный метод, позволяющий определить пространственное распределение параметров газовой смеси с учетом их взаимного влияния.

Установлено, что при снижении исходной температуры газовой смеси максимум кривой зависимости концентрации озона от мощности барьерного разряда смещается в сторону роста мощности, а значение данного максимума увеличивается.

Ключевые слова

озонатор сотовой структуры, образование озона, газоразрядные процессы, математическое моделирование, итерационный алгоритм

Для цитирования: Максудов Д. В. Влияние мощности барьерного разряда на эффективность образования озона в озонаторе сотовой структуры // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 47-55. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-47-55>.

Original article

INFLUENCE OF BARRIER DISCHARGE POWER ON THE EFFICIENCY OF OZONE FORMATION IN A HONEYCOMB STRUCTURE OZONIZER

Relevance

Ozone is used in many modern technologies, including for water, air and exhaust gas purification.

At the same time, existing ozone production technologies are quite energy-intensive, which prevents their widespread use.

In this regard, studies are of interest that allow us to determine the ozonizer power supply parameters and other conditions under which ozone formation occurs with maximum efficiency according to the criterion of specific energy consumption.

One of the most important factors influencing the efficiency of ozone formation is the specific power of the barrier discharge, which depends both on its power supply parameters (frequency, shape and amplitude of the applied voltage) and on the design features of the ozonizer itself.

Aim of research

The purpose of this article is to study the dependence of the ozone concentration at the ozonizer output on the barrier discharge power.

Research object

Ozonizer.

Research methods

Mathematical modeling of physical processes, application of the iterative method to achieve a solution.

Results

A mathematical model of physical and chemical processes in the discharge gaps of a honeycomb ozonizer has been developed, on the basis of which an iterative method has been created that allows determining the spatial distribution of parameters of the gas mixture taking into account their mutual influence. It has been established that with a decrease in the initial temperature of the gas mixture, the maximum of the curve of the dependence of the ozone concentration on the power of the barrier discharge shifts towards an increase in power, and the value of this maximum increases.

Ключевые слова

cellular ozonizer, ozone formation, gas-discharge processes, mathematical modeling, iterative algorithm

For citation: Maksudov D. V. Vliyaniye moshchnosti bar'yernogo razryada na effektivnost' obrazovaniya ozona v ozonatore sotovoy struktury [Influence of Barrier Discharge Power on the Efficiency of Ozone Formation in a Honeycomb Structure Ozonizer]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 47–55 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-47-55>.

Введение

Высокая окислительная способность озона находит применение во многих современных технологиях, в том числе для очистки воды, воздуха и выхлопных газов. Распространение данных технологий ограничивается дороговизной озона,

что вызвано высокой энергоемкостью его получения.

В связи с этим представляют интерес исследования, связанные с решением задачи оптимизации конструкции озонатора и режима его питания по критерию

минимизации затрат энергии при получении озона.

Решение данной задачи затрудняется тем, что эффективность образования озона зависит от множества взаимозависимых параметров озонатора, барьерного разряда и проходящей через него газовой смеси.

Экспериментальные исследования показали зависимость эффективности образования озона от частоты [1, 2], амплитуды [2–4] и формы питающего напряжения. В публикации [5] исследовалась зависимость концентрации озона от давления газа и скорости его потока. В статьях [6, 7] изучалась зависимость от температуры, а в [8] — от пространственного распределения электрического поля. Влияние плотности мощности барьерного разряда было экспериментально исследовано в [9, 10].

Удельная мощность барьерного разряда зависит как от параметров питания озонатора (частоты и амплитуды приложенного напряжения), так и от его конструктивных особенностей, а кроме того, также от параметров газовой смеси, проходящей через озонатор, и, в свою очередь, оказывает на них влияние.

Таким образом, для решения задачи оптимизации работы озонатора требуется разработка многофакторной математической модели, которая учитывала бы взаимозависимость данных параметров.

Математическое моделирование

Мощность барьерного разряда зависит от напряжения пробоя в соответствии с формулой:

$$P = 2f \frac{u_v - u_g}{u_{pr} - u_g} NC_v (u_{pr}^2 - u_g^2), \quad (1)$$

где f — частота (Гц);

u_{pr} — напряжение электрического пробоя в сотовой ячейке озонатора (В);

u_g — напряжение гашения барьерного разряда (В);

u_v — напряжение между электродом и диэлектрическим барьером ячейки озонатора (В);

C_v — емкость газового промежутка ячейки (Ф);

N — число ячеек диэлектрического блока озонатора.

Напряжение пробоя, в свою очередь, зависит от температуры газовой смеси и ее химического состава согласно выражениям:

$$u_{pr} = \frac{Bp\delta}{\ln \left(\frac{Ap\delta}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right)}; \quad (2)$$

$$A = \frac{\pi \left(\sum_{i=1}^n r_i p_i \right)^2}{kT}; \quad (3)$$

$$B = A \cdot \sum_{i=1}^n E_{ni} p_i, \quad (4)$$

где p — давление газа в ячейке (Па);

γ — коэффициент вторичной электронной эмиссии;

A — константа, определяемая составом газа;

B — константа, определяемая энергией ионизации газа;

r_i — радиус молекулы i -го химического соединения в газовой смеси, проходящей через озонатор;

E_{ni} — энергия ионизации молекулы i -го химического соединения;

p_i — мольная доля i -го химического соединения в газе.

В соответствии с (3) мощность барьерного разряда зависит от температуры. При этом сама температура газовой смеси, в свою очередь, зависит от фактора удельной мощности барьерного разряда.

Кроме того, температура газовой смеси, проходящей через барьерный раз-

ряд, оказывает существенное влияние на эффективность образования озона. Данная зависимость была исследована многими учеными [11–14].

Изменение концентрации озона в кислородно-озонной газовой смеси при ее движении через зону барьерного разряда определяется формулой:

$$\frac{d[O_3]}{dt} = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V} ([O_2]_0 - [O_3]) - A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V} [O_3], \quad (5)$$

где $[O_3]$ — концентрация озона;

$[O_2]_0$ — начальная концентрация кислорода;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

E_{1a}, E_{2a} — энергии активации реакций (R1) и (R2), Дж/моль;

A_1, A_2 — факторы частоты реакций (R1) и (R2);

P — активная мощность барьерного разряда, Вт;

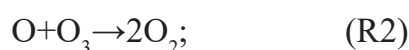
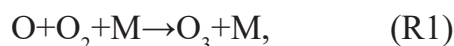
V — суммарный объем разрядных промежутков, м³.

В [11] приводится следующее кинетическое уравнение образования озона в газовой смеси с учетом реакций его образования и разложения:

$$\frac{d[O_3]}{dt} = \sum + K_{R1}[O][O_2] - K_{R3}[O][O_3], \quad (6)$$

где $[O], [O_2], [O_3]$ — соответственно концентрации атомарного кислорода, двухатомных молекул кислорода и молекул озона;

K_{R1}, K_{R2} — соответственно константы основных реакций образования (R1) и разложения (R2) озона:



Σ — скорости прочих реакций образования и разложения озона, зависимость которых от температуры принята пренебрежимо малой. Константы K_{R1}, K_{R2}

могут быть записаны в виде, предложенном Аррениусом:

$$K_{R1} = A_1 e^{\frac{E_{a1}}{RT}};$$

$$K_{R2} = A_2 e^{\frac{E_{a2}}{RT}},$$

где A — множитель, характеризующий частоту столкновения участвующих в реакции частиц;

E_a — энергия активации реакции;

R — универсальная газовая постоянная.

Экспоненциальная зависимость скорости химических реакций от температуры T обусловлена распределением Больцмана, определяющим количество молекул, кинетическая энергия которых превосходит энергию активации реакции.

Авторами [12] была получена следующая эмпирическая формула для определения концентрации озона при некой температуре T_2 :

$$[O_3] = \frac{K_0 [O_2]}{K_0 + K_1(T_1) \exp(-E_{\text{экс}}^a \Delta T / RT_1 T_2)} \times \left(1 - \exp\left[-P / Q \left\{ K_0 + K_1(T_1) \times \exp(-E_{\text{экс}}^a \Delta T / RT_1 T_2) \right\} \right] \right), \quad (7)$$

где $E_{\text{экс}}^a$ — энергия активации реакции разложения озона (R2), определенная экспериментально, $E_{\text{экс}}^a = 2300$ ккал/моль

$$T_1 = 293 \text{ K}; \Delta T = T_2 - T_1;$$

P — мощность барьерного разряда, Вт;

Q — объемная скорость газа, проходящего через барьерный разряд.

При этом константа K_0 скорости реакции (R1) в исследовании [12] считалась величиной, независимой от температуры, $K_0 = 0,08$ л/(Вт·ч).

В более поздних работах [13, 14] показано, что данная константа все же зависит от температуры.

Исследование зависимости эффективности образования озона от температуры

входящей газовой представляет интерес при оптимизации режима работы озонатора, однако для моделирования данной зависимости необходимо разработать математическую модель, которая учитывала бы пространственное распределение температуры, давления газовой смеси, концентрации озона, плотность мощности барьерного разряда и взаимосвязь этих параметров.

Зависимость концентрации озона от мощности барьерного разряда

Моделирование зависимости эффективности образования озона от температуры входящей газовой смеси производилось для конструкции озонатора, разработанной на кафедре электромеханики УУНиТ, которая включает диэлектрический блок сотовой структуры. В каналы данного блока в шахматном порядке вложены две группы электродов, между которыми имеется разность потенциалов, необходимая для возникновения барьерного разряда. В роли диэлектрических барьеров при этом выступают стенки каналов диэлектрического блока. Параметры данного озонатора приведены в таблице 1.

Как следует из уравнений (1)–(6), эффективность образования озона зави-

сит от удельной мощности барьерного разряда P/V , Вт/м³. Однако в тоже время с ростом удельной мощности растет температура газовой смеси, что приводит к изменению баланса между реакциями образования и разложения озона. При повышении температуры реакция разложения озона существенно ускоряется, и, следовательно, если удельная мощность превышает некоторое критическое значение, то дальнейший ее рост приводит к снижению концентрации озона, как это показано на рисунке 1.

Для определения зависимости эффективности образования озона от температуры входящей газовой смеси, на базе представленной математической модели был разработан итерационный процесс:

$$\begin{cases} T_{0,j} = T_c; \\ [O_3]_{0,j} = 0; \\ \Delta T_{i,j} = \frac{3600 \left[P(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) \frac{\Delta x}{L} - \frac{T_{i-1,j} - T_{i-1,j-1}}{R_{\text{обн}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j})} - \frac{T_{i-1,j} - T_c}{R_{\text{мш}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j})} \right]}{Q \rho_f C_r}; \\ \Delta [O_3]_{i,j} = K_0 \frac{P(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j})}{V} \times \\ \times \left(A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT_{i-1,j}}\right) ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j}) - \right. \\ \left. - A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT_{i-1,j}}\right) [O_3]_{i-1,j} \right) \Delta t; \\ T_{i,j} = T_{i-1,j} + \Delta T_{i,j}; \\ [O_3]_{i,j} = [O_3]_{i-1,j} + \Delta [O_3]_{i,j}, \end{cases} \quad (8)$$

Таблица 1. Параметры озонатора

Table 1. Ozonizer parameters

Параметр	Значение
Длина диэлектрического блока l , м	0,15
Высота/ширина диэлектрического блока h , м	0,07
Число каналов N	225
Толщина слоя диэлектрика D_d , м	10^{-3}
Напряжение источника питания U_0 , кВ	15
Частота тока f , Гц	200
Давление p , Па	10^5
Теплопроводность диэлектрика λ_d , Вт/(м · К)	30
Теплопроводность электрода λ_e , Вт/(м · К)	47
Объемный расход потока газа Q , м ³ /с	0,09

где $R_{эл}$ — сопротивление теплопередаче внутри электрода от i -го участка его длины к его началу;

$R_{общ}$ — сопротивление теплопередаче от газовой смеси через стенки каналов диэлектрического блока.

Кривая, показанная на рисунке 1, получена в соответствии с итерационным процессом (8) при объемном расходе потока газа $Q=0,03$ м³/с и прочих параметрах озонатора, приведенных в таблице 1.

В связи с этим, представляет интерес применение различных способов снижения температуры газовой смеси в разрядном промежутке для сохранения высокой концентрации озона в момент выхода газовой смеси из озонатора.

Одним из таких способов является предварительное охлаждение газовой смеси перед входом в каналы диэлектрического блока. В этом случае для определения распределения температуры и

концентрации озона вдоль длины канала диэлектрического блока итерационный процесс (8) должен быть изменен с учетом того, что начальная температура газовой смеси $T_{г0}$ для любого j -го слоя каналов теперь отличается от температуры окружающей среды T_c , и вследствие этого первое уравнение в (8) должно быть переписано в виде

$$T_{0,j} = T_{г0}. \quad (9)$$

На рисунке 2 показаны результаты вычисления зависимости концентрации озона на выходе из каналов диэлектрического блока от начальной температуры газовой смеси $T_{г0}$ при температуре окружающей среды $T_c = 300$ К, объемном расходе потока газа $Q=0,03$ м³/с и прочих параметрах озонатора, приведенных в таблице 1. Данные вычисления проведены согласно (8) с учетом (9).

Как видно из рисунка 2, предварительное охлаждение газовой смеси

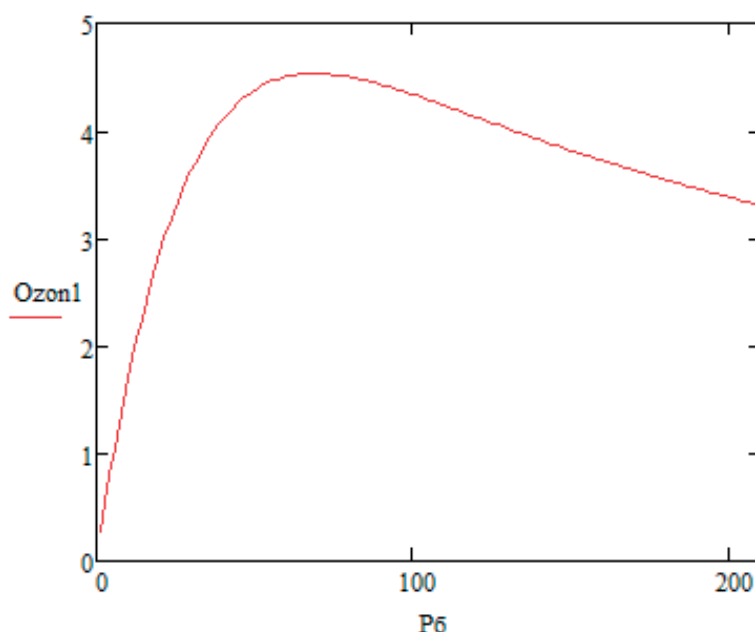


Рисунок 1. Зависимости концентрации озона (%) в газовой смеси в момент ее выхода из озонатора от мощности барьерного разряда P_6 (Вт)

Figure 1. Dependences of ozone concentration (%) in the gas mixture at the moment of its exit from the ozonizer on the barrier discharge power P_6 (W)

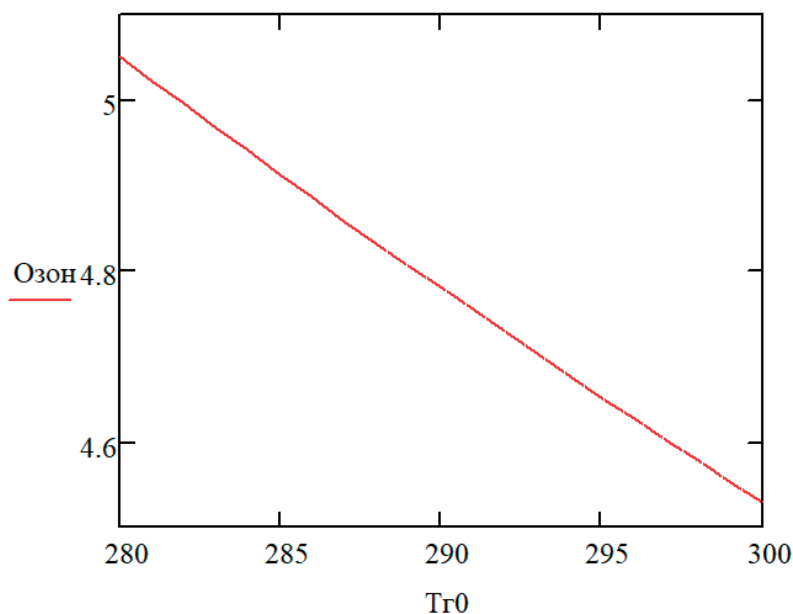


Рисунок 2. Зависимости концентрации озона (%) от начальной температуры газовой смеси T_{r0} (K)

Figure 2. Dependence of ozone concentration (%) on the initial temperature of the gas mixture T_{r0} (K)

позволяет существенно повысить концентрацию озона.

Кроме того, изменение исходной температуры газовой смеси приводит к некоторому смещению максимума кривой, показывающей зависимость концентрации озона на выходе канала диэлектрического блока от мощности барьерного

разряда так, как это показано на рисунке 3 для озонатора с параметрами, приведенными в таблице 1 при объемном расходе $Q=0,03$ м³/с и значениях T_{r0} 280 K, 290 K и 300 K.

Как видно из рисунка 3, при снижении исходной температуры газовой смеси

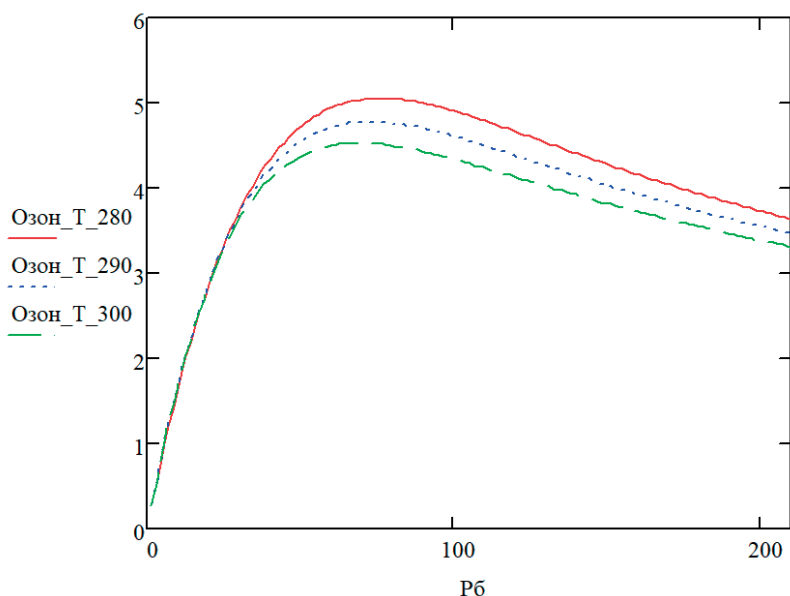


Рисунок 3. Зависимости концентрации озона (%) в газовой смеси в момент ее выхода из озонатора от мощности барьерного разряда P_6 (Вт) при различных значениях температуры газовой смеси T (K) на входе в озонатор

Figure 3. Dependences of ozone concentration (%) in the gas mixture at the moment of its exit from the ozonizer on the barrier discharge power P_6 (W) at different values of the gas mixture temperature T (K) at the entrance to the ozonizer

максимум кривой смещается вправо, а значение максимума увеличивается.

Выводы

Разработана многофакторная математическая модель физических процессов в разрядных промежутках озонатора сотовой структуры с учетом взаимного влияния этих факторов. На основе данной модели разработан итерационный метод, позволяющий определить пространственное распределение температуры, давления газовой смеси и концентрации озона в разрядных промежутках разработанного озонатора сотовой структуры с учетом взаимного влияния этих параметров.

Проведено моделирование зависимости эффективности образования озона

от фактора удельной мощности барьерного разряда в озонаторе.

Установлено, что при снижении исходной температуры газовой смеси максимум кривой зависимости концентрации озона от мощности барьерного разряда смещается в сторону роста мощности, а значение данного максимума увеличивается.

Результаты данных исследований могут быть использованы при решении задачи оптимизации параметров озонатора и режима его питания по критерию минимизации удельных энергетических затрат при образовании озона.

Список источников

1. Linsheng Wei, Qingheng Deng, Yafang Zhang. Ozone Generation Enhanced by Silica Catalyst in Oxygen-Fed Dielectric Barrier Discharge // *Vacuum*. March 2020. Vol. 173. P. 109145. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109145.
2. Ghazanchaei M., Adamiak K., Castle G.S.P. Quasi-Stationary Numerical Model of the Dielectric Barrier Discharge // *Journal of Electrostatics*. August 2014. Vol. 72, Issue 4. P. 261-269. DOI:10.1016/j.elstat.2014.04.002.
3. Damideh V., Chin O.H., Gabbar H.A., Ch'ng S.J., Tanc C.Y. Study of Ozone Concentration from CO₂ Decomposition in a Water Cooled Coaxial Dielectric Barrier Discharge // *Vacuum*. July 2020. Vol. 177. P. 109370. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109370.
4. Zhi Fang, Yuchang Qiu, Yanzhou Sun, Hui Wang, Kuffel Edmund. Experimental Study on Discharge Characteristics and Ozone Generation of Dielectric Barrier Discharge in a Cylinder–Cylinder Reactor and a Wire–Cylinder Reactor // *Journal of Electrostatics*. July 2008. Vol. 66, Issue 7–8. P. 421-426. DOI: 10.1016/j.elstat.2008.04.007.
5. Boonduang S., Limsuwan S., Kongsri W., Limsuwan P. Effect of Oxygen Pressure and Flow Rate on Electrical Characteristic and Ozone Concentration of a Cylinder-Cylinder DBD Ozone Generator // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 32. P. 936-942. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.02.035.
6. Dingkun Yuan, Guangxue Zhang, Zhongqian Ling, Angjian Wu, Yong He, Zhihua Wang. Characteristics of Temperature Distribution in Atmospheric Pulsed Surface Dielectric Barrier Discharge for Ozone Production // *Vacuum*. June 2020. Vol. 176. P. 109351. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109351.
7. Sławomir Jodzis, Klaudia Baran. The Influence of Gas Temperature on Ozone Generation and Decomposition in Ozone Generator. How Is Ozone Decomposed? // *Vacuum*. 4 October 2021. P. 110647. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110647.
8. Malik M.A., Schoenbach K.H., Heller R. Coupled Surface Dielectric Barrier Discharge Reactor-Ozone Synthesis and Nitric Oxide Conversion from Air // *Chemical Engineering Journal*. 15 November 2014. Vol. 256. P. 222-229. DOI: 10.1016/j.cej.2014.07.003.
9. Sławomir Jodzis, Marcel Zięba. Energy Efficiency of an Ozone Generation Process in Oxygen. Analysis of a Pulsed DBD System // *Vacuum*. September 2018. Vol. 155. P. 29-37. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.05.035.
10. Sławomir Jodzis, Wojciech Patkowski. Macrokinetic Study on Ozone Boundary Concentration. Effect of Temperature // *Journal of Electrostatics*. February 2017. Vol. 85. P. 43-51. DOI: 10.1016/j.elstat.2016.12.009.
11. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. 174 с. ISBN 5-211-00415-9.
12. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. Электрическая теория озонаторов. Статистические вольт-амперные характеристики озонаторов // *Журнал физической химии*. 1962. Т. 36. № 1. С. 181-188.

13. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Hampson R.F., Kerr J.A., Rossi M.J., Troe J. Evaluated Kinetic and Photochemical Data for Atmospheric Chemistry: Supplement VI. IUPAC subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1997. No. 26. P. 1329-1499. <https://doi.org/10.1063/1.556010>.

14. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Hampson R.F., Kerr J.A., Rossi M.J., Troe J. 1997 Evaluated Kinetic, Photochemical and Heterogeneous Data for Atmospheric Chemistry: Supplement V. IUPAC Subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1997. No. 26. P. 521–1011. DOI: 10.1063/1.556011.

References

1. Linsheng Wei, Qingheng Deng, Yafang Zhang. Ozone Generation Enhanced by Silica Catalyst in Oxygen-Fed Dielectric Barrier Discharge. *Vacuum*, March 2020, Vol. 173, pp. 109145. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109145.

2. Ghazanchaei M., Adamiak K., Castle G.S.P. Quasi-Stationary Numerical Model of the Dielectric Barrier Discharge. *Journal of Electrostatics*, August 2014, Vol. 72, Issue 4, pp. 261-269. DOI: 10.1016/j.elstat.2014.04.002.

3. Damideh V., Chin O.H., Gabbar H.A., Ch'ng S.J., Tanc C.Y. Study of Ozone Concentration from CO₂ Decomposition in a Water Cooled Coaxial Dielectric Barrier Discharge. *Vacuum*, July 2020, Vol. 177, pp. 109370. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109370.

4. Zhi Fang, Yuchang Qiu, Yanzhou Sun, Hui Wang, Kuffel Edmund. Experimental Study on Discharge Characteristics and Ozone Generation of Dielectric Barrier Discharge in a Cylinder–Cylinder Reactor and a Wire–Cylinder Reactor. *Journal of Electrostatics*, July 2008, Vol. 66, Issue 7–8, pp. 421-426. DOI: 10.1016/j.elstat.2008.04.007.

5. Boonduang S., Limsuwan S., Kongsri W., Limsuwan P. Effect of Oxygen Pressure and Flow Rate on Electrical Characteristic and Ozone Concentration of a Cylinder-Cylinder DBD Ozone Generator. *Procedia Engineering*, 2012, Vol. 32, pp. 936-942. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.02.035.

6. Dingkun Yuan, Guangxue Zhang, Zhongqian Ling, Angjian Wu, Yong He, Zhihua Wang. Characteristics of Temperature Distribution in Atmospheric Pulsed Surface Dielectric Barrier Discharge for Ozone Production. *Vacuum*, June

2020, Vol. 176, pp. 109351. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109351.

7. Sławomir Jodzis, Klaudia Baran. The Influence of Gas Temperature on Ozone Generation and Decomposition in Ozone Generator. How Is Ozone Decomposed? *Vacuum*, 4 October 2021, pp. 110647. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110647.

8. Malik M.A., Schoenbach K.H., Heller R. Coupled Surface Dielectric Barrier Discharge Reactor-Ozone Synthesis and Nitric Oxide Conversion from Air. *Chemical Engineering Journal*, 15 November 2014, Vol. 256, pp. 222-229. DOI: 10.1016/j.cej.2014.07.003.

9. Sławomir Jodzis, Marcel Zięba. Energy Efficiency of an Ozone Generation Process in Oxygen. Analysis of a Pulsed DBD System. *Vacuum*, September 2018, Vol. 155, pp. 29-37. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.05.035.

10. Sławomir Jodzis, Wojciech Patkowski. Macrokinetic Study on Ozone Boundary Concentration. Effect of Temperature. *Journal of Electrostatics*, February 2017, Vol. 85, pp. 43-51. DOI: 10.1016/j.elstat.2016.12.009.

11. Samoilovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. *Fizicheskaya khimiya bar'ernogo razryada* [Physical Chemistry of Barrier Discharge]. Moscow, Izd-vo MGU, 1989. 174 p. ISBN 5-211-00415-9. [in Russian].

12. Filippov Yu.V., Emel'yanov Yu.M. Elektricheskaya teoriya ozonatorov. Statisticheskie vol't-ampernye kharakteristiki ozonatorov [Electrical Theory of Ozonizers. Statistical Volt-Ampere Characteristics of Ozonizers]. *Zhurnal fizicheskoi khimii — Journal of Physical Chemistry*, 1962, Vol. 36, No. 1, pp. 181-188. [in Russian].

13. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Hampson R.F., Kerr J.A., Rossi M.J., Troe J. Evaluated Kinetic and Photochemical Data for Atmospheric Chemistry: Supplement VI. IUPAC subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1997, No. 26, pp. 1329-1499. <https://doi.org/10.1063/1.556010>.

14. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R.A., Hampson R.F., Kerr J.A., Rossi M.J., Troe J. 1997 Evaluated Kinetic, Photochemical and Heterogeneous Data for Atmospheric Chemistry: Supplement V. IUPAC Subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1997, No. 26, pp. 521–1011. DOI: 10.1063/1.556011.

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена после рецензирования 25.09.2024; принята к публикации 30.09.2024.

The article was submitted 11.09.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 30.09.2024.

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-56-66

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА

*Даниил Викторович Купцов**Daniil V. Kuptsov**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

Во многих устройствах заряда емкостных накопителей в качестве преобразователя напряжения применяется индуктивно-емкостный преобразователь (ИЕП) на дискретных электромагнитных элементах (ЭМЭ). Поскольку данный ИЕП разработан для работы при промышленных частотах, то из-за высоких массогабаритных параметров и низких энергетических показателей он не подходит для использования в портативных устройствах.

Цель исследования

Анализ существующих схем многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) и подбор компонента для замены ИЕП на дискретных ЭМЭ.

Методы исследования

Аналитический обзор существующих научных статей, математических и компьютерных моделей.

Результаты

В результате проведенного исследования был выбран односекционный МИЭК, который поможет избежать недостатков ИЕП на основе дискретных ЭМЭ.

Ключевые слова

индуктивно-емкостный преобразователь, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, дискретный электромагнитный элемент

Для цитирования: Купцов Д. В., Хазиева Р. Т. Повышение энергетической эффективности зарядных устройств путем использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 56–66. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-56-66>.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF CHARGERS BY USING A MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT

Relevance

In many devices for charging capacitive storage devices, an inductive-capacitive converter (ICC) based on discrete electromagnetic elements (EME) is used as a voltage converter. Since this ICC designed to operate at industrial frequencies, it is not suitable for use in portable devices due to high weight and size parameters and low energy values.

Aim of research

Analysis of existing circuits of a multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC) and selection of a component to replace the ICC on discrete EME.

Research methods

An analytical review of existing scientific articles, mathematical and computer models.

Results

As a result of the conducted research, a single-section MIEC was selected, which will help to avoid the disadvantages of ICC based on discrete EME

Keywords

inductive-capacitive converter, multifunctional integrated electromagnetic component, discrete electromagnetic element

For citation: Kuptsov D. V., Khazieva R. T. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti zaryadnykh ustroystv putem ispol'zovaniya 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, No. 3, Vol. 20, pp. 56-66 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-56-66>.

Введение

При транспортировке и хранении нефти на стенках труб и резервуаров образуются асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО), которые уменьшают пропускную способность трубопроводов. Это приводит к порче насосов и удорожанию процесса транспортировки. Существует много способов борьбы с АСПО, одним из наиболее эффективных является использование электрогидроимпульсной очистительной системы (ЭГОС). Принцип работы очистительной системы заключается в заряде емкостного накопителя (ЕН) и его последующий разряд на внутреннюю стенку трубопровода. При электрическом разряде в

жидкости образуется повышенное давление, которое разрушает АСПО.

Процесс заряда емкостного накопителя начинается с преобразования напряжения из сети в ток. Эту задачу в составе устройства заряда выполняет индуктивно-емкостный преобразователь (ИЕП). Существует два вида ИЕП: на дискретных и гибридных электромагнитных элементах.

ИЕП на дискретных электромагнитных элементах (ЭМЭ) наиболее распространены, но имеют меньший КПД и более громоздкие по сравнению с ИЕП на гибридных ЭМЭ, которые объединяют в себе свойства индуктивных и емкостных элементов.

Анализ схемотехнических решений индуктивно-емкостных преобразователей

Существуют 4 основных вида преобразователей на дискретных элементах. На рисунке 1 представлены схемы исполнения ИЕП на дискретных элементах. Эти схемы являются наиболее популярными, широко применяемыми для построения устройств заряда накопителей, и у каждой из них есть свои отличительные особенности. Г-образная схема является более простой с точки зрения схемотехники, но имеет более низкие коэффициенты полезного действия и мощности полезного действия и обладает низким коэффициентом мощности [1, 2].

Мостовая и Т-образная схемы лишены таких недостатков, но большее количество составных элементов негативно сказывается на габаритах устройства и его конечной массе. Сложная конструкция этих схем также может привести к перегреву и коротким замыканиям [3].

Симметричная Т-образная схема является лучшей из представленных схем, так как она собрала в себе положительные характеристики предыдущих схем.

Индуктивно-емкостные преобразователи на дискретных ЭМЭ разработаны

для работы с напряжениями на промышленных частотах. Это значит, что их масса и габариты не позволят использовать устройство электрогидроимпульсной очистки портативно.

Для решения этих проблем авторами предлагается использовать многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК) вместо дискретных ЭМЭ в составе ИЕП.

МИЭК — это гибридное устройство, которое может выполнять функции индуктивно-емкостного компонента или электромагнитного трансформатора [4]. МИЭК представляет собой две пластины, разделенные диэлектриком и свернутые в спираль. Каждая из этих секций объединена магнитной связью. МИЭК может состоять из нескольких секций, при изменении способов подключения можно устанавливать необходимые режимы работы LC-контура [5, 6].

На рисунке 2 представлена структура компонента.

МИЭК является универсальным устройством и может быть настроен на разные режимы работы. Настройка режимов происходит посредством различных вариантов подключения проводящих обкладок [7].

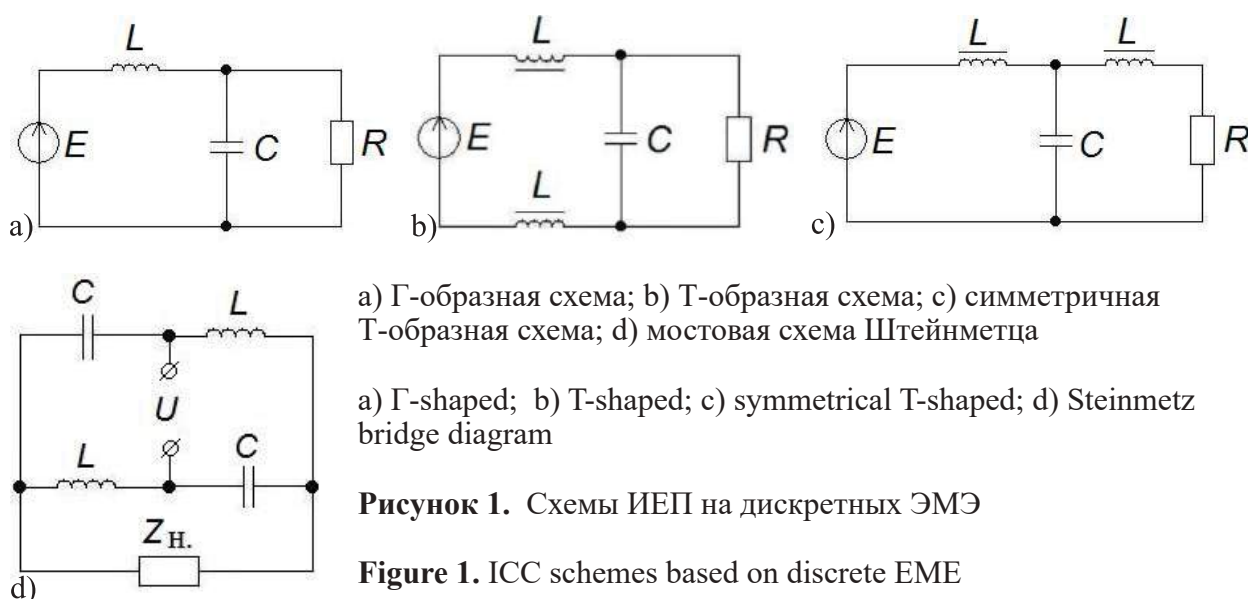
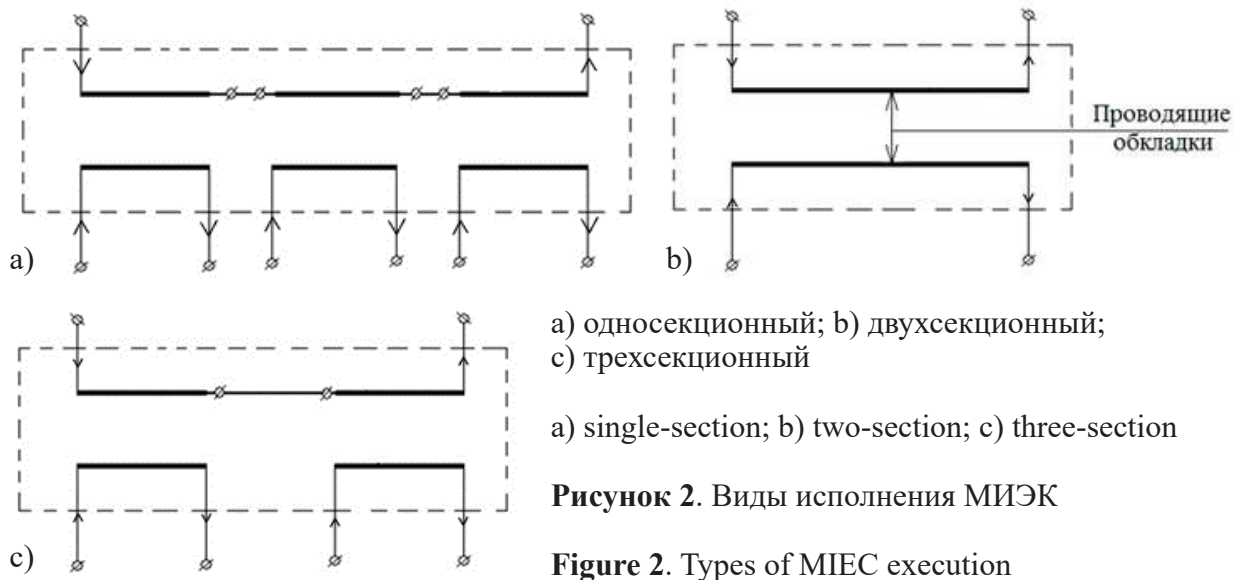


Рисунок 1. Схемы ИЕП на дискретных ЭМЭ

Figure 1. ICC schemes based on discrete EME

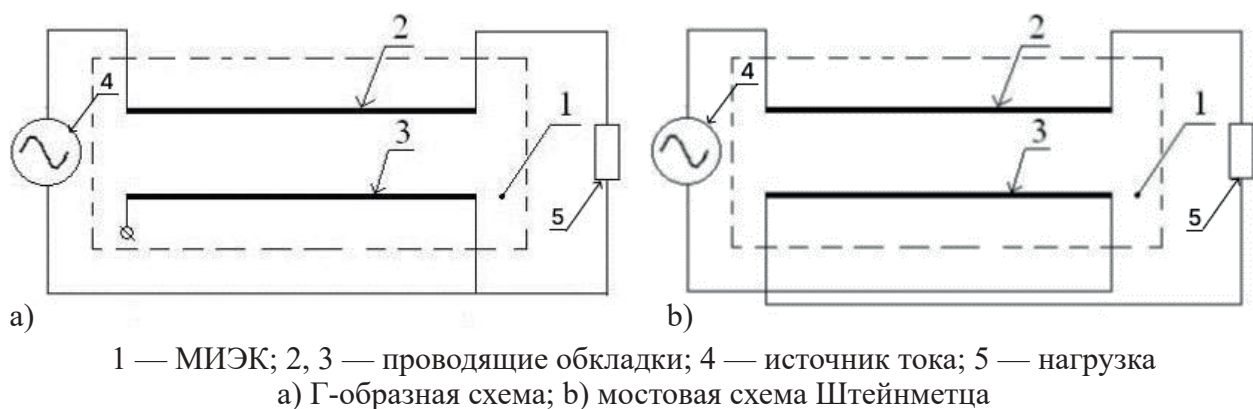


На рисунке 3, а изображена схема подключения проводящих обкладок односекционного МИЭК, которая позволит использовать МИЭК в качестве Г-образной схемы Бушера. На рисунке 3, б изображена схема подключения обкладок для работы МИЭК в режиме мостовой схемы Штейнметца.

Объединив два односекционных МИЭК, можно получить двухсекционный компонент. Он позволяет получить намного большее количество вариантов схем исполнения МИЭК в зависимости

от соединения секций и подключения их к источнику напряжения [3, 8].

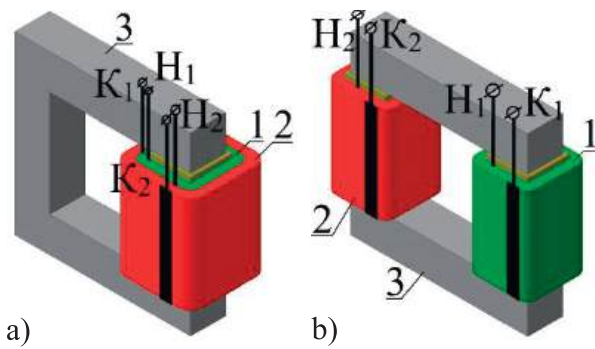
Кроме различных вариантов соединения секции также могут быть разными по исполнению. На рисунке 4, а первая секция наматывается на магнитопровод, а вторая размещается поверх нее. Из-за разного диаметра спиралей у второй секции увеличиваются емкость и индуктивность в отличие от первой секции. На рисунке 4, б обе секции имеют одинаковый диаметр и размещены на общем магнитопроводе.



а) Г-shaped; б) Steinmetz bridge diagram
1 — MIEC; 2, 3 — conductive plates; 4 — current source; 5 — load

Рисунок 3. Схемы ИЕП на основе односекционного МИЭК

Figure 3. ICC schemes based on a single-section MIEC



1 — первая секция; 2 — вторая секция;
3 — магнитопровод; H1, H2 и K1, K2 —
начала и концы первой и второй
проводящих обкладок
a) двухсекционный МИЭК с двумя
секциями, размещенными на одном
каркасе;
b) двухсекционного МИЭК с идентичными
электрическими параметрами

1 — the first section; 2 — the second section;
3 — the magnetic circuit; H1, H2 and K1,
K2 — the beginnings and ends of the first and
second conductive plates
a) two-section MIEC with two sections
placed on the same frame;
b) two-section MIEC with identical electrical
parameters

Рисунок 4. Виды исполнения
двухсекционного МИЭК

Figure 4. Types of execution
of the two-section MIEC

Моделирование МИЭК в составе накопителя энергии

Рассмотрим блок-схему источника вторичного электропитания (ИВЭП) (рисунок 5). Приняты следующие обозначения на блок-схеме: ПС — питающая сеть; В — трехфазный мостовой выпрямитель; Ф — емкостной фильтр; АИН — автономный инвертор напряжения; ИЕП — индуктивно-емкостной преобразователь; Т — согласующий трансформатор; ВС — высоковольтный выпрямительный столб; РЦ — разрядная цепь.

На рисунке 6 представлена принципиальная схема системы заряда ЕН с ИЕП для ЭГОС.

В статье [9] рассматривается работа односекционного МИЭК в системе стабилизации тока (ССТ). Была построена схема устройства заряда емкостного накопителя на основе МИЭК и получены осциллограммы напряжений и токов на элементах схемы (рисунок 7).

На вход инвертора подается напряжение равное 4,2 В (рисунок 8).

На графике (рисунок 9) изображена характеристика напряжения на индуктивности, что соответствует напряже-



Рисунок 5. Блок-схема ИВЭП ЭГОС

Figure 5. Block diagram of the SPSS EHCS

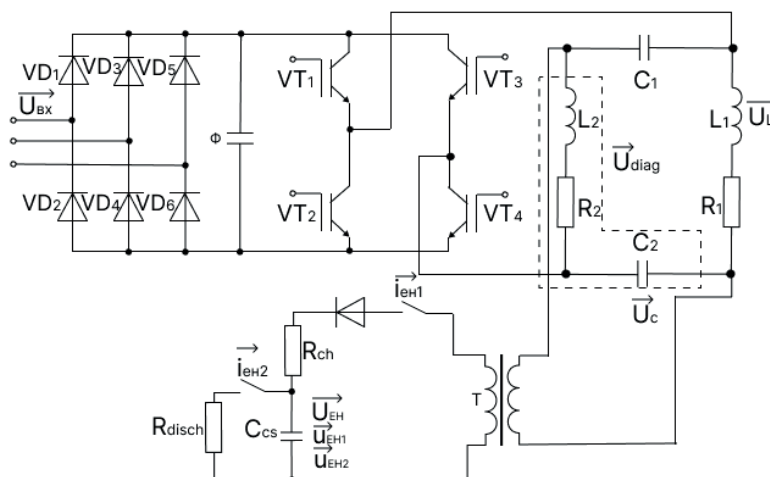


Рисунок 6. Схема системы
заряда емкостного накопителя
с ИЕП

Figure 6. The scheme
of the charge system
of a capacitive storage
device with an ICC

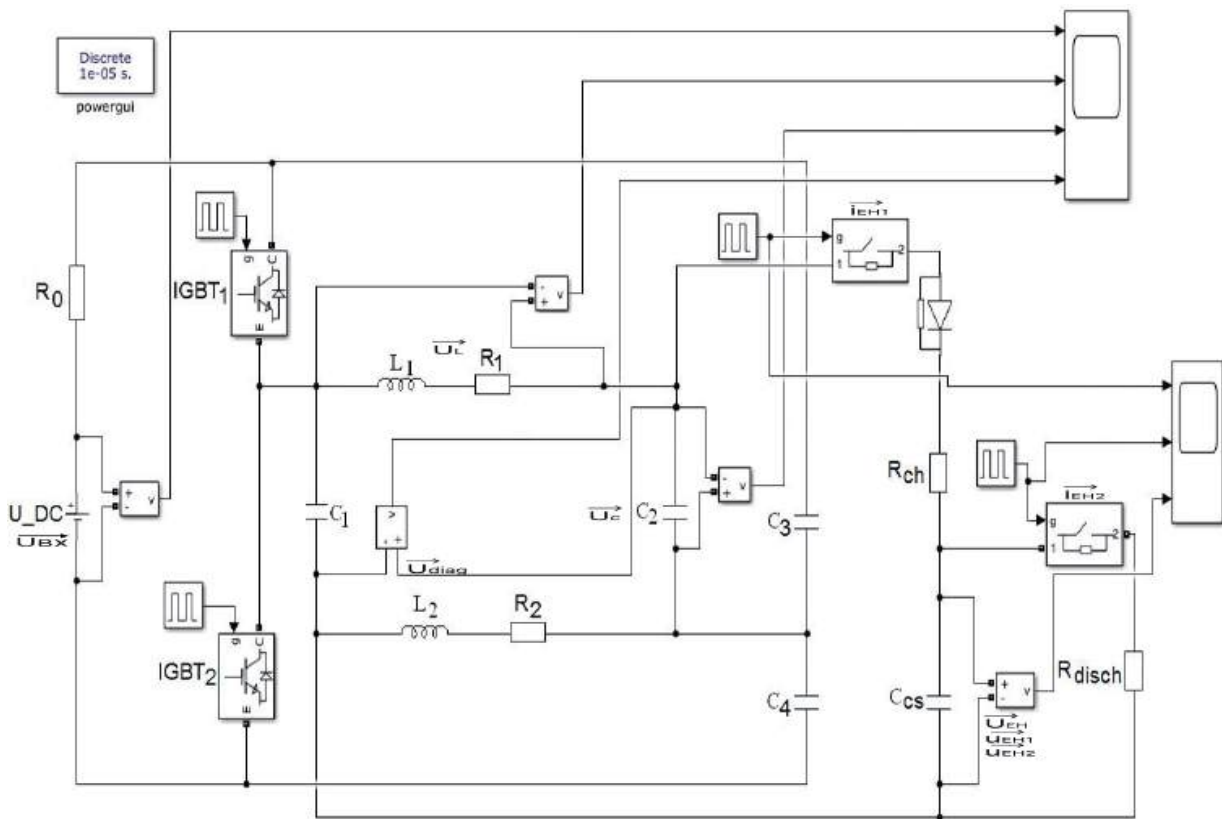


Рисунок 7. Компьютерная модель системы заряда ЕН с ИЕП на основе односекционного МИЭК

Figure 7. A computer model of the CS charge system with an ICC based on a single-section MIEC

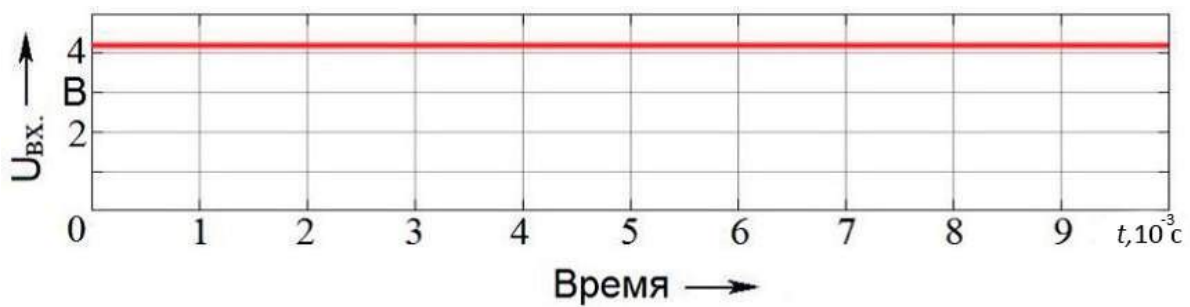


Рисунок 8. График напряжения на входе инвертора

Figure 8. Voltage graph at the input of the inverter

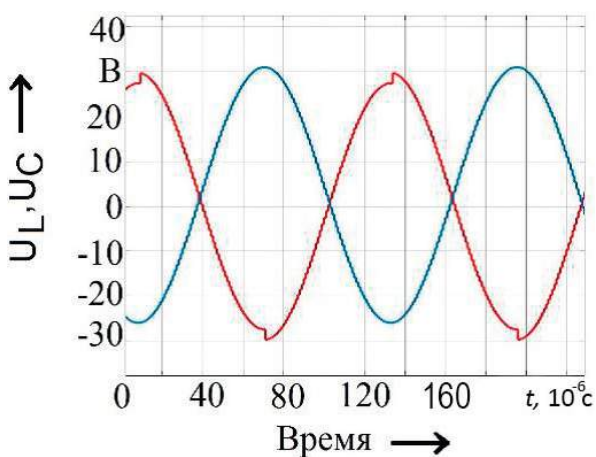


Рисунок 9. График напряжения на обкладке (1) и емкости (2)

Figure 9. Graph of the voltage on the lining (1) and capacitance (2)

нию на проводящей обкладке МИЭК и напряжению на емкости в резонансном режиме работы (амплитуда напряжения 30 В свидетельствует о добротности, равной 7). Работа в резонансном режиме с добротностью Q позволяет получить на обкладках МИЭК напряжение, равное $Q \cdot U_{вх}$.

График на рисунке 10 отображает характеристику напряжения в диагонали инвертора, которое является наибольшим и равно $2U_{вх}$.

На рисунке 11 представлен график напряжения на емкостном накопителе в процессе его заряда и последующего разряда на электроде. По графику можно определить, что напряжение заряда на накопителе в 12 раз превышает значение

напряжения питания. Добиться такого эффекта позволило диагональное подключение накопителя энергии и работа МИЭК в резонансе. Следовательно, если в диагональ инвертора подключить нагрузку, то можно получить напряжение равное $2 \cdot Q \cdot U_{вх}$.

В статье [10] описывается разработка математической модели электрогидроимпульсной очистительной системы на основе МИЭК. Были рассмотрены три метода анализа электромагнитных параметров ИЕП:

- анализ параметров при помощи интегральных параметров МИЭК;
- анализ параметров при помощи интегральных параметров МИЭК в виде

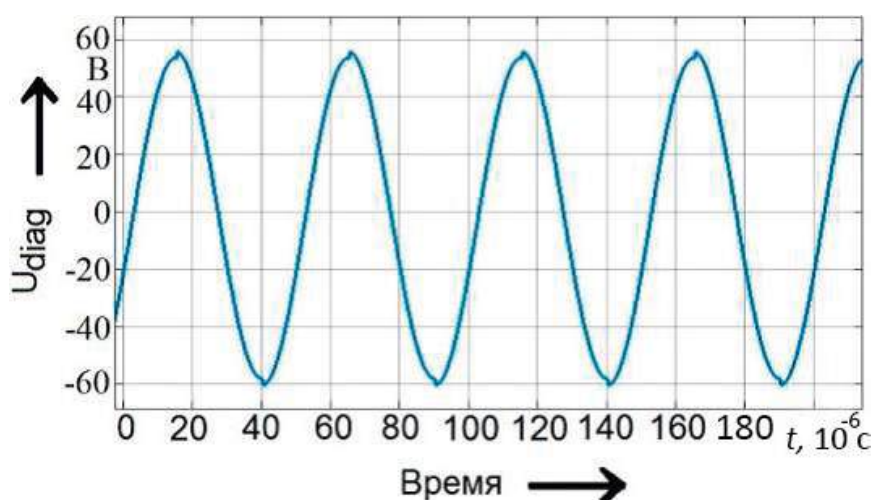


Рисунок 10. График напряжения в диагонали инвертора

Figure 10. Voltage graph in the diagonal of the inverter

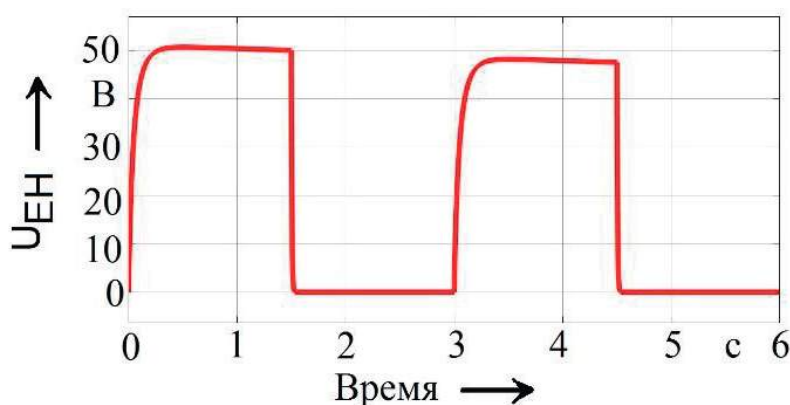


Рисунок 11. График напряжения на накопителе

Figure 11. Voltage graph on the drive

системы с распределенными параметрами;

— анализ параметров при помощи линейных уравнений по правилам Кирхгофа для схемы замещения МИЭК.

В ходе исследований определено, что метод анализа электромагнитных параметров ИЕП при помощи интегральных параметров позволяет упростить вычисления за счет использования линейных уравнений вместо дифференциальных.

На основе выбранного метода разработана математическая модель для расчета процесса заряда ЕН:

$$u_{EH1}(t) = U_{EH} - \frac{A \cdot e^{-\alpha_1 \cdot t}}{C_{ИЕП}} \times \left(\frac{\omega_{CB} \cdot \cos(\omega_{CB} \cdot t) + \alpha_1 \cdot \sin(\omega_{CB} \cdot t)}{\alpha_1^2 + \omega_{CB}^2} \right), \quad (1)$$

$$i_{EH1}(t) = A \cdot e^{-\alpha_1 \cdot t} \cdot \sin(\omega_{CB} \cdot t), \quad (2)$$

где U_{EH} — напряжение на емкостном накопителе, В;

α_1 — угол сдвига фаз;

A — постоянный интеграл;

$e^{-\alpha_1 \cdot t}$ — оператор поворота;

ω_{CB} — частота свободных колебаний;

t — время, с.

Используя полученную систему уравнений (1)–(2), построены характери-

стики напряжения и тока на накопителе энергии (рисунок 12).

Разработана также математическая модель источника вторичного электропитания очистительной системы в виде системы уравнений:

$$u_{EH2} = I_m \cdot \omega_0 \cdot L \cdot e^{-\alpha_2 \cdot t} \cdot \sin(\omega_R \cdot t + v), \quad (3)$$

$$i_{EH2} = -I_m \cdot e^{\alpha_2 \cdot t} \cdot \sin(\omega_R \cdot t), \quad (4)$$

где I_m — амплитудное значение тока, А;

ω_{CB} — частота свободных колебаний;

L — индукция, Гн;

$e^{-\alpha_2 \cdot t}$ — оператор поворота;

ω_0 — циклическая частота;

v — начальная частота;

t — время, с.

На основе полученной системы уравнений (3)–(4) построены графики напряжения и тока на накопителе энергии (рисунок 13).

Полученные математические модели позволяют упростить подбор составных элементов электрической схемы и их параметров для электрогидроимпульсной очистительной системы. Это поможет уменьшить расходы на тестирование устройства в реальных условиях и значительно ускорит сборку конечного устройства.

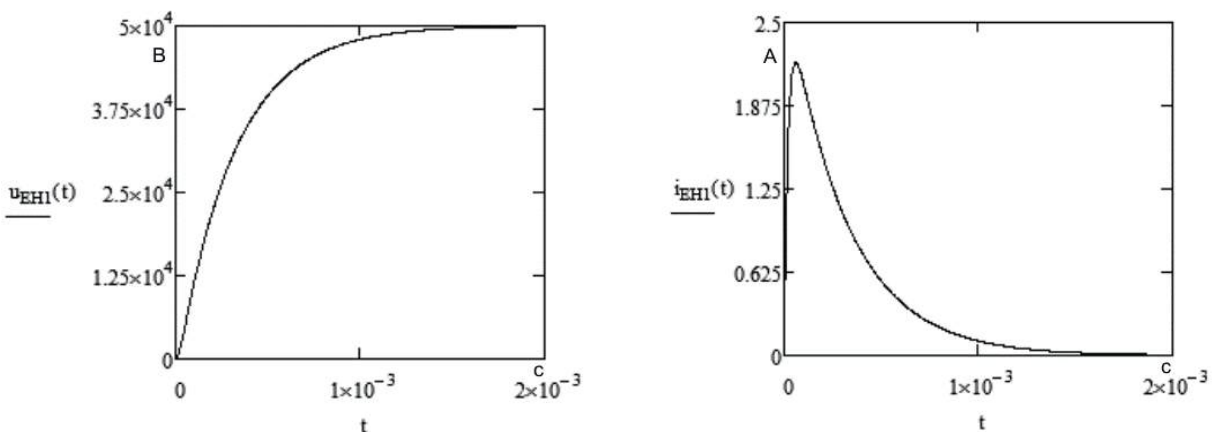


Рисунок 12. Временные диаграммы напряжения и тока при заряде ЕН

Figure 12. Time diagrams of voltage and current during CS charging

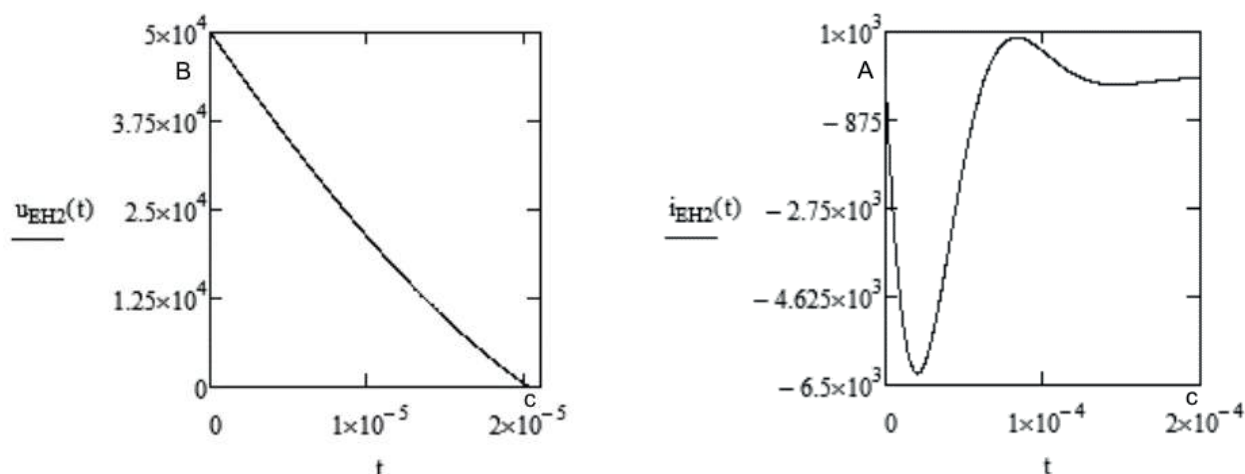


Рисунок 13. Временные диаграммы напряжения и тока при разряде ЕН

Figure 13. Time diagrams of voltage and current during CS discharge

Авторами были исследованы различные виды индуктивно-емкостных преобразователей на основе дискретных и гибридных электромагнитных элементов.

В результате проведенного обзора можно сделать вывод о том, что ИЕП, построенный на основе односекционного МИЭК, имеет более простую конструкцию, вносит минимум искажений напряжения в электрическую сеть, обладает более высокими энергетическими характеристиками, а также лучшими массогабаритными показателями. Поэтому односекционный МИЭК подойдет для замены индуктивно-емкостного преобразователя на дискретных ЭМЭ в схеме устройства заряда емкостного накопителя.

Список источников

1. Волков И.В., Милях А.Н. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка, 1974. 216 с.
2. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи. Применение в электротехнике и обзор схемотехнических решений // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышлен-

Выводы

В ходе работы был проведен анализ существующих схематических исполнений МИЭК и изучены их характеристики. Исследован односекционный МИЭК, который позволит заменить Т-образную схему исполнения ИЕП. Определено, что использование МИЭК в качестве ИЕП позволяет улучшить энергетические показатели конечного устройства и его массогабаритные показатели. Односекционная структура МИЭК позволяет менять режимы работы устройства, изменяя подключение обкладок, без изменения составных элементов схемы, как в дискретных ИЕП.

Перечисленные преимущества помогут эффективнее заряжать емкостные накопители, что сделает устройства электрогидроимпульсной очистки более мобильными.

ных городов: сб. матер. 3-ей Всеросс. науч.-практ. конф. Волжский: Изд-во филиала МЭИ, 2010. С. 120-125. EDN: TLDNTT.

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

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-81-88.
EDN: XWOSNF.

4. Кашин Ю.А., Сибгатуллин Р.С., Тухватуллин Р.А., Хомяков И.М. Деконные системы преобразования электромагнитной энергии // Проблемы преобразовательной техники: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Киев, 1983.

5. Бочкарева Т.А. Индуктивно-емкостный преобразователь на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента // Актуальные проблемы науки и техники — 2016: матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Уфа, Изд-во Нефтегазовое дело, 2016. Т. 1. С. 318-321. EDN: XIPQOX.

6. Волков И.В., Закревский С.И., Пшеничный В.В. Гибридный элемент электрической цепи — индукон и его использование в качестве преобразователя источника напряжения в источник тока // Проблемы преобразовательной техники: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Киев, 1983.

7. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спирин В.М. Расчет схем Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей CL-вида с учетом характера нагрузки // Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2012. № 33. С. 83-87. EDN: PZGPYJ.

8. Кабан В.П. Сравнительный анализ Т-образных индуктивно-емкостных преобразователей CLL-структуры по установленной мощности реактивных элементов // Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2012. № 33. С. 87-91. EDN: PZGPYT.

9. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ режимов стабилизации индуктивно-емкостного преобразователя на основе гибридного электромагнитного элемента // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: Межвуз. сб. науч. тр. (с междунар. участием). 2016. С. 461-467. EDN: VWJRSR.

10. Бочкарева Т.А., Хазиева Р.Т. Математическое моделирование электрогидроимпульсной очистительной системы // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: матер. I Всеросс. науч. конф.: в 2 ч. Ч. 1. Тольятти: Изд-во Тольяттинского государственного университета, 12–14 декабря 2017. Т. 1. С. 320-328. EDN: LBFVMT.

References

1. Volkov I.V., Milyakh A.N. *Sistemy neizmen-nogo toka na osnove induktivno-emkostnykh preobrazovatelei* [Systems of Constant Current Based on Inductive-Capacitive Converters]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974. 216 p. [in Russian].

2. Konesev S.G., Khazieva R.T. *Induktivno-emkostnye preobrazovateli. Primenenie v elektrotekhnike i obzor skhemotekhnicheskikh reshenii* [Inductive-Capacitive Converters. Application in Electrical Engineering and Review of Circuit Solutions]. *Sbornik materialov Tretei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Resurso-energoberezhenie i ekologo-energeticheskaya bezopasnost' promyshlennykh gorodov»* [Collection of Materials of the Third All-Russian Scientific and Practical Conference Resource and Energy Saving and Environmental and Energy Safety of Industrial Cities]. Volzhskii: Izd-vo filiala MEI, 2010, pp. 120-125. EDN: TLDNTT. [in Russian].

3. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Sirenko V.V., Shakirzyanov F.N. *Razrabotka matematicheskoi modeli i analiz osobennosti rezhimov induktivno-emkostnogo preobrazovatelya na osnove katkona* [The Mathematical Model of a Katkon-Based Inductive-Capacitive Converter and Specific Features of Its Operation Modes]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta — Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, 2018, No. 4, pp. 81-88. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-81-88. EDN: XWOSNF. [in Russian].

4. Kashin Yu.A., Sibagatullin R.S., Tukhvatullin R.A., Khomyakov I.M. *Dekonnye sistemy preobrazovaniya elektromagnitnoi energii* [Decon Systems for Conversion of Electromagnetic Energy]. *Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy preobrazovatel'noi tekhniki»* [Abstract of Report of All-Union Scientific and Technical Conference «Problems of Converter Engineering»]. Kiev, 1983. [in Russian].

5. Bochkareva T.A. *Induktivno-emkostnyi preobrazovatel' na osnove mnogofunktsional'nogo integrirovannogo elektromagnitnogo komponenta* [Inductive-Capacitive Converter Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy nauki i tekhniki — 2016»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Actual Problems of Science and Technology — 2016»]. Ufa, Izd-vo Neftgazovoe delo, 2016, Vol. 1, pp. 318-321. EDN: XIPQOX. [in Russian].

6. Volkov I.V., Zakrevskii S.I., Pshenichnyi V.V. *Gibridnyi element elektricheskoi tsepi — indukon i ego ispol'zovanie v kachestve preobrazovatelya istochnika napryazheniya v istochnik toka* [Hybrid Element of an Electric Circuit — Induction and Its Use as a Converter of a Voltage Source to a Current

Source]. *Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy preobrazovatel'noi tekhniki»* [Report summary of All-Union Scientific and Technical Conference «Problems of Converter Technology»]. Kiev, 1983. [in Russian].

7. Kaban V.P., Matveev V.Yu., Gubarevich V.N., Spirin V.M. Raschet skhem G-obraznykh induktivno-emkostnykh preobrazovatelei CL-vida s uchetom kharaktera nagruzki [Calculation of Schemes of G-Shaped Inductive-Capacitive Transducers of CL-Type with Taking into Consideration the Character of the Load]. *Sbornik Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy — Collection of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Kiev, 2012, No. 33, pp. 83-87. EDN: PZGPYJ. [in Russian].

8. Kaban V.P. Sravnitel'nyi analiz T-obraznykh induktivno-emkostnykh preobrazovatelei CLL-struktury po ustanovlennoi moshchnosti reaktivnykh elementov [Comparative Analysis of T-Shaped Inductance-Capacitance Transducers with CLL-Structure according to the Installed Capacity of Reactive Elements]. *Sbornik Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy — Collection of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Kiev, 2012, No. 33, pp. 87-91. EDN: PZGPYT. [in Russian].

9. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analiz rezhimov stabilizatsii induktivno-emkostnogo preobrazovatelya na osnove gibridnogo elektromagnitnogo elementa [Analysis of Current Stabilization Mode of Inductive-Capacitive Transducer Based on Hybrid Electromagnetic Element]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov (s mezhdunarodnym uchastiem) «Povyshenie nadezhnosti i energo-effektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers (with International Participation) «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. 2016. S. 461-467. EDN: VWJRSR. [in Russian].

10. Bochkareva T.A., Khazieva R.T. Matematicheskoe modelirovanie elektrogidroimpul'snoi ochistitel'noi sistemy [Mathematical Modeling of Electro-Hydro Impulse Purification System]. *Sbornik materialov I Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: podkhody, metody, resheniya»: v 2 chastyakh. Ch. 1. Tol'yattinskii gosudarstvennyi universitet, 12–14 dekabrya 2017.* [Collection of Materials of I All-Russian Scientific Conference «Information Technologies in Modeling and Management: Approaches, Methods, Solutions»: in 2 Vol. Vol. 1. Tolyatti State University, December 12-14, 2017]. 2017, Vol. 1, pp. 320-328. EDN: LBFVMT. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 15.08.2024; одобрена после рецензирования 30.08.2024; принята к публикации 11.09.2024.

The article was submitted 15.08.2024; approved after reviewing 30.08.2024; accepted for publication 11.09.2024.

Научная статья

УДК 621.316.925

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-67-79

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИИ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK

**Андрей Юрьевич Шумихин****Andrey Yu. Shumikhin**

студент 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

Современные электроэнергетические комплексы требуют надежной и быстродействующей релейной защиты, необходимой для предотвращения аварий и обеспечения устойчивой работы энергосистемы. С развитием компьютерных технологий появляется возможность использовать современные программные средства для моделирования и анализа работы релейной защиты. Matlab Simulink предоставляет необходимый инструментальный комплекс, позволяющий с высокой точностью моделировать различные виды релейной защиты и их взаимодействие с другими элементами сети.

Цель исследования

В данной статье осуществляется моделирование релейной защиты подстанции с целью дальнейшего применения его результатов при изучении релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем, принципов действия и устройства релейной защиты линий и других электроустановок.

Методы исследования

Суть данной работы заключается в разработке компьютерных моделей релейной защиты подстанций на основе программного обе-

Ключевые слова

релейная защита,
электрическая сеть,
подстанция, короткие
замыкания,
моделирование,
электроустановка

спечения Matlab Simulink. Модели подстроены под характеристики определённых электроустановок и включают в себя компоненты, служащие в качестве источников питания, элементов коммутации, логики, управления, измерения и сравнения, слаженная работа которых позволяет достичь высокой селективности, надёжности и быстрого действия релейной защиты.

Результаты

Результаты исследования, проведенного авторами, направлены на получение функционирующих компьютерных моделей релейной защиты объектов электрической сети, которые могут быть использованы для обучения студентов моделированию электроустановок, а также анализа процессов, протекающих в электрических сетях при возникновении аварий и ненормальных режимов. Результаты моделирования, полученные в ходе выполнения работы, представлены в качестве графиков трёхфазных напряжений и токов, возникающих при коротких замыканиях в электроустановках.

Для цитирования: Шумихин А. Ю., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т. Компьютерное моделирование работы релейной защиты подстанции в пакете Matlab Simulink // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 67–79. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-67-79>.

Original article

COMPUTER SIMULATION OF OPERATION OF SUBSTATION RELAY PROTECTION IN MATLAB SIMULINK PACKAGE

Relevance

Modern electric power systems require reliable and high-speed relay protection, which is necessary to prevent accidents and ensure stable operation of the power system. With the development of computer technology, it becomes possible to use modern software tools for modeling and analyzing the operation of relay protection. Matlab Simulink provides the necessary toolset that allows you to accurately simulate various types of relay protection and their interaction with other network components.

Aim of research

This article simulates the relay protection of a substation in order to further apply its results in the study of relay protection and automation of electric power systems, principles of operation and devices of relay protection of lines and other electrical installations.

Research methods

The essence of this work is to develop computer models of relay protection of substations based on Matlab/Simulink software. The models are tailored to the characteristics of certain electrical installations and include components that serve as power sources, switching elements, logic, control, measurement and comparison, the coordinated operation of which allows to achieve high selectivity, reliability and performance of relay protection.

Results

The results of the research conducted by the authors are aimed at obtaining functioning computer models of relay protection of electric grid facilities, which can be used to teach students how to model electrical installations, as well as analyze the processes occurring in electric networks in the event of accidents and abnormal modes. The simulation results obtained during the work are presented as graphs of three-phase voltages and currents that occur during short circuits in electrical installations.

Keywords

relay protection, electrical network, substation, short circuits, simulation, electrical installation

For citation: Shumikhin A. Yu., Kirillov R. V., Khazieva R. T. Komp'yuternoye modelirovaniye raboty releynoy zashchity podstantsii v pakete Matlab Simulink [Computer Simulation of Operation of Substation Relay Protection in Matlab Simulink Package]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 67–79 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-67-79>.

Введение

Подстанции 6 (10) кВ являются неотъемлемой частью общей системы электроснабжения и играют критически важную роль в передаче и распределении электроэнергии от электростанций до конечных потребителей. Данные объекты представляют собой комплекс устройств и оборудования, предназначенных для преобразования, распределения и учёта электрической энергии [1].

Релейная защита представляет собой систему автоматических устройств, предназначенных для немедленного обнаружения и изолирования неисправных участков электрических сетей. Основное ее назначение — минимизация вреда от коротких замыканий, замыканий на землю, перегрузок и других видов электрических аварий [2, 3].

Виды релейной защиты подстанций 6 кВ

На подстанциях реализуются различные виды релейной защиты, каждый из которых предназначен для выполнения определенной функции по обеспечению безопасности и надежности работы электрооборудования [4]. Виды релейной защиты подразделяются по типу неисправности, против которой они направлены, и характеру защитного действия [3, 5].

1. Максимальная токовая защита

Защита срабатывает, когда ток в цепи превышает установленный предел. Она может быть мгновенной или с задержкой времени [2].

2. Дифференциальная защита

Сравнивает величину тока в начале и в конце защищаемого участка и срабаты-

вает при обнаружении разности, что указывает на наличие неисправности внутри данного участка [6].

3. Направленная защита

Реагирует на направление потока мощности и используется для локализации мест неисправности в разветвленных сетях.

4. Дистанционная защита

Распознает уровень напряжения и тока, а также их фазовые соотношения для определения удаленности и местоположения неисправности.

5. Защита от замыканий на землю

Детектирует неисправности, связанные с попаданием тока на заземленные части конструкций или оборудования.

6. Фазовая защита

Контролирует фазовое смещение, обнаруживает обрывы фаз и помогает предотвратить асимметрию фазовых токов.

7. Частотная защита

Отслеживает отклонения частоты в сети от нормативных значений, что важно для стабилизации работы генераторов и синхронных машин.

8. Автоматика ввода резерва (АВР)

Автоматически включает резервные источники питания в случае выхода основных из строя.

Каждый из перечисленных видов релейной защиты может использоваться отдельно или в комбинации с другими, образуя многоуровневую защитную систему подстанции. Правильный выбор и комплексное применение этих видов защиты позволяют значительно повысить надежность оборудования и уменьшить риски для энергосистемы в целом.

Разновидности релейной защиты на основе элементной базы

Стоит отметить, что на эффективность, надёжность, быстродействие, селективность и многие другие важные параметры релейной защиты влияет её элементная база, т.е. те компоненты, которые лежат в основе её функционирования [7, 8].

1. Микропроцессорная база

Реализация данного вида релейной защиты основана на применении микроконтроллеров и ЭВМ, что позволяет осуществлять логико-математические операции с информацией о состоянии электроэнергетической системы, основываясь на аналитических выражениях.

Среди достоинств данного типа защиты стоит отметить возможность реализации релейной защиты различной степени сложности, что в то же время влечет за собой существенный недостаток, влияющий на надёжность её работы — высокая сложность аппаратной части [5, 8].

2. Полупроводниковая база

Применение полупроводниковых элементов в устройствах релейной защиты и автоматики даёт возможность увеличить скорость срабатывания релейной защиты, уменьшить габаритные показатели. Недостатком в данном случае является значительная зависимость аппаратуры от условий окружающей среды, что влияет на эффективность и надёжность работы защиты.

3. Электромеханическая база

Представляет собой традиционную технологию, основанную на использовании электромеханических реле. Их работа базируется на физических принципах действия электромагнитов и механических элементов.

Достоинствами данной системы релейной защиты является её надёжность, простота и устойчивость к электромагнитным помехам. Среди недо-

статков можно выделить её большие габариты, ограниченная функциональность, меньшую точность [5, 9].

Критерии выбора устройств релейной защиты

Выбор релейной защиты является ключевым этапом в обеспечении надёжности и эффективности электроэнергетических систем. При этом выбор должен основываться на комплексных критериях, включающих технико-экономические характеристики, надёжность и селективность работы системы, а также на универсальность и размеры устройств защиты [10, 11].

1. Техничко-экономические показатели

Одним из главных критериев при выборе является соотношение стоимости защиты и получаемых технических преимуществ. Сюда входит стоимость самого оборудования, расходы на его монтаж, настройку, тестирование и последующее обслуживание. Оценка эффективности инвестиций и сроков окупаемости оборудования также лежат в основе экономических рамок выбора защиты [12].

2. Надёжность и селективность

Релейная защита должна обеспечивать высочайшую надёжность, т.е. минимальный риск отказа в срабатывании при реальной неисправности и минимальные шансы на ложное срабатывание. Селективность — способность системы точно идентифицировать место неисправности и обеспечивать отключение только поврежденного участка, не затрагивая остальные части сети, что существенно сокращает риски каскадных сбоев и обеспечивает более быстрое восстановление электроснабжения [8, 13].

3. Универсальность и малогабаритность

Ценность современной релейной защиты также определяется её способностью адаптироваться к различным

условиям эксплуатации и техническим требованиям энергетических систем. Универсальные приборы, способные выполнять широкий спектр функций, обеспечивают экономию средств и упрощение систем управления. Малогабаритность защитного оборудования позволяет использовать его в условиях ограниченного пространства и снижать затраты на строительство подстанций и помещений для размещения аппаратуры.

При выборе релейной защиты исчерпывающий анализ перечисленных критериев позволяет определить наиболее подходящее решение, которое будет оптимально с точки зрения функциональности, стоимости и долгосрочной эксплуатации [14, 15].

Компьютерное моделирование токовой отсечки фидера 6 кВ

Принцип действия токовой отсечки основан на контроле величины тока на заданном участке. В случае превышения значения тока выше установленного, токовая отсечка действует на отключение защищаемого участка. Ток срабатывания токовой отсечки отстраивается от

максимального значения тока короткого замыкания в конце защищаемой линии. Действует защита без выдержки времени.

Далее приведена модель простейшего алгоритма токовой отсечки линии (рисунок 1) в среде Matlab. При наличии тока короткого замыкания в зоне защиты (между автоматическим выключателем и трехфазной нагрузкой) реле воздействует на отключение выключателя.

В данной модели (рисунок 1) использованы следующие блоки. Блок 1 представлен как трехфазный источник переменного напряжения, блок 2 является трехфазным автоматическим выключателем, трехфазный измерительный блок под номером 3 отвечает за вывод значений в осциллограф. Блок под номером 4 (ступенчатый генератор) позволяет генерировать импульсы, имитируя входной сигнал. Блок 5 является короткозамыкателем, т.е. имитирует короткое замыкание и управляется от ступенчатого генератора. Блоки 6, 6.1 — осциллографы, ответственные за вывод графических изображений токов и напряжений. Трехфазная RLC-нагрузка представлена

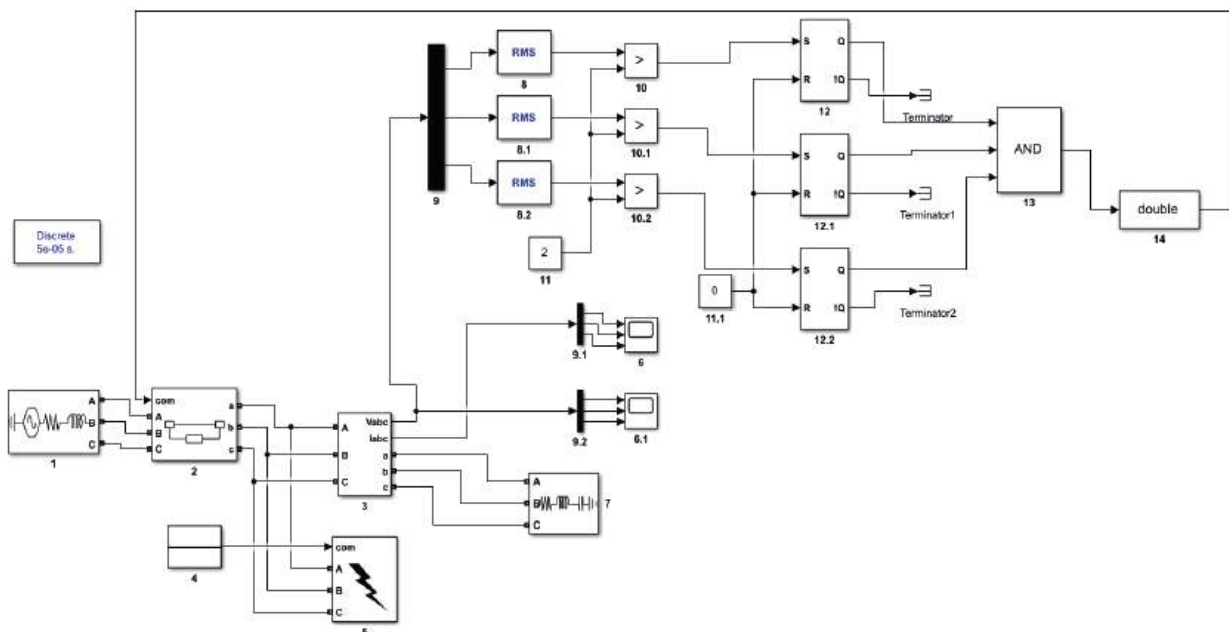


Рисунок 1. Модель токовой отсечки линии

Figure 1. Line current cut-off model

блоком 7. Блоки 8–8.2 отвечают за извлечение значение квадратного корня из сигнала. Преобразование физического сигнала в виртуальный осуществляется блоками 9–9.2. В блоках 10–10.2 происходит сравнение сигналов с значением уставки. 11, 11.1 — блоки постоянных являются, указанными выше, уставками. 12, 12.1, 12.2 — RS-триггер. По входу S триггер устанавливается в состояние $Q = 1$, а по входу R — в состояние $Q = 0$. Блок 13 является логическим оператором «И», блок 14 — конвертер типа данных, необходимый для преобразования полученного сигнала, на основании которого будет происходить срабатывание релейной защиты.

На рисунке 2 приведены графики трехфазного напряжения, трехфазных токов и график работы блока короткого замыкания. Блок 4 (рисунок 3) не подает сигнал на блок короткозамыкателя. Отсоединим управляющий сигнал от выключателя.

При изменении параметров блока Stair Generator симулируется короткое замыкание, вследствие чего напряжение на линии пропадает, а ток возрастает многократно.

Проведем аналогичное моделирование, но с подключенным управляющим сигналом на выключатель (рисунок 4). При активации блока короткого замыкания ток возрастает, смоделированная защита чувствует его и подает отключающий сигнал на выключатель.

При моделировании были получены следующие результаты.

1. В условиях отсутствия короткого замыкания наблюдается стабильный уровень напряжения. Параметры тока оставались в пределах нормы и не превышали показателя в 2 А.

2. Логическая часть модели не фиксирует превышение тока на линии над уставкой.

3. Искусственное короткое замыкание в системе моделируется путём активации блока Stair Generator (4), что, в свою

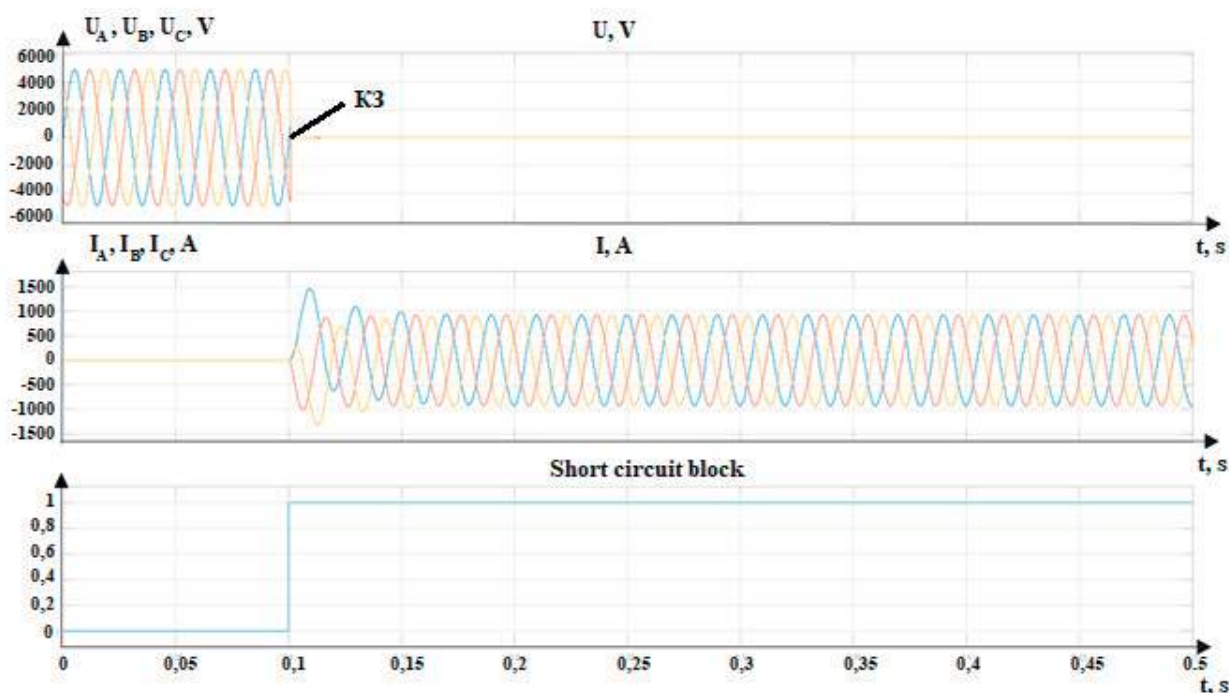


Рисунок 2. Графики трёхфазных напряжений и токов без отключения выключателя

Figure 2. Graphs of three-phase voltages and currents without disconnecting the switch

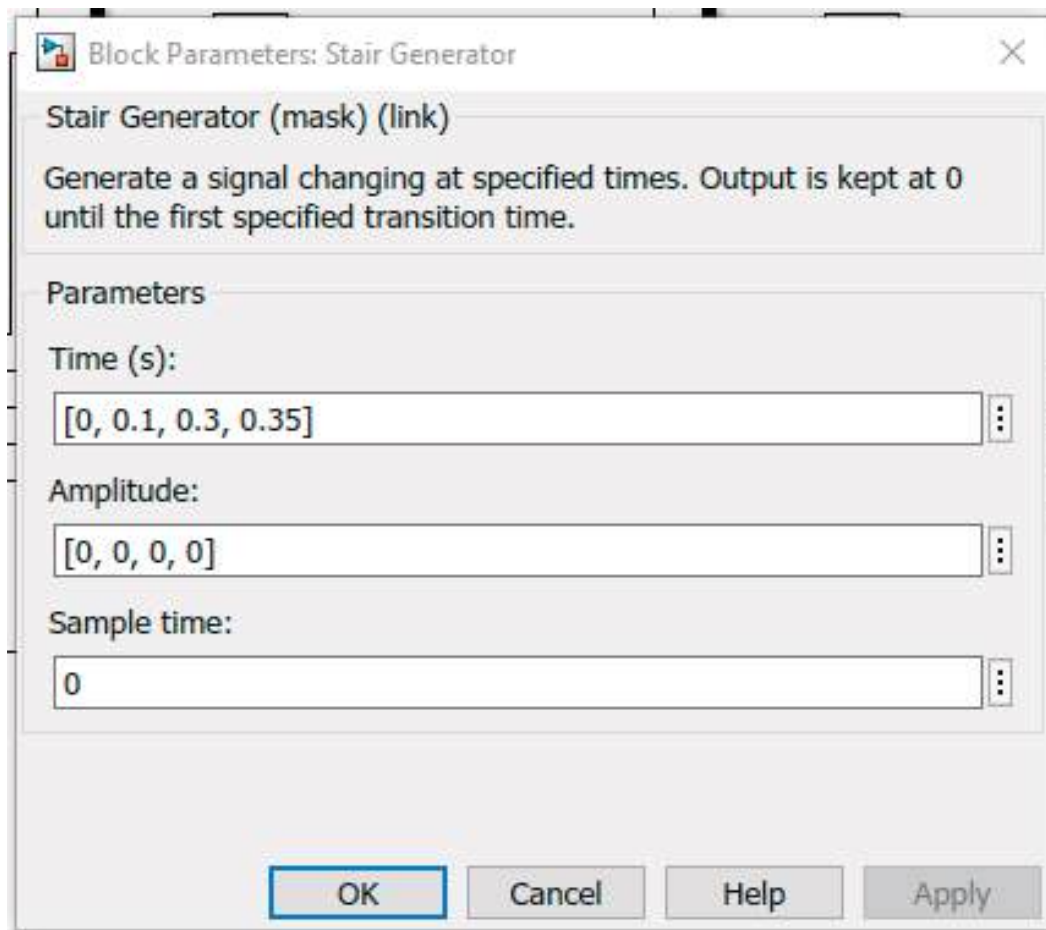


Рисунок 3. Окно настройки блока Stair Generator

Figure 3. Stair Generator block configuration window

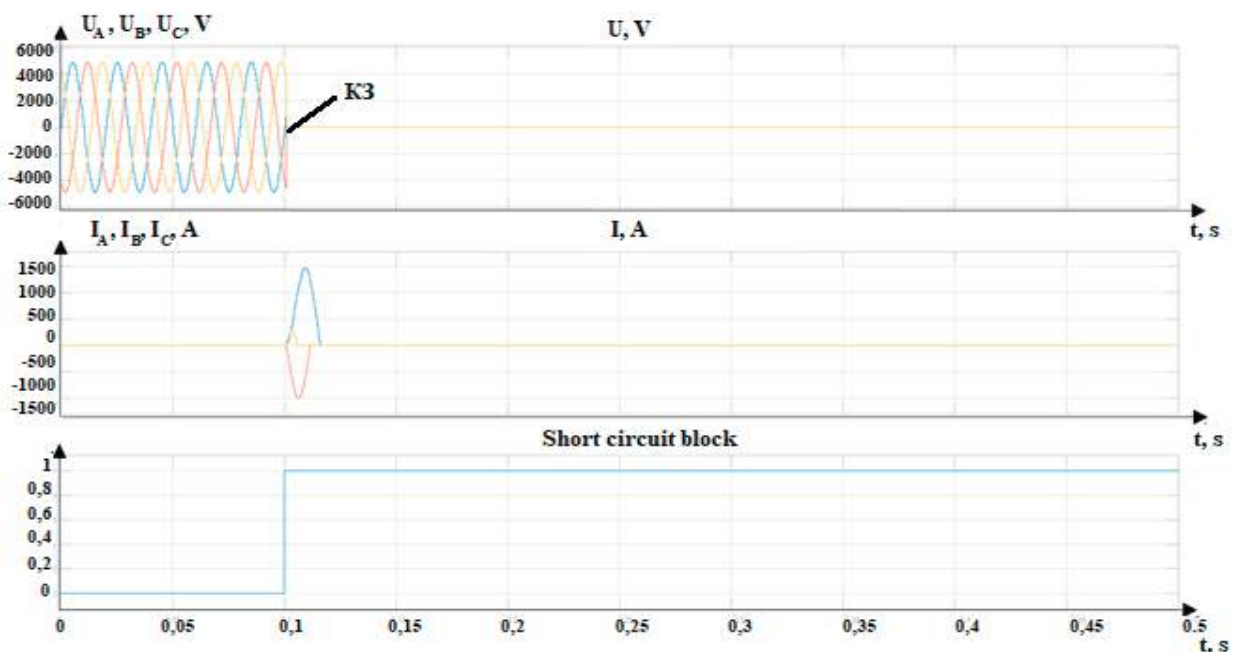


Рисунок 4. Графики трёхфазных напряжений и токов при отключении выключателя

Figure 4. Graphs of three-phase voltages and currents when the switch is turned off

очередь, активирует блок короткозамыкателя (5), имитируя возникновение трехфазного короткого замыкания.

4. В момент возникновения короткого замыкания в системе фиксируется резкий скачок тока в 1000 А, в то время как напряжение падает практически до нулевой отметки.

5. Логическая часть схемы, сравнивая ток на линии с уставкой, реагирует на ее превышение, воздействует на выключатель, вследствие чего он отключается.

6. Эти результаты моделирования очень важны для понимания поведения электрической системы при стандартных условиях работы и в экстренных ситуациях, демонстрируя эффективность защиты.

Компьютерное моделирование дифференциальной защиты трансформатора

Принцип действия дифференциальной защиты трансформатора основывается на использовании трансформаторов тока как со стороны обмотки низшего напряжения, так и высшего. Вторичные

обмотки трансформаторов тока соединяются в дифференциальную схему, параллельно которой подключается реле. Дифференциальная защита сравнивает величину и направление токов по концам защищаемого участка, в случае несоответствия заданным значениям происходит срабатывание защиты без выдержки времени.

Аналогично модели токовой отсечки в Matlab Simulink была построена модель дифференциальной защиты трансформатора (рисунок 5). Логическая часть модели, построенная в блоке Subsystem, приведенном на рисунок 6, сравнивает значение токов высшей и низшей сторон напряжения силового трансформатора. В нормальном режиме при отсутствии короткого замыкания в защищаемой зоне токи будут полностью компенсировать друг друга, вследствие чего результирующий ток будет равен 0. При возникновении короткого замыкания в защищаемой зоне равенство токов нарушается, вследствие чего результирующий ток увеличивает свое значение, логическая

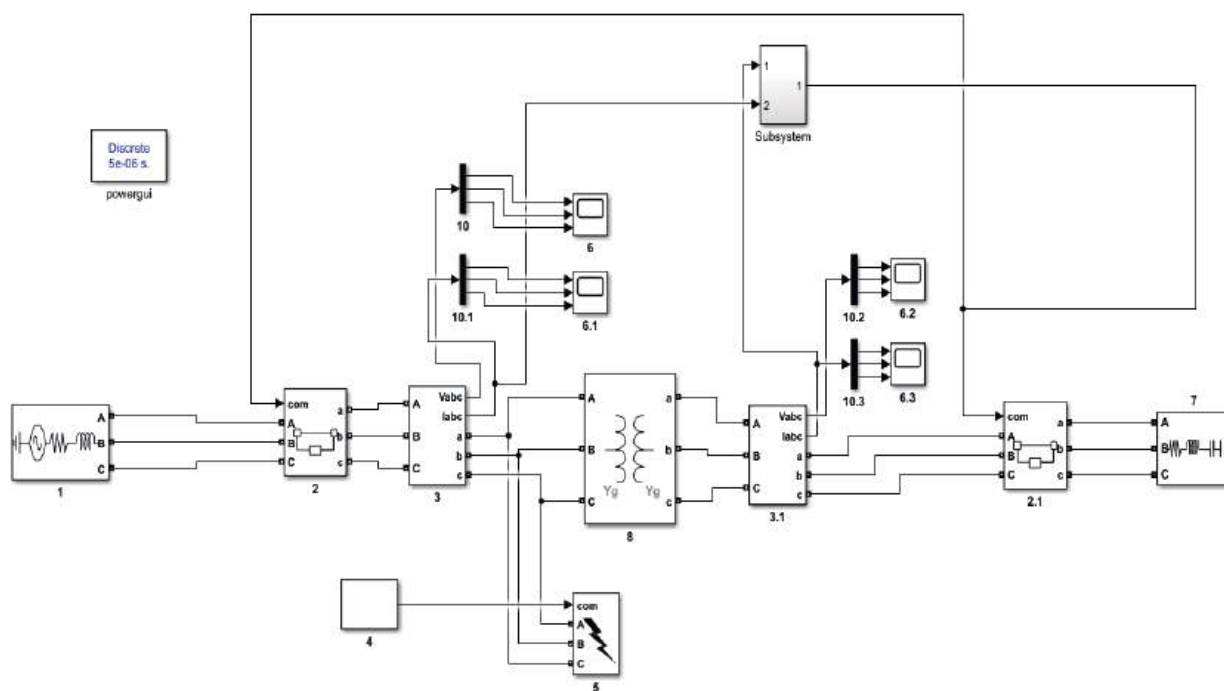


Рисунок 5. Модель дифференциальной защиты трансформатора

Figure 5. Transformer differential protection model

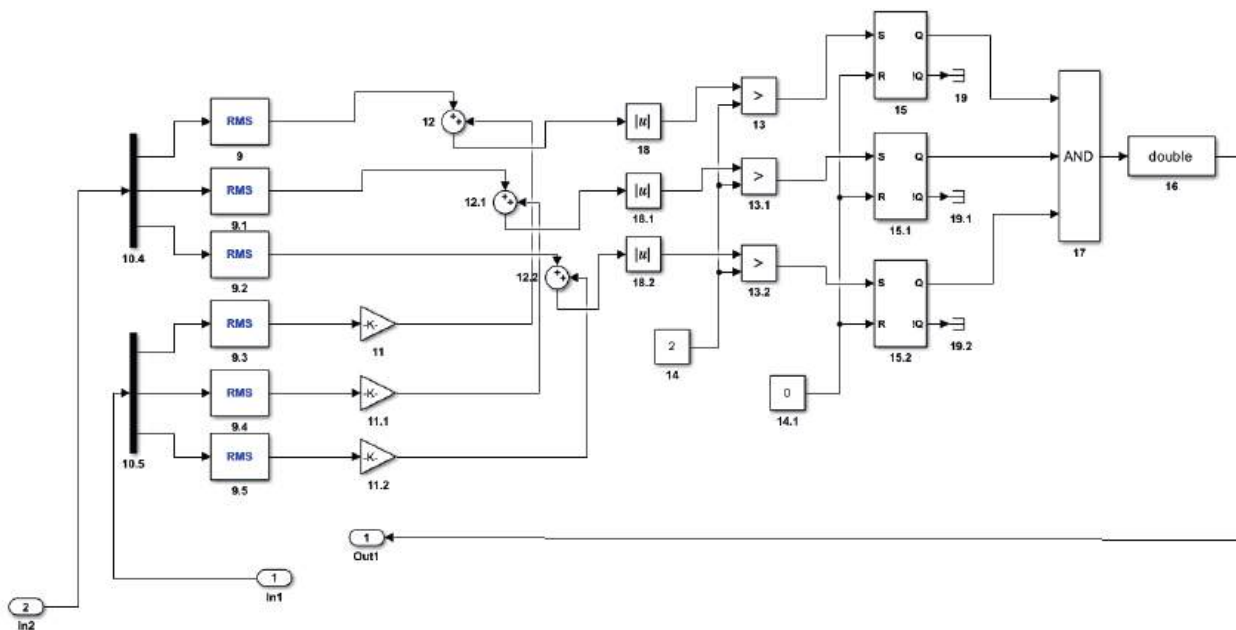


Рисунок 6. Блок Subsystem

Figure 6. Subsystem block

часть реагирует на это и отключает выключатель.

В данной модели (рисунок 5) используются следующие блоки. Блок под номером 1 — трехфазный источник переменного напряжения, представляет собой питающую энергосистему. Трехфазные выключатели 110 кВ и 6 кВ представлены блоками 2 и 2.1. Блоки 3 и 3.1 являются трёхфазными измерительными блоками, выполняющими функции трансформаторов тока и напряжения. Ступенчатый генератор, представленный блоком 4, создаёт настраиваемые импульсы, необходимые для управления блоком 5 — короткозамыкателем. Осциллограф, блоки 6–6.3, выводит графические изображения токов и напряжений. В качестве шин подстанции и отходящих присоединений представлен блок 7, под названием «трёхфазная RLC-нагрузка». Блок под номером 8 является силовым трансформатором 110/6 кВ. Для извлечения квадратного корня из поступающего сигнала в модели используются блоки 9–9.5. Блоки 10–10.5 служат для преобразования физического сигнала в виртуальный. Блоки 11–11.2

дают возможность усиливать входной сигнал в определённое число раз. В блоках 12–12.2 создаётся результирующее значение тока. Сравнение входных сигналов с значениями уставок (блоки 14, 14.1) осуществляется блоками 13–13.2. Блоки 15–15.2: RS-триггер. По входу S триггер устанавливается в состояние $Q = 1$, а по входу R — в состояние $Q = 0$. Конвертер типа данных (блок 16) служит для преобразования поступающего сигнала в сигнал совместимый с блоком 2, для корректной работы модели. Блок под номером 17 является логическим оператором «И», служащим для объединения сигналов в один результирующий. Вычисление абсолютного значения входного сигнала осуществляется в блоках 18–18.2. Блоки 19–19.2 используются для завершения неиспользуемых выходных сигналов.

На рисунке 7 приведены графики трехфазного напряжения, трехфазных токов, а также график, демонстрирующий работу блока короткого замыкания. В начальный момент при отсоединении управляющего сигнала от выключателя блок короткозамыкателя не активен

(рисунок 8). Напряжение на всех фазах 110 кВ. Силовой трансформатор работает в нормальном режиме.

С помощью блока 4 подается команда на блок короткозамыкателя в момент времени 0,1 с для создания трехфазного короткого замыкания (рисунок 9). В начальный момент времени напряжение на фазах будет также 110 кВ, но в момент начала короткого замыкания напряжение падает до нуля. Видно, что при возникновении тока короткого замыкания периодическая составляющая

достигает значений более 2 кА. Проведем аналогичное моделирование, но с подключенным управляющим сигналом на выключатель (рисунок 10). При активации блока короткого замыкания ток возрастает, смоделированная защита чувствует его и подает отключающий сигнал на выключатель.

В ходе моделирования дифференциальной защиты трансформатора можно сделать следующие выводы.

В исходном состоянии напряжение во всех фазах 110 кВ. Силовой трансформатор

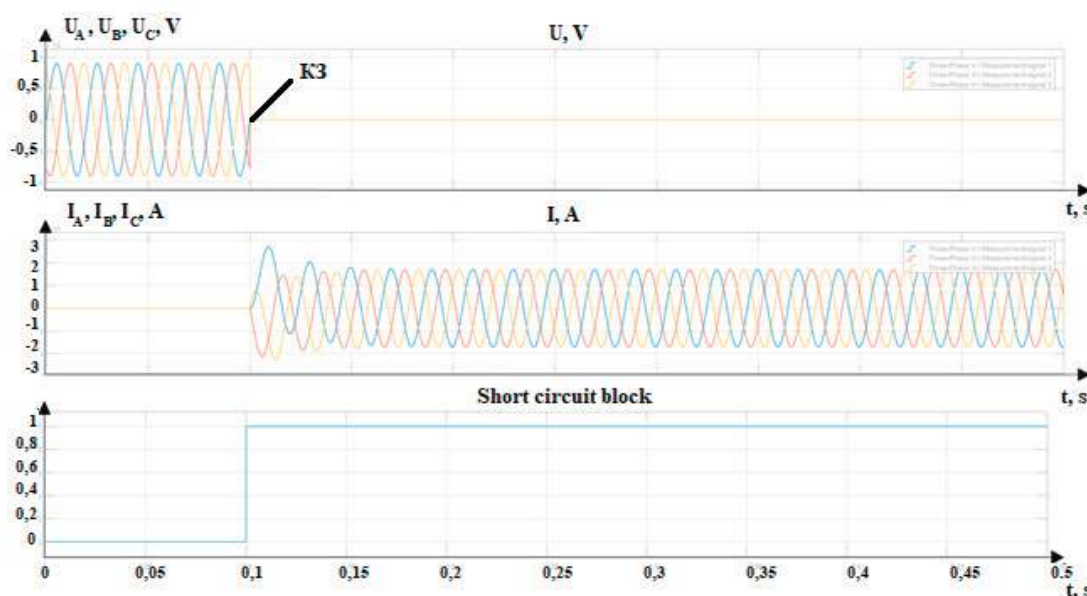


Рисунок 7. Графики трёхфазных напряжений и токов дифференциальной защиты трансформатора без отключения выключателя

Figure 7. Graphs of three-phase voltages and currents of differential transformer protection without disconnecting the switch

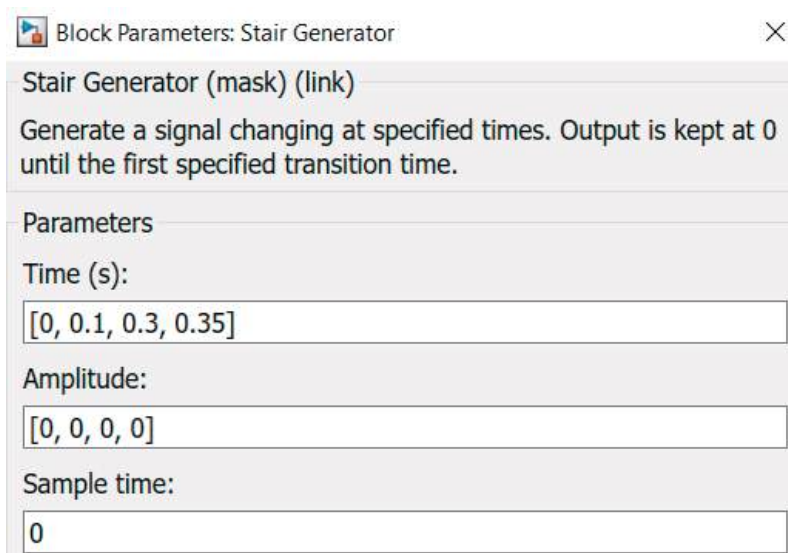


Рисунок 8. Окно настройки блока Stair Generator

Figure 8. Stair Generator block configuration window

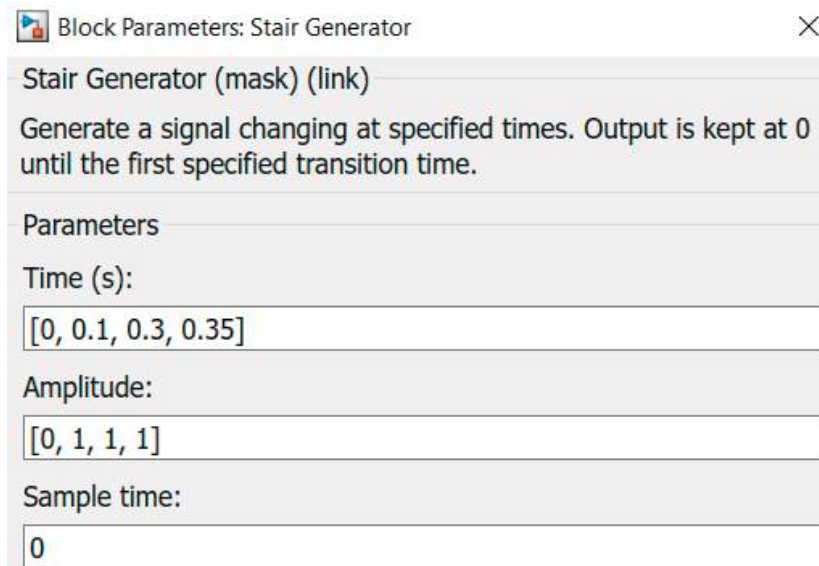


Рисунок 9. Окно настройки блока Stair Generator

Figure 9. Stair Generator block configuration window

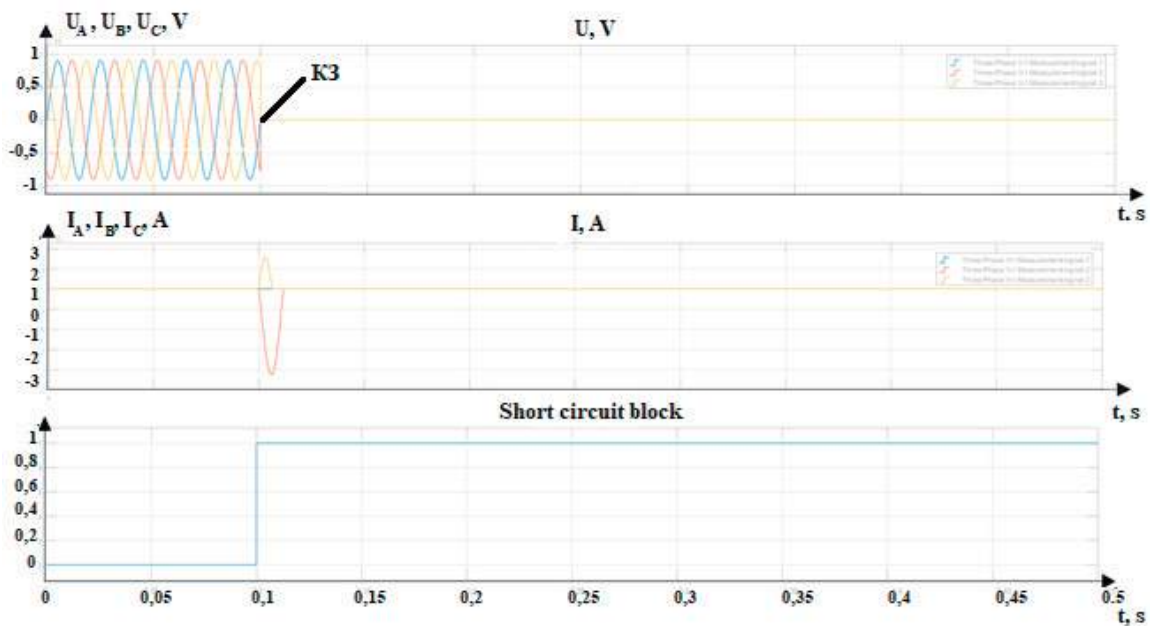


Рисунок 10. Графики трёхфазных напряжений и токов дифференциальной защиты трансформатора при отключении выключателя

Figure 10. Graphs of three-phase voltages and currents of the differential protection of the transformer when the switch is turned off

тор работает в нормальном режиме. Токи, циркулирующие в каждой из обмоток трансформатора, находятся в состоянии баланса, где они взаимно компенсируются, и, таким образом, суммарный ток не достигает значения, при котором сработала бы защита. В случае возникновения трехфазного короткого замыка-

ния в пределах защищаемой зоны произойдёт многократное увеличение тока, что послужит признаком аварийной ситуации.

В результате развития данной ситуации нарушается баланс токов в обмотках. Логическая часть модели релейной защиты фиксирует токи небаланса и про-

изводит подачу сигнала на отключение выключателя.

Эффективная работа защиты обеспечивает селективное отключение поврежденного участка от неповрежденной части электросети, предотвращая дальнейшее развитие аварии и выход из строя электрооборудования потребителей.

Выводы

В данной статье приведены результаты моделирования различных видов

релейной защиты электроустановок. Результаты исследования, полученные в ходе моделирования токовой отсечки фидера и дифференциальной защиты трансформатора, могут быть использованы в учебном процессе при изучении курса релейной защиты и автоматики, а также для обучения студентов моделированию объектов электроэнергетики в среде Matlab Simulink.

Список источников

1. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. Новосибирск: Норматика, 2014. С. 342-344. <https://en-res.ru/wp-content/uploads/2020/02/pue.pdf>.

2. Шабанов В.А. Проектирование электрооборудования установок и предприятий нефтяной отрасли. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. 224 с. EDN: VMEWJL.

3. Пашкин В.В. Профессиональный сборник электротехнического персонала газового промысла. М.-Пос. Ямбург, 2014. 173 с.

4. Бочаров В., Гуренков Н., Корнилов А., Парфенов Е., Резников С. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока // Силовая электроника. 2009. № 22. С. 74-78. EDN: MVRVQH.

5. Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 415 с.

6. Басовский В.Ф., Баско В.А., Брик Н.А. Устройства электропитания электронной аппаратуры / Под ред. В.Ф. Басовского. Киев: Техника, 1980. 239 с.

7. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03). М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. Серия 03. Выпуск 24. 192 с.

8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности». М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. Серия 08. Выпуск 19. 288 с.

9. Положение № 38/26 п. Ямбург о газовом промысле № 7 Газопромыслового управления. М., 2006. 98 с.

10. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1989. 599 с. ISBN: 5-283-01086-4.

11. Наумкин И.Б., Паскарь И.Н., Завьялов В.М. Влияние нелинейной нагрузки на качество электроэнергии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 4 (110). С. 75-82. EDN: UCUGOR.

12. РТМ 36.18.32.6-92. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1993. 53 с. <http://www.omegametal.ru/Index2/1/4293834/-4293834044.htm>.

13. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. М.: Издательский дом МЭИ, 2003. 221 с. ISBN 5704608744.

14. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. Нормы технологического проектирования. НТП ЭПП-94. М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», 1994. 69 с. <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/6e9/4294847066.pdf>.

15. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. Введ. 1985-01-07. М.: Изд-во стандартов, 2009. 47 с.

References

1. *Pravila ustroistva elektroustanovok: vse deistvuyushchie razdely PUE-6 i PUE-7* [Electrical Installation Rules: All Current Sections of PUE-6

and PUE-7]. Novosibirsk, Normatika Publ., 2014, pp. 342-344. <https://en-res.ru/wp-content/uploads/2020/02/pue.pdf>. [in Russian].

2. Shabanov V.A. *Proektirovanie elektro-snabzheniya ustanovok i predpriyatii neftyanoi otrasli* [Design of Power Supply for Installations and Enterprises of the Oil Industry]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2009. 224 p. EDN: VMEWJL. [in Russian].

3. Pashkin V.V. *Professional'nyi sbornik elektrotehnicheskogo personala gazovogo promysla* [Professional Collection of Electrical Personnel of the Gas Field]. Moscow-Pos. Yamburg, 2014. 173 p. [in Russian].

4. Bocharov V., Gurenkov N., Kornilov A., Parfenov E., Reznikov S. *Elektroenergeticheskaya i elektromagnitnaya sovместимость вторичных источников импульсного питания с автономными системами электроснабжения переменного тока* [Electrical Power and Electromagnetic Compatibility of Secondary Pulse Power Sources with Autonomous AC Power Supply Systems]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2009, No. 22, pp. 74-78. EDN: MVRVQH. [in Russian].

5. Gel'man M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskii K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika* [Conversion Technology]. Chelyabinsk, Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2009. 415 p. [in Russian].

6. Basovskii V.F., Basko V.A., Brik N.A. *Ustroistva elektropitaniya elektronnoi apparatury* [Power Supply Devices for Electronic Equipment]. Pod red. V.F. Basovskogo. Kiev, Tekhnika Publ., 1980. 239 p. [in Russian].

7. *Pravila ustroistva i bezopasnoi ekspluatatsii sosudov, rabotayushchikh pod davleniem (PB 03-576-03)*. [Rules for the Design and Safe Operation of Vessels Working under Pressure (PB 03-576-03)]. Moscow, Gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatие «Nauchno-tekhnicheskii tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii», 2003. Seriya 03. Vypusk 24. 192 p. [in Russian].

8. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v neftyanoi i gazovoi promyshlennosti»* [Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety «Safety Rules in the oil and Gas Industry»]. Moscow, Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovani problem promyshlennoi bezopasnosti», 2013. Seriya 08. Vypusk 19. 288 p. [in Russian].

9. *Polozhenie № 38/26 p. Yamburg o gazovom promysle № 7 Gazopromyslovogo upravleniya* [Regulation No. 38/26 p. Yamburg on Gas Field No. 7 of the Gas Field Administration]. Moscow, 2006. 98 p. [in Russian].

10. Neklepaev B.N., Kryuchkov I.P. *Elektricheskaya chast' elektrostantsii i podstantsii. Spravochnye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya* [Electrical Part of Power Plants and Substations. Reference Materials for Course and Diploma Design]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 599 p. ISBN: 5-283-01086-4. [in Russian].

11. Naumkin I.B., Paskar' I.N., Zav'yalov V.M. *Vliyanie nelineinoi nagruzki na kachestvo elektroenergii* [Effect Of Non-Linear Load Power Quality]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, No. 4 (110), p. 75-82. EDN: UCUGOR. [in Russian].

12. RTM 36.18.32.6-92. *Ukazaniya po proektirovaniyu ustanovok kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setyakh obshchego naznacheniya promyshlennykh predpriyatii. Instruktivnye i informatsionnye materialy po proektirovaniyu elektroustanovok* [RTM 36.18.32.6-92. Guidelines for the Design of Reactive Power Compensation Units in General-Purpose Electrical Networks of Industrial Enterprises. Instructional and Information Materials on the Design of Electrical Installations]. Moscow, VNIPI «Tyazhpromelektroproekt», 1993. 53 p. <http://www.omegametal.ru/Index2/1/4293834/4293834044.htm>. [in Russian].

13. Il'inskii N.F. *Osnovy elektroprivoda* [Basics of Electric Drive]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2003. 221 p. ISBN 5704608744. [in Russian].

14. *Proektirovanie elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya. NTP EPP-94* [Design of Power Supply of Industrial Enterprises. Technological Design Standards. NTP EPP-94]. Moscow, VNIPI «Tyazhpromelektroproekt», 1994. 69 p. <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/6e9/4294847066.pdf>. [in Russian].

15. *GOST 14209-85. Transformatory silovye maslyanye obshchego naznacheniya. Dopustimye nagruzki* [State Standard 14209-85. General-Purpose Oil-Immersed Power Transformers. Permissible Loads]. Vved.1985-01-07. Moscow, Izd-vo standartov, 2009. 47 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 30.08.2024; одобрена после рецензирования 09.09.2024; принята к публикации 11.09.2024.

The article was submitted 30.08.2024; approved after reviewing 09.09.2024; accepted for publication 11.09.2024.

Научная статья

УДК 622.276

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-80-88

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВАТТМЕТРОГРАММЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ ШТАНГОВОГО ГЛУБИННОГО НАСОСА В ДИНАМОГРАММУ

*Антон Николаевич Яшин**Anton N. Yashin**старший преподаватель кафедры**«Электротехника и электрооборудование предприятий»,**Уфимский государственный нефтяной технический университет,**Уфа, Россия*

Актуальность

Добыча углеводородов является одной из важнейших отраслей в структуре экономики России. Отрасль обеспечивает значительную часть валютных поступлений в экономику страны. Она также является одной из наиболее энергоемких, так как до 5 % всей вырабатываемой электроэнергии потребляется нефтедобывающими предприятиями.

В нашей стране штанговые глубинные насосы являются одним из основных типов скважинных насосов, уступая лишь установкам электроцентробежных погружных насосов по количеству эксплуатируемых скважин и объемам добываемой нефти.

Актуальной научной задачей является повышение эффективности установок штанговых глубинных насосов путем оптимизации режимов работы на основе измеренных динамограмм и ваттметрограмм. Математическое вычисление динамограммы по измеренному массиву значений активной мощности (ваттметрограммы) позволяет отказаться от установки датчиков динамометрирования, которые часто выходят из строя и требуют обслуживания.

Цель исследования

Исследовать взаимосвязь между усилиями в точке подвеса штанг и значениями потребляемой электроприводом активной мощности с учетом кинематической схемы станка-качалки, влияния инерционных масс и зависимости скорости вращения приводного электродвигателя от нагрузки.

Методы исследования

Для достижения заданной цели используются теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования основаны на положениях теоретической механики и теории дифференциальных уравнений. В исследованиях использовались программные продукты Matlab R2017b и Mathcad.

Результаты

Разработана модель для численного получения динамограммы из массива ваттметрограммы, которая позволяет отказаться от установки на станок-качалку физических датчиков динамометрирования, часто выходящих из строя из-за обрывов кабеля и механических повреждений.

Ключевые слова

штанговый глубинный насос,
динамометрирование,
ваттметрограмма,
математическая модель,
кинематическая схема

Для цитирования: Яшин А. Н. Преобразование ваттметрограммы электропривода установки штангового глубинного насоса в динамограмму // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 80-88. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-80-88>.

Original article

CONVERSION OF THE WATTMETROGRAM OF THE ELECTRIC DRIVE OF A SUCKER-ROD PUMP INTO A DYNAMOGRAM

Relevance

Hydrocarbon production is one of the most important sectors in the structure of the Russian economy. The sector provides a significant portion of foreign exchange earnings to the country's economy. It is also one of the most energy-intensive, since up to 5 % of all generated electricity is consumed by oil-producing enterprises.

In our country, rod sucker pumps are one of the main types of downhole pumps, second only to installations of electric submersible pumps in terms of the number of wells operated and the volume of oil produced.

An urgent scientific task is the development of devices to increase the efficiency of rod depth pumps.

Aim of research

The main aim to investigate the relationship between the forces at the suspension point of the rods and the values of the active power consumed by the electric drive, taking into account the kinematic diagram of the pumping unit, the influence of inertial masses and the dependence of the rotation speed of the drive electric motor on the load.

Research methods

Theoretical and experimental research methods are used to achieve this goal. Theoretical research is based on theoretical mechanics and the theory of differential equations. The following software products were used in the research: MatLab R2017b, Mathcad.

Results

Theoretical and experimental research methods are used to achieve this goal. Theoretical research is based on theoretical mechanics and the theory of differential equations. The following software products were used in the study: MatLab R2017b, Mathcad.

Keywords

sucker rod pump, dynamometer, wattmetrogram, mathematical model, kinematic scheme

For citation: Yashin A. N. Preobrazovaniye vattmetrogrammy elektroprivoda ustanovki shtangovogo glubinnogo nasosa v dinamogrammu [Conversion of the Wattmetrogram of the Electric Drive of a Sucker-Rod Pump into a Dynamogram]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 80-88 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-80-88>.

Добыча углеводородов является одной из важнейших отраслей в структуре экономики России. Отрасль обеспечивает значительную часть валютных поступлений в экономику страны. Она также является одной из наиболее энергоемких, так как до 5 % всей вырабатываемой

электроэнергии потребляется нефтедобывающими предприятиями [1].

Для предотвращения аварийных ситуаций, вызванных неисправностью внутрискважинного и наземного оборудования, необходим постоянный контроль состояния скважины. Необходимо также осуществлять диагностирование состоя-

ния нефтедобывающего оборудования и электрооборудования. Наиболее эффективными методами диагностирования скважин, оборудованных штанговыми глубинными насосами (ШГН), является анализ форм кривых ваттметрограмм и динамограмм. Данные методы называются ваттметрированием и динамометрированием соответственно [2].

Динамограмма представляет собой зависимость усилия на полированном штоке от его перемещения за цикл качания. Форма динамограммы характеризует состояние погруженного в скважину оборудования. По ваттметрограмме производят контроль и диагностирование наземного оборудования, в том числе и электропривода ШГН [3].

Ваттметрограммы и динамограммы между собой связаны сложными нелинейными уравнениями, анализ которых требует информации о значительном количестве параметров скважины и сопутствующего оборудования.

В данной статье описывается методика пересчета ваттметрограммы в динамограмму, составлена компьютерная модель в пакете Matlab Simulink.

В первую очередь, необходимо рассмотреть кинематическую схему станка-качалки, представленную на рисунке 1.

Для определения углов наклона линии шатун-кривошип к полюсной линии воспользуемся следующими формулами [4]:

$$\gamma_1 = \arccos \frac{1 + \left(\frac{l_2}{R_0}\right)^2 - \left(\frac{l+r}{R_0}\right)^2}{2 \cdot \frac{l_2}{R_0}}; \quad (1)$$

$$\gamma_0 = \arccos \frac{1 + \left(\frac{l_2}{R_0}\right)^2 - \left(\frac{l-r}{R_0}\right)^2}{2 \cdot \frac{l_2}{R_0}}, \quad (2)$$

где b_k — длина заднего плеча балансира;
 P_0 — расстояние до полюса;
 r — длина кривошипа.

Угол размаха балансира вычисляется по формуле:

$$\delta_{\max} = \gamma_1 - \gamma_0. \quad (3)$$

Модель определения углов наклона линии шатун-кривошип к полюсной линии и угла размаха балансира представлена на рисунке 2.

Длину хода точки подвеса штанг (ТПШ) можно вычислить по формуле [5]:

$$S_0 = a_k \cdot \delta_{\max}, \quad (4)$$

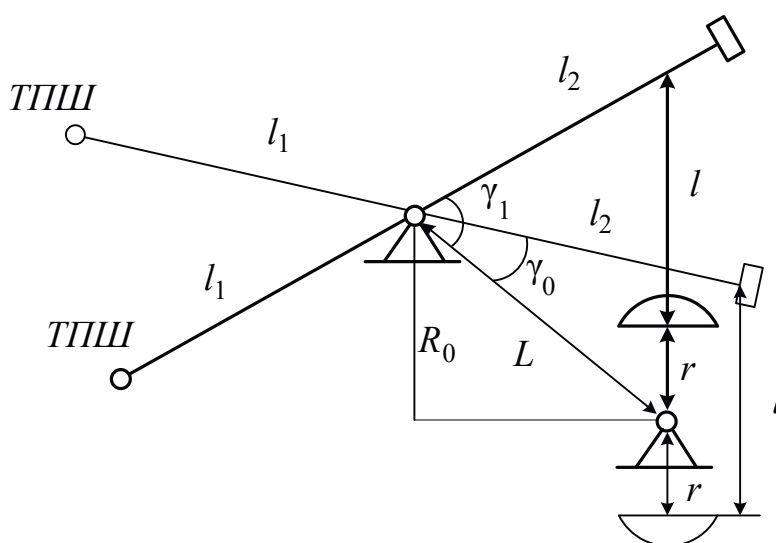


Рисунок 1. Кинематическая схема станка-качалки при комбинированном уравновешивании

Figure 1. Kinematic scheme of the rocking machine with combined balancing

где a_k — длина переднего плеча балансира.

Принимаем, что ТПШ совершает периодические во времени возвратно-поступательные перемещения по гармоническому закону [5]:

$$S(t) = \frac{S_0}{2} \cdot (1 - \cos(2\pi\omega t)), \quad (5)$$

где ω — частота колебаний.

Тогда скорость и ускорение перемещения точки подвеса штанг будут описываться следующими выражениями:

$$v(t) = \frac{\omega \cdot S_0}{2} \cdot \sin(2\pi\omega t); \quad (6)$$

$$a(t) = \frac{\omega^2 \cdot S_0}{2} \cdot \cos(2\pi\omega t). \quad (7)$$

На рисунке 3 представлена модель вычисления перемещения, скорости и ускорения ТПШ, основанная на выражениях (5)–(7).

Потребляемая электродвигателем (ЭД) мощность находится по следующей формуле [6]:

$$P(t) = P_{XX} + \frac{\omega_{\text{ЭД}}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}} \cdot n_{\text{ред.}} \cdot n_{\text{КП}}} \cdot M_{\text{кр.}}(t), \quad (8)$$

где P_{XX} — мощность холостого хода;

$\omega_{\text{ЭД}}$ — угловая скорость ротора ЭД;

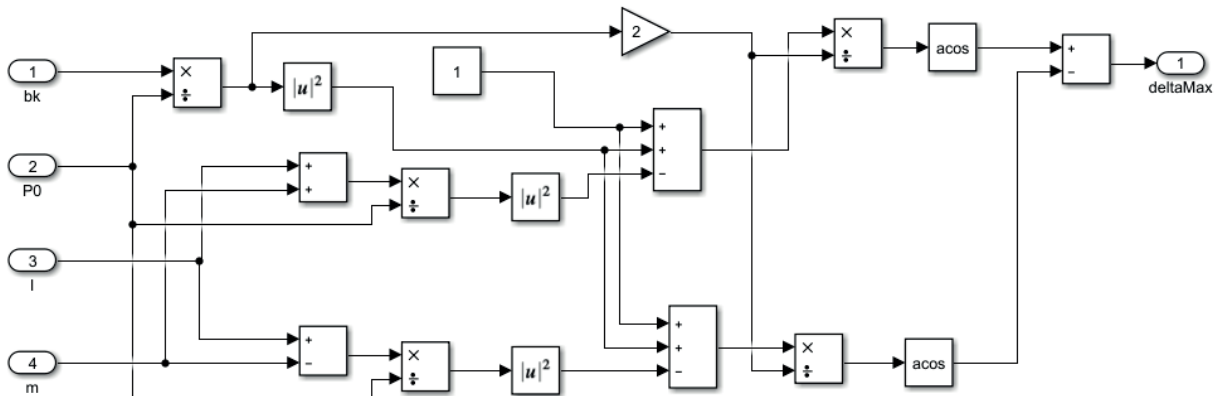


Рисунок 2. Модель вычисления угла размаха балансира

Figure 2. A model for calculating the swing angle of a balancer

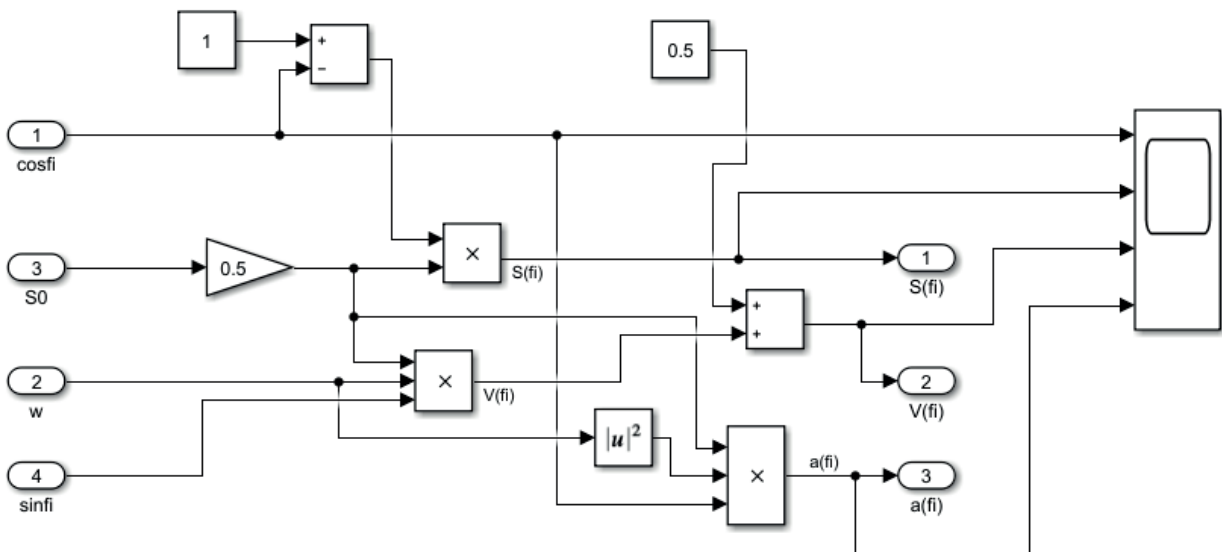


Рисунок 3. Модель вычисления перемещения, скорости и ускорения ТПШ

Figure 3. Model for calculating the displacement, velocity and acceleration of the rod suspension point

$\eta_{\text{ЭД}}$ — коэффициент полезного действия ЭД;

$\eta_{\text{пер.}}$ — коэффициент полезного действия передаточного механизма;

$n_{\text{ред.}}$ — передаточное число редуктора;

$n_{\text{КП}}$ — передаточное число клиноременной передачи.

Угловая скорость ротора ЭД равна:

$$\omega_{\text{ЭД}} = \omega \cdot n_{\text{ред.}} \cdot n_{\text{КП}}. \quad (9)$$

Момент на кривошипном валу редуктора вычисляется по формуле [7]:

$$M_{\text{кр.}}(t) = T(t) \cdot r, \quad (10)$$

где $T(t)$ — касательное усилие на валу ЭД.

Величина касательного усилия на вал ЭД описывается следующим выражением:

$$T(t) = \frac{a_k}{b_k} \cdot P_{\text{ТПШ}}(t) \cdot v(t) \cdot \frac{1}{\omega^2} - Q \cdot \frac{L_{\delta}}{b_k} \times \left(\cos \left(\frac{\delta_{\text{max}}}{2} - \delta \right) - \frac{L_{\delta}}{b_k} \cdot \frac{a(t)}{g} \right) - \frac{R}{r} \cdot Q_R \cdot \sin(2\pi\omega t), \quad (11)$$

где Q — вес сборки балансира;

Q_R — вес противовеса;

R — плечо противовеса;

L — расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения.

Подставив выражения (9)–(11) в выражение (8), получим:

$$P(t) = \frac{l_1}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot P_{\text{ТПШ}}(t) \cdot v(t) - G_{\delta} \times \frac{L \cdot \omega \cdot l_{\delta.2}}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot \left(\cos \left(\frac{\delta_{\text{max}}}{2} - \delta \right) - \frac{L \cdot a(t)}{l_2 \cdot g} \right) - \frac{\omega \cdot l_{\delta.2}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot G_{\delta.2} \cdot \sin(2\pi\omega t) + P_{\text{ХХ}}. \quad (12)$$

Расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения найдем методом эквивалентного момента балансира. Для этого необходимо учитывать вес балансира и вес балансирного противовеса [8]:

$$Q = G + Q_{\delta}, \quad (13)$$

где G — вес балансира;

Q_{δ} — вес балансирного противовеса.

Расстояние от центра тяжести сборки балансира до оси вращения вычисляется по формуле:

$$L_{\delta} = \frac{G \cdot (b_k - a_k) + 2 \cdot Q_{\delta} \cdot L}{2 \cdot (Q_{\delta} + G)}. \quad (14)$$

Мощность ЭД, затрачиваемая при движении противовеса, вычисляется по формуле [9]:

$$P_R(t) = \frac{\omega \cdot l_{\delta.2}}{\eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot G_{\delta.2} \cdot \sin(2\pi\omega t). \quad (15)$$

Мощность ЭД, затрачиваемая при движении сборки балансира, вычисляется по формуле [10]:

$$P_{\delta}(t) = \frac{G_{\delta} \cdot L \cdot \omega \cdot l_{\delta.2}}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot \left(\cos \left(\frac{\delta_{\text{max}}}{2} - \frac{S(t)}{l_1} \right) - \frac{L \cdot a(t)}{l_2 \cdot g} \right). \quad (16)$$

На рисунке 4 представлена модель, которая позволяет вычислить мощности ЭД, затрачиваемые на движение противовеса и сборки балансира.

Преобразовав выражение (12) относительно $P_{\text{ТПШ}}(t)$ и подставив в него выражения (14)–(16), получим:

$$P_{\text{ТПШ}}(t) = \frac{P(t) - P_{\text{ХХ}} + P_{\delta}(t) + P_R(t)}{\frac{l_1}{l_2 \cdot \eta_{\text{ЭД}} \cdot \eta_{\text{пер.}}} \cdot v(t)}. \quad (17)$$

Выражение (17) показывает связь между усилием нагрузки на полированный шток и мощностью, затрачиваемой электродвигателем в период цикла качания. Данное выражение позволяет сделать пересчет ваттметрограммы в динамограмму с учетом всех необходимых параметров скважины и ее оборудования [11].

Итоговая модель для преобразования ваттметрограммы в динамограмму представлена на рисунке 5.

На рисунке 6 представлена исходная ваттметрограмма. Данные для ваттметрограммы задаются с помощью блока From Workspace. Исходными данными были показания мощностей с эксплуатируемой скважины. Для сравнения расчетных результатов с эксперименталь-

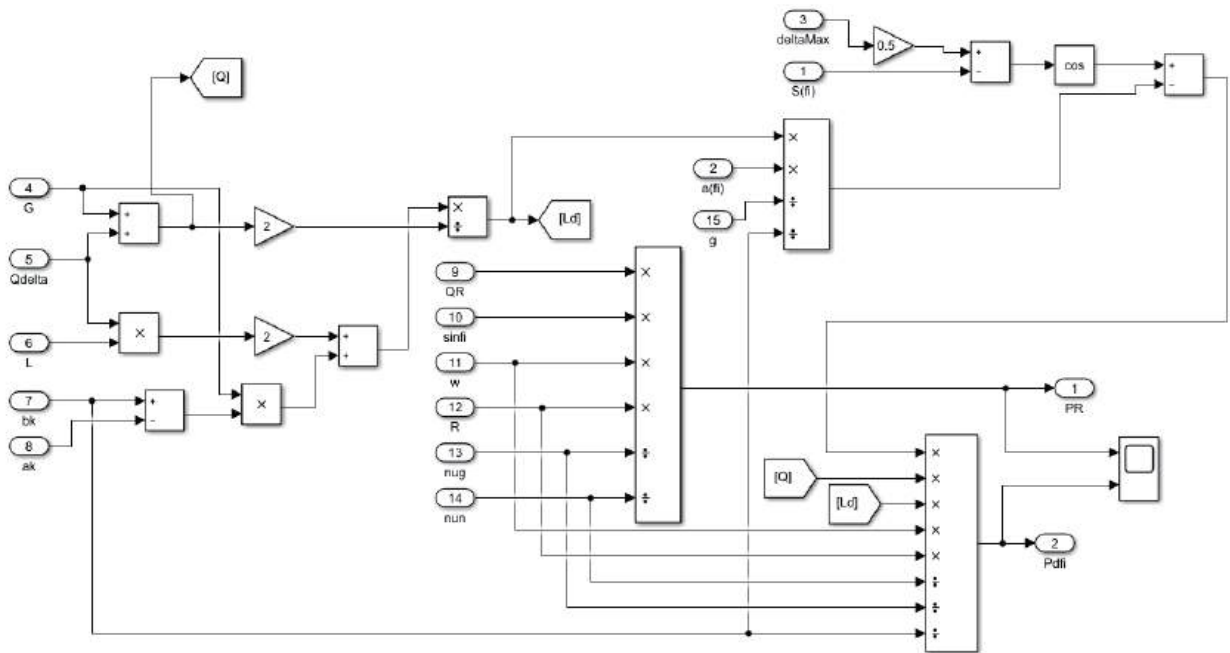


Рисунок 4. Модель вычисления мощности ЭД, затрачиваемой при движении противовеса и сборки балансира

Figure 4. A model for calculating the motor power expended during the movement of the counterweight and the assembly of the balancer

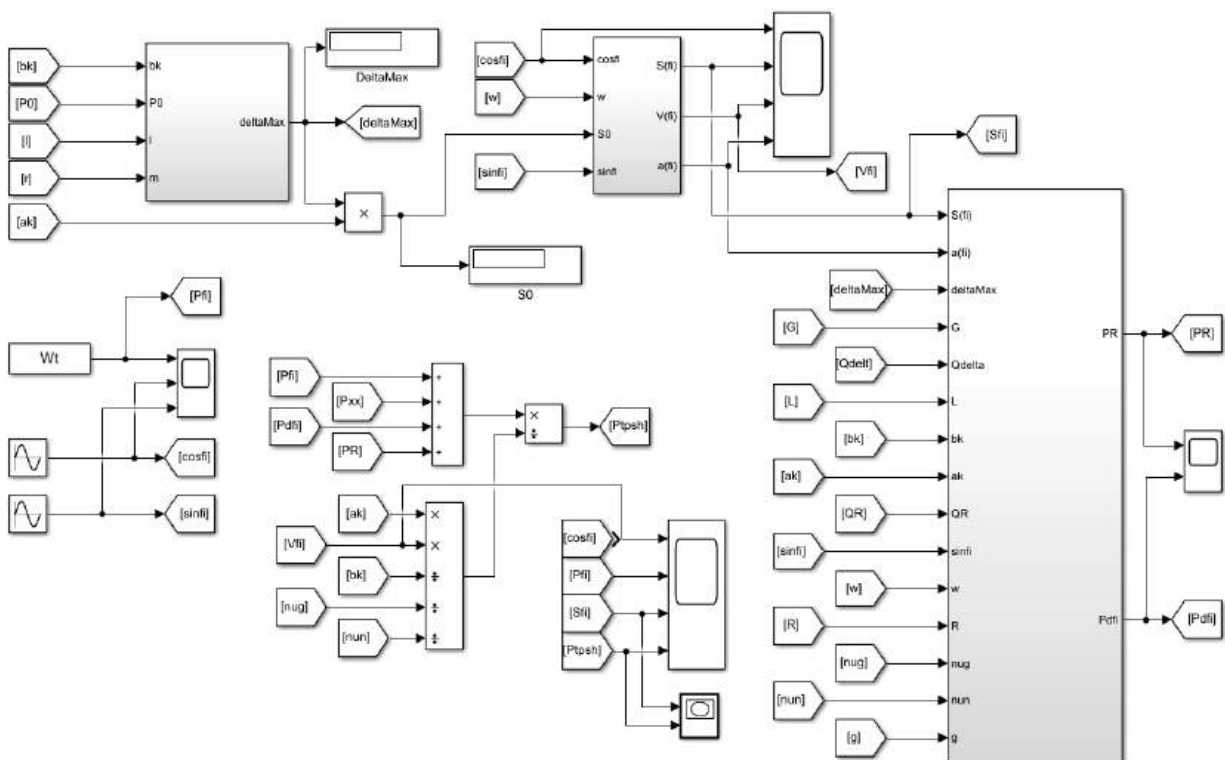


Рисунок 5. Matlab-модель преобразования ваттметрограммы в динамограмму

Figure 5. Matlab model for converting a wattmetrogram into a dynamogram

ными также была запрошена динамограмма той же скважины за соответствующий цикл качания.

Результатом моделирования является динамограмма, полученная блоком XY Graf. На рисунке 7 представлена динамограмма, полученная по результатам моделирования.

Полученная в ходе моделирования динамограмма сравнивалась с реальными показаниями эксплуатируемой скважины, в результате чего показания отличались максимум на 5 %. Из этого можно сделать вывод, что данная модель составлена правильно, и ее можно использовать для пересчета ваттметрограмм в динамограммы.

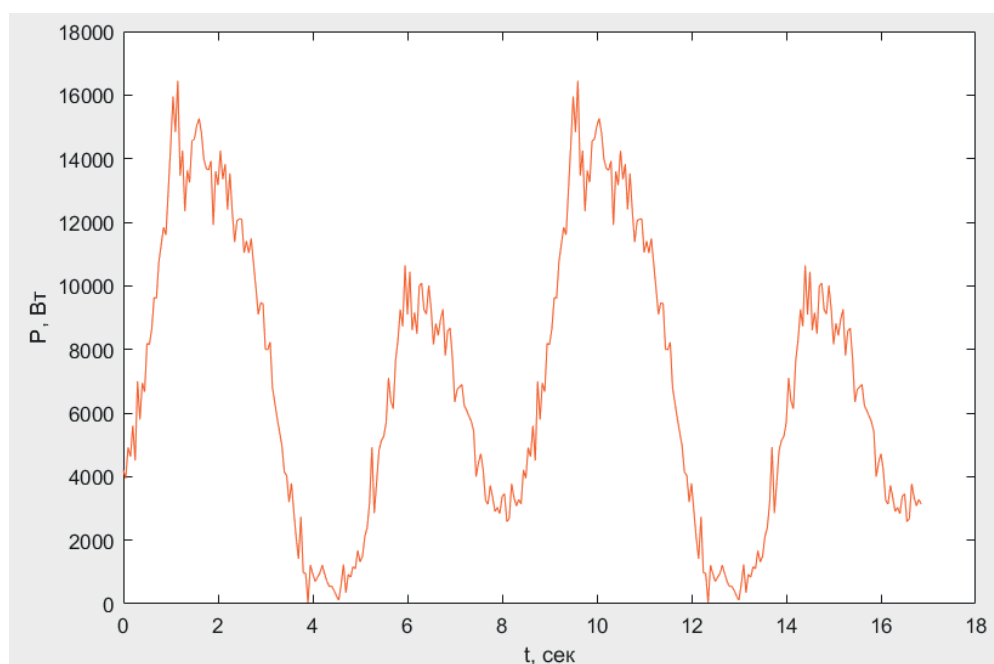


Рисунок 6. Исходная ваттметрограмма

Figure 6. The original wattmetrogram

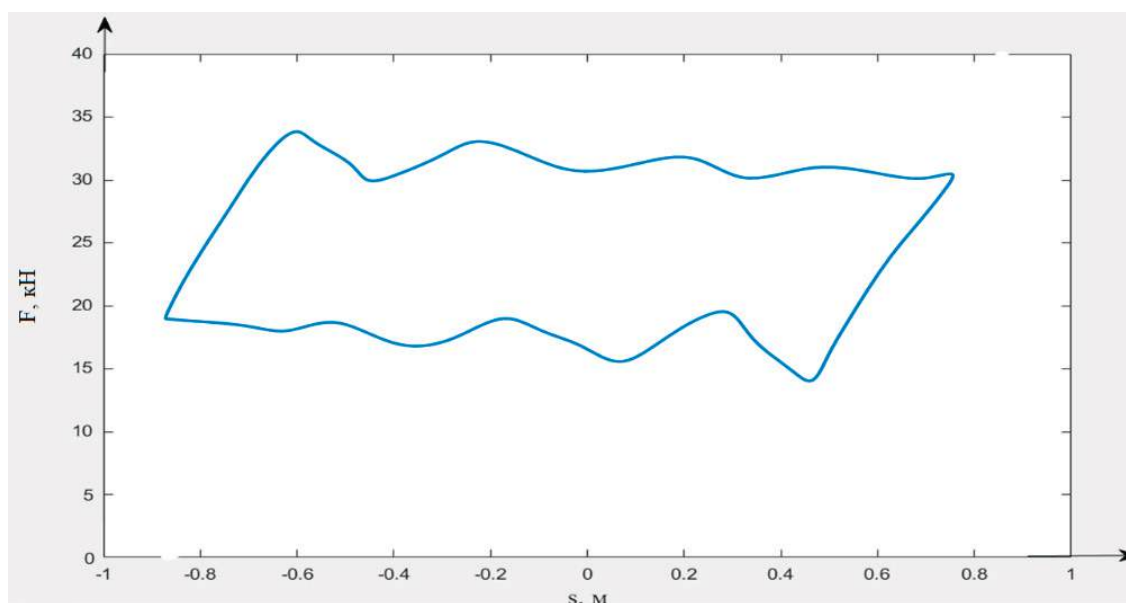


Рисунок 7. Динамограмма, полученная по результатам моделирования

Figure 7. Dynamogram obtained from the simulation results

Выводы

1. В результате исследования взаимосвязи между значениями усилия в точке подвеса штанг установки ШГН и значениями активной мощности, потребляемой электроприводом, разработана модель для численного получения динамограммы из массива ваттметрограммы, отличающаяся тем, что учитывает кинематическую схему станка-качалки, влияние инерционных масс и изменение скорости вращения приодного электродвигателя в зависимости от загрузки.

2. Модель для численного получения динамограммы из массива ваттметро-

граммы позволяет отказаться от использования на установке ШГН физических датчиков динамометрирования, часто выходящих из строя из-за обрывов кабеля и механических повреждений.

3. Полученная в ходе моделирования динамограмма сравнивалась с реальными показаниями эксплуатируемой скважины, показания отличались не более чем на 5 %. Из этого можно сделать вывод, что данная модель корректна и может быть использована для пересчета массива ваттметрограммы в динамограмму.

Список источников

1. Афанасьева А.А., Нестерин В.А., Генин В.С., Матюнин А.Н., Романов Р.А. Повышение эффективности электропривода станка-качалки нефти // *Электротехника*. 2018. № 8. С. 24-28. EDN: XTDNKKX.

2. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F., Semisynov R.A., Bezryadnova E.A. Monitoring of Sucker-Rod Pump Units as a Result of the Analysis Wattmeter Cards. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 803. No. 1. 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012066. EDN: YKDIWH.

3. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Shafikov I.N. Energy Efficiency of Well Electric Submersible Pumps for Oil Production // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. Vol. 537. No. 6. P. 062006. DOI:10.1088/1757-899X/537/6/062006.

4. Dave M.K., Mustafa M.G. Performance Evaluations of the Different Sucker Rod Artificial Lift Systems // Paper presented at the SPE Symposium: Production Enhancement and Cost Optimization, Kuala Lumpur, Malaysia, November 2017. 2017. DOI: 10.2118/189231-MS.

5. Алиев Т.А., Гулуев Г.А., Рзаев А.Г., Алиев Я.Г., Резван М.Х., Яшин А.Н. Ways to Increase the Efficiency of Sucker Rod Pump Units in Oil Production // *Journal of Engineering Research and Sciences*. 2022. Vol. 1, No. 3.

6. Бодылев А.С., Яшин А.Н., Конев А.А., Хакимьянов М.И. О методах контроля режимов работы электроприводов скважинных нефтедобывающих насосов // *Завалишинские чтения — 2023: сб. докл. XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике*. Санкт-Петербург,

2023. С. 164-169. DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-164-169. EDN: FPHDOA.

7. Рзаев А.Г., Резван М.Г., Хакимьянов М.И., Шафиков И.Н. Современное состояние автоматизации установок механизированной добычи нефти на территории СНГ // *Известия НАНА, серия физико-технических и математических наук*. 2013. Т. XXIII, № 6. С. 177-187.

8. Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Чикишев А.М., Максимов Н.С., Почуев А.И. Контроллеры автоматизации установок штанговых глубинных насосов // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2007. № 1. С. 44-56. URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_3.pdf. EDN: RPFABB.

9. Yashin A.N., Khakimyanov M.I. Investigation of the Frequency-Controlled Electric Drive of the Gas Air Cooling Units // *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 23-25 September 2022, Magnitogorsk, Russian Federation. Magnitogorsk, 2022.

10. Yashin A.N., Konev A.A., Khakimyanov M.I. Power Supply of the Sucker Rod Pump Unit Electric Drive Using Renewable Energy Sources // *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS): The International Scientific and Practical Conference Materials*, 16–18 November 2021, Ufa, Russia / USATU. Уфа, 2021. P. 43-46.

11. Yashin A.N., Konev A.A., Khakimyanov M.I. Smart Well Concept in Oil Production // *Smart Innovation, Systems and Technologies: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings» (ER(ZR) 2021)*, St. Petersburg, Russia, 14–17 April 2021. 2022. Vol. 232. P. 403-414.

References

1. Afanas'eva A.A., Nesterin V.A., Genin V.S., Matyunin A.N., Romanov R.A. Povyshenie effektivnosti elektroprivoda stanka-kachalki nefti [Increasing the Efficiency of the Electrical Drive of an Oil Rocking Machine]. *Elektrotehnika — Russian Electrical Engineering*, 2018, No. 8, pp. 24-28. EDN: XTDNKX. [in Russian].
2. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F., Semisynov R.A., Bezryadnova E.A. Monitoring of Sucker-Rod Pump Units as a Result of the Analysis Wattmeter Cards. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 803, No. 1, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012066. EDN: YKDIWH.
3. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Shafikov I.N. Energy Efficiency of Well Electric Submersible Pumps for Oil Production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, Vol. 537, No. 6, pp. 062006. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062006.
4. Dave M.K., Mustafa M.G. Performance Evaluations of the Different Sucker Rod Artificial Lift Systems. *Paper presented at the SPE Symposium: Production Enhancement and Cost Optimization, Kuala Lumpur, Malaysia, November 2017*. 2017. DOI: 10.2118/189231-MS.
5. Aliev T.A., Guluev G.A., Rzaev A.G., Aliev Ya.G., Rezvan M.Kh., Yashin A.N. Ways to Increase the Efficiency of Sucker Rod Pump Units in Oil Production. *Journal of Engineering Research and Sciences*, 2022, Vol. 1, No. 3.
6. Bodylev A.S., Yashin A.N., Konev A.A., Khakim'yanov M.I. O metodakh kontrolya rezhimov raboty elektroprivodov skvazhinnykh neftedobyvayushchikh nasosov [About Operating Modes Control Methods of Downhole Oil-Producing Pumps Electric Drives]. *Sbornik dokladov XVII Mezhdunarodnoy konferentsii po elektromekhanike i robototekhnike «Zavalishinskie chteniya — 2023»* [Collection of Reports of XVII International Conference on Electromechanics and Robotics [«Zavalishinsky Readings — 2023»]. Saint-Petersburg, 2023, pp. 164-169. DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-164-169. EDN: FPHDOA. [in Russian].
7. Rzaev A.G., Rezvan M.G., Khakim'yanov M.I., Shafikov I.N. Sovremennoe sostoyanie avtomatizatsii ustanovok mekhanizirovannoi dobychi nefti na territorii SNG [The Current State of automation of Mechanized Oil Production Facilities in the CIS]. *Izvestiya NANA, seria fiziko-tekhnicheskikh i matematicheskikh nauk — Proceedings of ANAS, a Series of Physical, Technical and Mathematical Sciences*, 2013, Vol. XXXIII, No. 6, pp. 177-187. [in Russian].
8. Khakim'yanov M.I., Kovshov V.D., Chikishev A.M., Maksimov N.S., Pochuev A.I. Kontrolyer avtomatizatsii ustanovok shtangovykh glubinnnykh nasosov [Automation Controllers for the Installation of Rod Depth Pumps]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2007, No. 1, pp. 44-56. URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Hakimyanov/Hakimyanov_3.pdf. EDN: RPFABB. [in Russian].
9. Yashin A.N., Khakimyanov M.I. Investigation of the Frequency-Controlled Electric Drive of the Gas Air Cooling Units. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 23-25 September 2022, Magnitogorsk, Russian Federation*. Magnitogorsk, 2022.
10. Yashin A.N., Konev A.A., Khakimyanov M.I. Power Supply of the Sucker Rod Pump Unit Electric Drive Using Renewable Energy Sources. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS): The International Scientific and Practical Conference Materials, 16-18 November 2021, USATU, Ufa, Russia*. Ufa, 2021, pp. 43-46.
11. Yashin A.N., Konev A.A., Khakimyanov M.I. Smart Well Concept in Oil Production. *Smart Innovation, Systems and Technologies: Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings» (ER(ZR) 2021), Saint-Petersburg, Russia, 14-17 April 2021*. 2022, Vol. 232, pp. 403-414.

Статья поступила в редакцию 03.09.2024; одобрена после рецензирования 17.09.2024; принята к публикации 24.09.2024.

The article was submitted 03.09.2024; approved after reviewing 17.09.2024; accepted for publication 24.09.2024.

Научная статья

УДК 502.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-89-97

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОПОСРЕДОВАННЫМИ ВЫБРОСАМИ КАМПУСА

**Екатерина Сергеевна Кулакова****Ekaterina S. Kulakova**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

**Асель Марсовна Батыркаева****Asel M. Batyrkaeva**

ассистент кафедры «Экоинжиниринг, природообустройство и экологические технологии»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Актуальность

В данной работе рассмотрено использование нейросетевого регулирования, которое позволяет системе самостоятельно определять уровень выбросов углекислого газа и предлагать оптимальное количество зеленых насаждений для поглощения этого газа. Данное решение позволит оптимизировать использование ресурсов, таких как энергия и вода, в кампусе и снизить выбросы углекислого газа в атмосферу, тем самым снижая экологическую нагрузку на окружающую среду и создавая более здоровую и безопасную среду для жизни и работы.

Цель исследования

Разработать интеллектуальную модель углеродно-нейтрального кампуса на базе нейронной сети в среде PyCham.

Методы исследования

На этапе разработки нейронной сети использовалась интегрированная среда PyTorch на языке Python. Структура нейросети определена классом NeuralNet, который является наследником nn.Module из библиотеки PyTorch. Архитектура нейросети состоит из трех полносвязных (линейных) слоев. В качестве активационных функций используются ReLU (Rectified Linear Unit), Tanh (гиперболический тангенс) и Sigmoid. После обучения нейронной сети необходимо оценить ее точность, используя тестовую выборку. Это может включать использование метрик, таких как точность, F-мера и AUC-ROC.

Результаты

Разработана математическая модель нейросетевого расчета углеродного следа в программе Python – PyTorch. Проведено ее обучение и тестирование для определения углеродного следа кампуса.

Ключевые слова

углеродная нейтральность, нейросетевая модель, углеродный след, интеллектуальные системы, интегрированная среда PyCharm

Благодарности: Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»).

Для цитирования: Кулакова Е. С., Батыркаева А. М. Интеллектуальная система управления опосредованными выбросами кампуса // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 89-97. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-89-97>.

Original article

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF CAMPUS INDIRECT EMISSIONS

Relevance

This paper considers the use of neural network regulation, which allows the system to autonomously determine the level of carbon dioxide emissions and suggest the optimal amount of green space to absorb this gas. This solution will optimize the use of resources such as energy and water in the campus and reduce the carbon dioxide emissions into the atmosphere, thereby reducing the ecological burden on the environment and creating a healthier and safer living and working environment.

Aim of research

The main aim of the research to develop an intelligent model of carbon neutral campus based on neural network in PyCham environment.

Research methods

At the stage of neural network development the integrated environment PyTorch in Python language was used. The neural network structure is defined by the NeuralNet class, which is an inheritor of nn.Module from the PyTorch library. The neural network architecture consists of three fully-connected (linear) layers. ReLU (Rectified Linear Unit), Tanh (hyperbolic tangent) and Sigmoid are used as activation functions. After training the neural network, it is necessary to evaluate its accuracy using a test sample. This may include the use of metrics such as accuracy, F-measure and AUC-ROC.

Results

A mathematical model of neural network calculation of carbon footprint in Python program — PyTorch was developed. It was trained and tested to determine the carbon footprint of the campus.

Keywords

carbon neutrality, neural network model, carbon footprint, intelligent systems, integrated PyCharm environment

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «PRIORITY 2030» (National Project «Science and University»).

For citation: Kulakova E. S., Batyркаева A. M. Intel'ektual'naya sistema upravleniya oposredovannymi vybrosami kampusa [Intelligent Control System of Campus Indirect Emissions]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 89-97 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-89-97>.

Проблемы, связанные с изменением климата и загрязнением окружающей среды, становятся все более острыми и требуют разработки новых технологий и подходов к их решению. Углеродно-

нейтральный кампус является одним из примеров таких подходов, направленных на сокращение выбросов углекислого газа и других вредных веществ путем

эффективного использования энергии и других ресурсов [1].

Ещё 10 лет назад понятие «углеродная нейтральность» было известно разве что экспертам-климатологам, читающим специализированные научные журналы. Сегодня без упоминания этого термина не обходится почти ни одно обсуждение глобальной проблемы изменения климата.

Принцип углеродной нейтральности положен в основу климатической политики большинства стран мира, каждая из которых взяла на себя обязательство в ближайшие несколько десятилетий полностью прекратить выбросы парниковых газов.

Углеродная нейтральность означает, что все выбросы диоксида углерода, т.е. углекислого газа или его аналогов, которые в процессе производства выбрасывает в атмосферу то или иное предприятие (домохозяйство), компенсируются за счет реализации углеродно-негативных проектов, т.е. таких проектов, при которых углекислый газ поглощается из атмосферы. Это может быть связано с посадкой естественных или искусственных лесов или поддержкой лесных сообществ [2].

Учёные признают, что полностью отказаться от выбросов в атмосферу парниковых газов невозможно. Однако в теории – весь выброс CO_2 можно «компенсировать», отфильтровав его в том же количестве прямо из воздуха (и сохранив в твёрдой форме).

Компенсацию можно производить естественным способом – путём высадки новых деревьев и восстановления торфяников. А можно и промышленным – за счёт фильтрации воздуха от излишков CO_2 и захоронения углерода глубоко под землёй [3].

Целью работы является разработка интеллектуальной системы углеродно-нейтрального кампуса на базе нейрон-

ной сети в среде Trace Mode 7 с применением технологий OPC (OLE for Process Control). В данной работе использование нейросетевого регулирования позволяет системе самостоятельно определять уровень выбросов углекислого газа и предлагать оптимальное количество зеленых насаждений для поглощения этого газа.

Разработка концептуального проекта на основе нейросетевого регулирования

Для реализации проекта проведен анализ существующих технологий и решений, которые могут быть использованы для достижения углеродной нейтральности. Для разработки концептуального проекта необходимо определить набор параметров, которые будут использоваться системой управления. Эти параметры включают в себя данные о потреблении энергии, прогнозы погоды, данные об энергетической эффективности зданий и другие факторы, которые могут влиять на работу системы управления.

Следующим этапом разработки является обучение нейронной сети, которая будет определять количество углеродного следа. Обычно обучение происходит через многократное прохождение обучающих данных через нейронную сеть [4]. После того, как нейронная сеть обучена, необходимо оценить ее точность, используя тестовую выборку. Это может включать использование метрик, таких как точность, F-мера и AUC-ROC [5, 6].

Объектом математического моделирования является «кампус».

Входными переменными являются потребление электроэнергии зданием, потребление холодного и горячего водоснабжения, потребление тепловой энергии зданием, потребление топлива, общее количество персонала.

Выходной переменной для нейросетевого расчета углеродного следа кампуса

будет уровень выбросов углерода в атмосферу. Она будет представлена в виде числового значения, которое будет оценивать уровень углеродного следа кампуса в текущий момент времени на основе входных данных, и количество зеленых насаждений, которые необходимо посадить на территории кампуса для компенсации углеродного следа.

Разработка и обучение нейросетевой модели

Для разработки нейронной сети использовалась интегрированная среда PyTorch на языке Python.

На рисунке 1 представлена схема входных и выходных параметров.

Для обучения нейросети необходимо собрать данные об углеродном следе организации (таблица 1). Эти данные могут включать в себя информацию о затратах на энергию, транспортировку, материалы и т.д.

Входные переменные представлены в таблице 2, выходные — в таблице 3.

После сбора данных необходимо разработать алгоритм расчета, который будет использоваться нейросетью. Этот алгоритм должен учитывать все факторы, влияющие на углеродный след организации.



Рисунок 1. Схема входных и выходных параметров полносвязной нейронной сети по определению углеродного следа кампуса

Figure 1. Schematic of input and output parameters of a fully-connected neural network on campus carbon footprint determination

Таблица 1. Опросный лист об углеродном следе организации

Table 1. Organizational carbon footprint questionnaire

Позиция	Единицы измерения
Площадь здания/помещения	19907,8 м ²
Расход топлива на содержание автопарка:	
Бензин АИ-95	369 л/мес.
Дизель	147 л/год
Потребляемые энергоресурсы:	
Электроснабжение	22794,5 кВт·ч/мес.
Горячее водоснабжение	73,5 м ³ /мес.
Холодное водоснабжение	919,5 м ³ /мес.
Отопление	454,5 Гкал/мес.

Таблица 2. Входные переменные**Table 2.** Input variables

№	Потребление электроэнергии	Потребление холодной воды	Потребление горячей воды	Потребление отопления	Потребление топлива (бензин)	Потребление топлива (дизель)	Площадь территории
1	10907	653	63	215	369	147	6000
2	10916,51	653,2132	63,0084	215,1916	369,2952	147,1164	6000
3	10926,02	653,4264	63,0168	215,3832	369,5904	147,2328	6000
4	10935,53	653,6396	63,0252	215,5748	369,8856	147,3492	6000
5	10945,04	653,8528	63,0336	215,7664	370,1808	147,4656	6000
6	10954,55	654,066	63,042	215,958	370,476	147,582	6000
7	10964,06	654,2792	63,0504	216,1496	370,7712	147,6984	6000
8	10973,57	654,4924	63,0588	216,3412	371,0664	147,8148	6000
9	10983,08	654,7056	63,0672	216,5328	371,3616	147,9312	6000
10	10992,59	654,9188	63,0756	216,7244	371,6568	148,0476	6000
11	11002,1	655,132	63,084	216,916	371,952	148,164	6000
12	11011,61	655,3452	63,0924	217,1076	372,2472	148,2804	6000
13	11021,12	655,5584	63,1008	217,2992	372,5424	148,3968	6000
14	11030,63	655,7716	63,1092	217,4908	372,8376	148,5132	6000
15	11040,14	655,9848	63,1176	217,6824	373,1328	148,6296	6000
16	11049,65	656,198	63,126	217,874	373,428	148,746	6000
17	11059,16	656,4112	63,1344	218,0656	373,7232	148,8624	6000
18	11068,67	656,6244	63,1428	218,2572	374,0184	148,9788	6000
19	11078,18	656,8376	63,1512	218,4488	374,3136	149,0952	6000
...							
2496	34624,94	1184,7208	83,9496	692,8504	1105,2288	437,3016	6000
2497	34634,45	1184,934	83,958	693,042	1105,524	437,418	6000
2498	34643,96	1185,1472	83,9664	693,2336	1105,8192	437,5344	6000
2499	34653,47	1185,3604	83,9748	693,4252	1106,1144	437,6508	6000
2501	34662,98	1185,5736	83,9832	693,6168	1106,4096	437,7672	6000
2502	34672,49	1185,7868	83,9916	693,8084	1106,7048	437,8836	6000

Таблица 3. Выходные переменные**Table 3.** Output variables

Выходные переменные	Значение, т CO ₂ -экв/мес.
Уровень углеродного следа	0–10000

Структура нейросети определена классом `NeuralNet`, который является наследником `nn.Module` из библиотеки `PyTorch` [7]. Архитектура нейросети состоит из трех полносвязных (линейных) слоев.

В качестве активационных функций используются `ReLU` (Rectified Linear Unit), `Tanh` (гиперболический тангенс) и `Sigmoid`.

После завершения обучения модели ее веса сохраняются в файл для дальнейшего использования. Строятся графики функций потерь (`MAE` и `MSE`) в зависимости от количества эпох для визуального анализа качества обучения.

Код реализует нейронную сеть (рисунок 2) для определения оптимальной комбинации деревьев на основе данных об углеродном следе и площади посадки. В процессе обучения используются методы градиентного спуска и обратного распространения ошибки [8]. Гиперпараметры, такие как количество эпох, размер батча и скорость обучения, настраиваются для оптимальной произ-

водительности, также проводится вычисление наилучшей комбинации деревьев с использованием метода перебора.

Разработана блок-схема алгоритма вычисления углеродного следа (рисунок 3). Она включает основные шаги выполнения функции `calculateThree` и начинается с инициализации переменных, затем вычисляет суммарный углеродный след (`summCO2`) с помощью функции `calculate_summCO2(data)`. Далее устанавливается размер шага (если он не был указан пользователем), затем генерируются все возможные комбинации деревьев с помощью `itertools.combinations`. Затем функция вычисляет разницу между `summCO2` и суммой углеродного следа для каждой комбинации деревьев. Если новая разница меньше предыдущей, обновляется идеальная комбинация. Если разница слишком большая, размер шага уменьшается, и процесс повторяется. В конце функция возвращает идеальную комбинацию деревьев и соответствующий углеродный след.

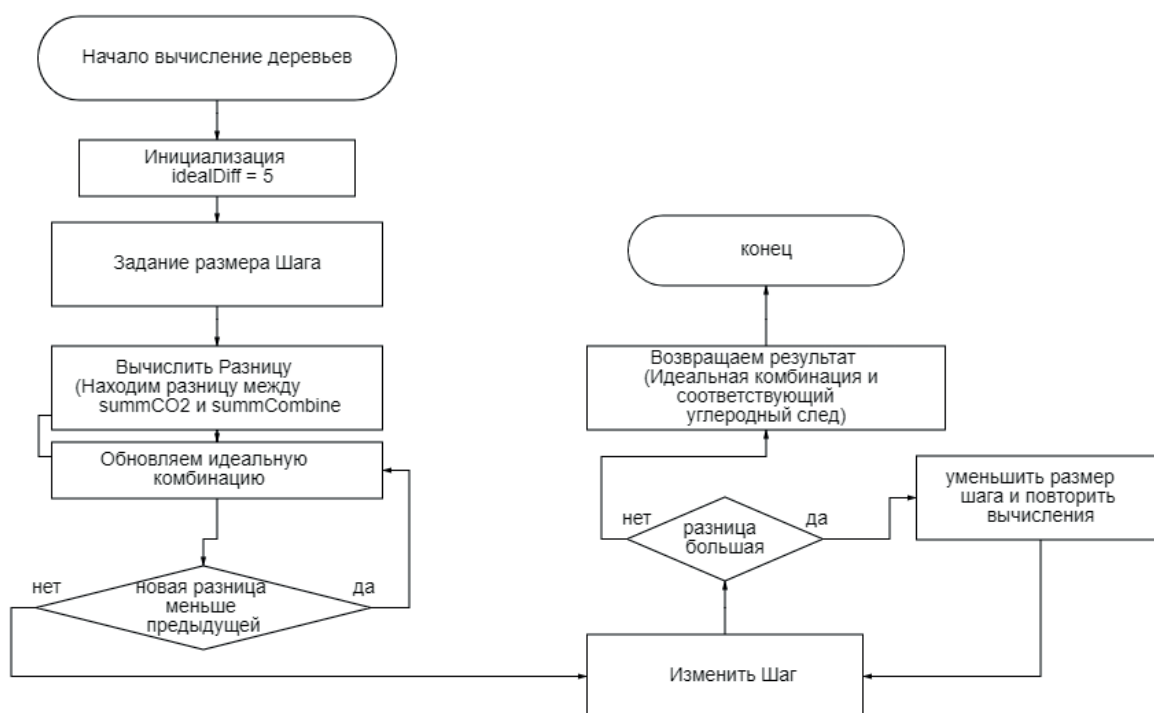


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма вычисления количества деревьев

Figure 2. Block diagram of tree calculation algorithm

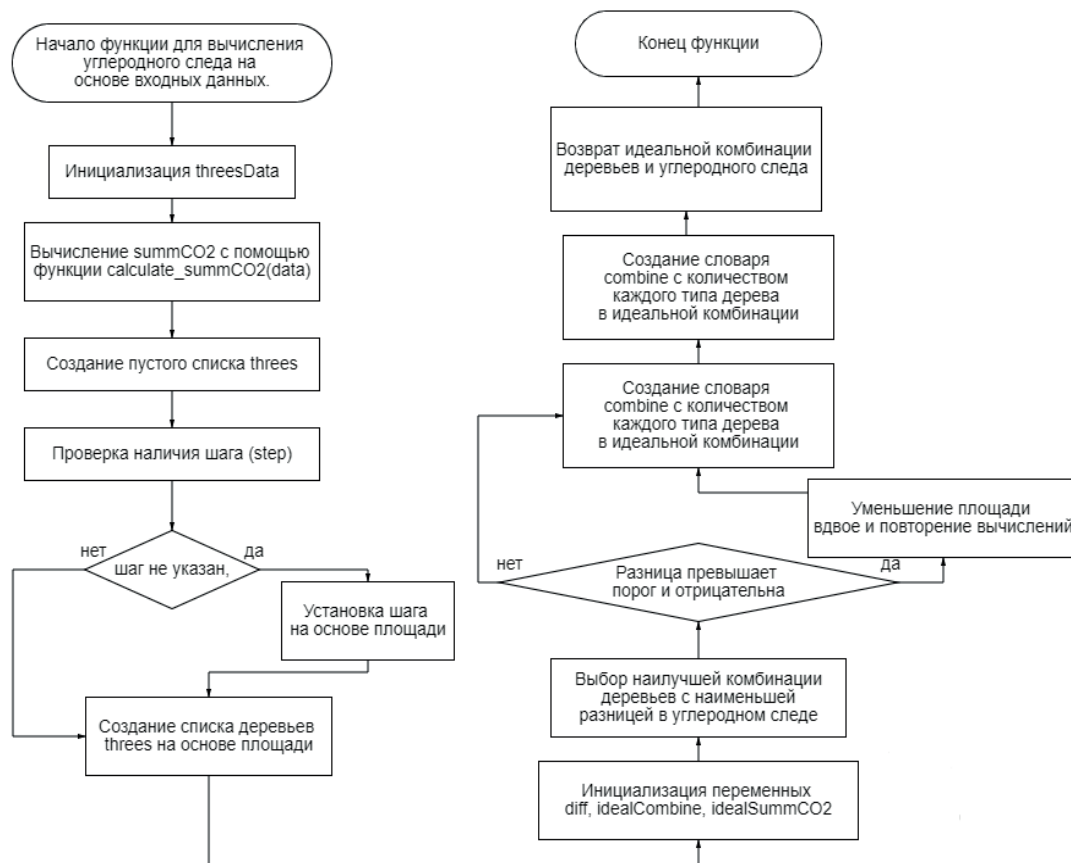


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма вычисления углеродного следа

Figure 3. Block diagram of the algorithm for calculating the carbon footprint

Создаются параметры объекта, такие как «electric», «coldWater», «hotWater», «heating», «petrol», «diesel» и «square».

Каждый параметр имеет предельные значения, имя, текущее значение и единицу измерения. В цикле запрашивается ввод пользователя для каждого параметра объекта. Введенные значения сохраняются в структуре данных data. Если пользователь вводит значение, которое находится в пределах допустимого диапазона, программа сохраняет это значение. Программа вычисляет углеродный след на основе введенных данных, используя функцию `calculate_summCO2()`. Полученное значение углеродного следа выводится на экран.

Программа переходит к расчету необходимого решения (НС) для получен-

ного углеродного следа. Функция `calculateThree()` вызывается для определения идеальной комбинации деревьев, которая сбалансирует углеродный след. Функция `runModel()` вызывается для тестирования модели нейронной сети, используя введенные параметры и определенную комбинацию деревьев.

На рисунке 4 представлен результат работы НС.

Модель (рисунок 4) предсказала наилучшую комбинацию деревьев для снижения углеродного следа. В данном случае модель предсказала, что оптимальной комбинацией деревьев будет использование 81 га осины, 89 га дуба, 378 га сосны, 19 га ели, 11 га кедра, 22 га лиственницы. Общий углеродный след для этой комбинации составил 1640.0.

Параметры нейронной сети загружены
 Введите количество Электричество (кВт*ч/мес) (10907-34682): 10907
 Введите количество Холдная вода (м³/мес) (653-1186): 653
 Введите количество Горячая вода (м³/мес) (63-84): 63
 Введите количество Отопление (ГКал/мес) (215-694): 215
 Введите количество Бензин (л/мес) (1-99999): 369
 Введите количество Дизель (л/мес) (1-99999): 147
 Введите количество Площадь посадок (га) (10-9999999999): 6000
 Углеродный след равен 1640.4789910282695
 Расчет НС
 Рекомендуется посадить:
 81 Га Осины
 89 Га Дуба
 378 Га Сосны
 19 Га Ели
 11 Га Кедрa
 22 Га Лиственницы
 В этом случае будет достигнуто количество поглощения CO₂ до 1580.9999999999998 тонн в год

Рисунок 4. Результат работы нейронной сети

Figure 4. The result of the neural network

Вывод

В результате работы разработана математическая модель нейросетевого расчета углеродного следа. Проведено ее обучение и тестирование для определения углеродного следа кампуса. Разработка нейронной сети произведена в программе Python – PyTorch. Искусственная нейронная сеть обучена, проверена и протестирована на 46656 примерах. В результате обучения получена нейронная сеть, которая формирует выходные сигналы с минимальной

погрешностью при подаче на вход сети любого набора входных данных из обучающего множества. Для подтверждения работоспособности полученной сети было проведено ее тестирование, которое показало, что разработанная нейронная сеть является работоспособной. Разработаны алгоритм и модель совместной работы расчета углеродного следа кампуса. Модель позволяет количественно определять уровень выбросов углекислого газа на основе энергопотребления кампуса.

Список источников

1. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия: ТЕЛЕКОМ, 2001. 382 с. ISBN 5-93517-031-0.
2. Муравьева Е.А., Кулакова Е.С. Разработка системы диагностики личного углеродного следа с автоматическим расчетом и сбором данных // Экологические системы и приборы. 2023. № 8. С. 12-24. DOI: 10.25791/esip.8.2023.1389. EDN: WJFPQO.
3. Кулакова Е.С., Сафаров А.М., Сафарова В.И. Система автоматизированного отбора пробы атмосферного воздуха // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 3. С. 16-21. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-3-16-21. EDN: RSAYLK.

4. Kulakova E.S., Safarov A.M., Malkova M.A. Phenol Monitoring in the Air of the City Residential Part // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Moscow, 10 March 2020. Moscow, 2020. P. 012102. DOI: 10.1088/1755-1315/579/1/012102. EDN: PSXSLA
5. Кулакова Е.С. Бензол и его гомологи в атмосферном воздухе города Бельской мегавпадины Предуральяского прогиба восточно-Европейской равнины // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. № 4. С. 115-124.
6. Kulakova E.S., Safarov A.M., Kantor E.A. The Influence of the Wind Regime on the Methanol Concentration Change in the Atmospheric Air of the City Residential Area // International Scientific

and Practical Conference «Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science» 25 January 2021, Smolensk, Russian Federation. London: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 042048. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042048.

7. Kulakova E.S., Safarov A.M. Automated Control and Control System of Emissions into the Atmospheric Air of Thermoelectric-Power Industries // *Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022)*. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 82001. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/8/082001.

8. Muravyova E.A. Development of a Neural Network to Control the Process of Cleaning the Pyrolysis Fraction from Acetylene Compounds // *iOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: Agritech-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. P. 32003. DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032003. EDN: YZBIYY.

References

1. Kruglov V.V. *Iskusstvennye neironnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial Neural Networks. Theory and Practice]. Moscow, Goryachaya liniya: TELEKOM, 2001. 382 p. ISBN 5-93517-031-0. [in Russian].

2. Murav'eva E.A., Kulakova E.S. Razrabotka sistemy diagnostiki lichnogo uglerodnogo sleda s avtomaticheskim raschetom i sborom dannykh [Development of a Personal Carbon Footprint Diagnostic System with Automatic Calculation and Data Collection]. *Ekologicheskie sistemy i pribory – Ecological Systems and Devices*, 2023, No. 8, pp. 12-24. DOI: 10.25791/esip.8.2023.1389. EDN: WJFPQO. [in Russian].

3. Kulakova E.S., Safarov A.M., Safarova V.I. Sistema avtomatizirovannogo otbora proby atmosfernogo vozdukh [Automated Air Sampling System]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*, 2024, Vol. 28, No. 3, pp. 16-21. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-3-16-21. EDN: RSAYLK. [in Russian].

4. Kulakova E.S., Safarov A.M., Malkova M.A. Phenol Monitoring in the Air of the City Residential Part. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Moscow, 10 March 2020. Moscow, 2020, pp. 012102. DOI: 10.1088/1755-1315/579/1/012102. EDN: PSXSLA.

5. Kulakova E.S. Benzol i ego gomologi v atmosfernom vozdukh goroda Bel'skoi megavpadiny Predural'skogo progiba vostochno-Evropeiskoi ravniny [Benzene and Its Homologues in the Atmospheric Air of the City of the Belskaya Megadepression of the Pre-Ural Trough of the East European Plain]. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti — Bulletin of the Scientific Center of the Eastern Research Institute for Industrial and Environmental Safety*, 2022, No. 4, pp. 115-124. [in Russian].

6. Kulakova E.S., Safarov A.M., Kantor E.A. The Influence of the Wind Regime on the Methanol Concentration Change in the Atmospheric Air of the City Residential Area. International Scientific and Practical Conference «Ensuring Sustainable Development in the Context of Agriculture, Green Energy, Ecology and Earth Science» 25 January 2021, Smolensk, Russian Federation. London: *IOP Publishing Ltd*, 2021, pp. 042048. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042048.

7. Kulakova E.S., Safarov A.M. Automated Control and Control System of Emissions into the Atmospheric Air of Thermoelectric-Power Industries. *Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022)*. Krasnoyarsk, *IOP Publishing Ltd*, 2022, pp. 82001. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/8/082001.

8. Muravyova E.A. Development of a Neural Network to Control the Process of Cleaning the Pyrolysis Fraction from Acetylene Compounds. *iOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: Agritech-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020, pp. 32003. DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032003. EDN: YZBIYY.

Статья поступила в редакцию 09.09.2024; одобрена после рецензирования 16.09.2024; принята к публикации 26.09.2024.

The article was submitted 09.09.2024; approved after reviewing 16.09.2024; accepted for publication 26.09.2024.

Научная статья

УДК 681.518.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-98-106

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ПОМОЩЬЮ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ АМПЛИТУДЫ НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕЙВЛЕТ-КАРТИН



Марина Михайловна Закирничная

Marina M. Zakirnichnaya

доктор технических наук,

заведующая кафедрой «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия



Яна Александровна Палладина

Yana A. Palladina

аспирант кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Актуальность

Передовые производственные технологии не стоят на месте и включают в себя как модернизацию оборудования, так и актуализацию программного обеспечения, необходимых для реализации технологических процессов. Активно развиваются информационно-измерительные системы, объекты которых часто имеют весьма сложное устройство, и в них могут происходить многогранные процессы и явления, поэтому отдельные измерительные устройства, воспринимающие лишь один параметр сложного процесса, обычно не могут обеспечить получение достаточной информации, особенно когда необходимо одновременно знать ряд параметров объекта.

В последнее время для создания информационно-измерительных систем применяются системы искусственного интеллекта. Особенно динамично происходит цифровая трансформация нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Так, системы искусственного интеллекта и машинное обучение, основанные на базах данных, нашли широкое применение при мониторинге технического состояния оборудования, а также для последующей прогнозной оценки. Неотъемлемой частью обеспечения технологических процессов являются машины роторного типа, поэтому предупреждение их аварийного отказа является важнейшей задачей. Решение таких задач осуществляется с применением виброакустической диагностики.

Одним из наиболее распространенных классических методов обработки вибросигналов, применяемых службами вибродиагности-

Ключевые слова

центробежный насосный агрегат, виброакустическая диагностика, вейвлет-картина, амплитуда сигнала, колориметрический показатель амплитуды

ки отделов технического надзора предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, является спектральный анализ Фурье. Однако в результате проведения анализа данного вида существует высокая вероятность неоднозначного распознавания разных типов неисправностей за счет схожести их спектров. Кроме того, потеря информации о временном факторе искажает представление о динамике изменения спектрального состава сигнала, вследствие чего отсутствует возможность проведения его всестороннего анализа.

Доказано, что вейвлет-анализ вибросигналов позволяет определить неисправности и дефекты, не проявляющиеся при спектральном преобразовании Фурье. При этом для точной постановки «диагноза» центробежным насосным агрегатам (ЦНА) требуется дополнительная количественная оценка вейвлет-картин.

Исходя из этого, существует необходимость в разработке дополнительных подходов к анализу вейвлет-картин вибросигналов для оценки технического состояния ЦНА.

Цель исследования

Повышение возможностей вибродиагностики путем разработки дополнительного критерия при анализе вейвлет-картин вибросигналов для оценки технического состояния центробежных насосных агрегатов.

Методы исследования

Для практического решения поставленных задач использовались методы и алгоритмы цифровой обработки вибросигналов, основанные на вейвлет-преобразовании.

Результаты

Разработан алгоритм для оценки технического состояния центробежных насосных агрегатов с применением колориметрического показателя амплитуды, позволяющего оценить степень развития основных неисправностей центробежных насосных агрегатов, таких как дисбаланс, расцентровка и потеря жесткости опор.

Для цитирования: Закирничная М. М., Палладина Я. А. Выявление основных неисправностей центробежных насосных агрегатов с помощью колориметрического показателя амплитуды на основании моделирования вейвлет-картин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 98-106. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-98-106>.

Original article

IDENTIFYING THE MAIN FAULTS OF CENTRIFUGAL PUMPING UNITS USING A COLORIMETRIC AMPLITUDE INDICATOR BASED ON WAVELET PATTERN MODELING

Relevance

Advanced production technologies do not stand still and include both modernization of equipment and updating of software necessary for the implementation of technological processes. Information and measurement systems are actively developing, the objects of which often have a very complex structure and multifaceted processes and phenomena can occur in them. Therefore, individual measuring devices that perceive only one parameter of a complex process usually cannot provide sufficient information, especially when it is necessary to simultaneously know a number of object parameters.

Keywords

centrifugal pump unit, vibroacoustic diagnostics, wavelet pattern, signal amplitude, colorimetric amplitude indicator

Recently, artificial intelligence systems have been used to create information and measurement systems. The digital transformation of the oil refining and petrochemical industries is taking place especially dynamically. Thus, artificial intelligence systems and machine learning based on databases have found wide application in monitoring the technical condition of equipment, as well as for subsequent predictive assessment. Rotary-type machines are an integral part of technological processes, so preventing their emergency failure is the most important task. Such problems are solved using vibroacoustic diagnostics.

One of the most common classical methods of vibration signal processing used by vibration diagnostic services of technical supervision departments of oil refining and petrochemical industry enterprises is Fourier spectral analysis. However, as a result of this type of analysis, there is a high probability of ambiguous recognition of different types of faults due to the similarity of their spectra. In addition, the loss of information about the time factor distorts the idea of the dynamics of changes in the spectral composition of the signal, as a result of which there is no possibility of carrying out a comprehensive analysis of it.

It has been proven that wavelet analysis of vibration signals allows one to identify faults and defects that do not appear during the Fourier spectral transform. At the same time, to accurately diagnose centrifugal pumping units, additional quantitative assessment of wavelet patterns is required.

Based on this, there is a need to develop additional approaches to the analysis of wavelet patterns of vibration signals to assess the technical condition of the centrifugal pump unit.

Aim of research

Improving the capabilities of vibration diagnostics by developing an additional criterion for analyzing wavelet patterns of vibration signals to assess the technical condition of centrifugal pumping units.

Research methods

To practically solve the problems, methods and algorithms for digital processing of vibration signals based on the wavelet transform were used.

Results

An algorithm has been developed to assess the technical condition of centrifugal pumping units using a colorimetric amplitude indicator, which allows one to assess the degree of development of the main malfunctions of centrifugal pumping units, such as imbalance, misalignment and loss of rigidity of supports.

For citation: Zakirnichnaya M. M., Palladina Ya. A. Vyyavleniye osnovnykh neispravnostey tsentrobezhnykh nasosnykh agregatov s pomoshch'yu kolorimetriceskogo pokazatelya amplitudy na osnovanii modelirovaniya veyvlet-kartin [Identifying the Main Faults of Centrifugal Pumping Units Using a Colorimetric Amplitude Indicator Based on Wavelet Pattern Modeling]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 98-106 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-98-106>.

Введение

Центробежные насосные агрегаты (ЦНА) являются важнейшей составляющей технологических процессов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, требующей к себе повышенного внимания для предупреждения

преждевременных отказов и предотвращения аварийного выхода из строя [1]. С целью повышения точности оценки текущего технического состояния машин роторного типа в измерительных системах применяется цифровая обработка вибросигналов. Перспек-

тивным методом для своевременного выявления дефектов и развития неисправностей является анализ вейвлет-картин вибросигналов [2–4].

В [4] предложен подход к выявлению неисправностей и распознаванию технического состояния ЦНА на основе комбинации вейвлет-анализа вибросигналов и последующей мультифрактальной параметризации полученных вейвлет-картин. При этом установлено, что для количественной характеристики вейвлет-картины можно использовать мультифрактальный параметр — степень однородности. Однако данный метод достаточно трудоемкий и требует дополнительной подготовки вейвлет-картин, при обработке которых есть высокая вероятность потери информативной составляющей сигнала, что может привести к некорректному определению технического состояния.

Доказано, что при определении критериев очистки сигнала, необходимого для корректного выявления неисправностей и дефектов по вейвлет-картинам, требуется предварительное проведение процедуры подготовки сигнала. В [5] определены возможности очистки вибросигнала от шумовой составляющей за счёт изменения числа уровней вейвлет-разложения. В данной работе техническое состояние насосных агрегатов условно разделено только на две группы по признаку допустимости дальнейшей эксплуатации и, соответственно, недопустимости. К первой группе относится техническое состояние, при котором насосный агрегат может эксплуатироваться: «отличное», «хорошее», «допустимое», «еще допустимое». Во вторую группу включены: «требует мер» и «недопустимо» — это технические состояния, эксплуатация агрегата при которых неприемлема. Поэтому данный метод не решает проблему диагностики ЦНА в полном объеме, т.е. определяется только

группа насосов по техническому состоянию, что не является конечным результатом вибродиагностики, позволяющим повысить эффективность процесса принятия решений. Такой подход не позволяет оценить техническое состояние центробежных насосных агрегатов и поставить «диагноз» ЦНА в виде однозначного определения технического состояния.

Как показал анализ литературы, в настоящее время ни в одной методике обработки и анализа вейвлет-картин вибросигнала для определения степени развития неисправностей не учтены особенности их цветовой наполненности.

Система диагностики технического состояния центробежных насосных агрегатов на основе колориметрического показателя амплитуды вейвлет-картин

В данной работе в дополнение к применяемым методам цифровой обработки вибросигналов, основанным на вейвлет-преобразовании, для определения степени развития основных неисправностей типа «дисбаланс», «расцентровка» и «потеря жесткости опор» разработан новый подход, который включает в себя анализ вейвлет-картины модельного вибросигнала, исходя из ее цветовой наполненности [3–6].

Построение вейвлет-картин проводилось с учетом данных, полученных в предыдущих работах [7–12]: при очистке вибросигнала от шумовой составляющей при уровне разложения L , равном 5; виде вейвлета Морле; коэффициенте масштабирования, равном 512.

Вейвлет-картины обрабатывались с помощью программы Matlab с использованием специализированного набора вкладок, позволяющих привести вейвлет-картину в визуально-распознаваемый вид с максимальным цветовым различием. В качестве сравнения на рисунке

1 представлены вейвлет-картины одного типа в разных режимах окраски.

Для обработки вейвлет-картин использовался режим «Jet», при котором более ярко выражается визуальное различие амплитуд сигнала, а также переходы между ними в отличие от стандартного режима «Pink», при котором достаточно сглажены изменения в вейвлет-картине за счет схожести оттенков в шкале цветового распознавания.

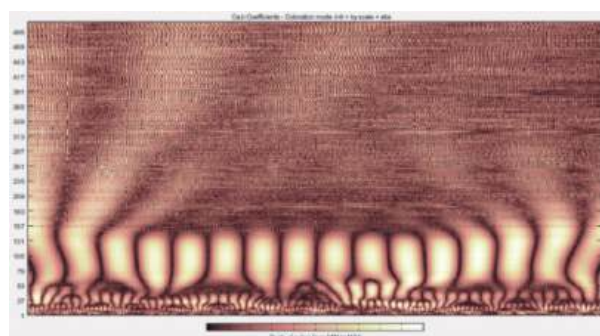
На рисунке 2 приведено сравнение вейвлет-картин, соответствующих разным техническим состояниям для модельного сигнала неисправности типа дисбаланс. Аналогичное явное различие в цветовой наполненности вейвлет-картин наблюдается для неисправностей типа расцентровка и потеря жесткости опор. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что данный показатель может быть использован в качестве количественной характеристики для определения технического состояния ЦНА.

Видно, что при ухудшении технического состояния увеличивается количество участков красного цвета. Согласно цветовой шкале участки красного цвета соответствуют высокоамплитудному компоненту сигнала (рисунок 3).

Границу перехода между высокоамплитудным и среднеамплитудным компонентами сигнала визуально сложно определить за счет схожести оттенков, поэтому с помощью программы ImageJ по цветовому показателю проводилась количественная оценка вейвлет-картин. Для этого введен дополнительный показатель «минимальное и максимальное значения серого» в высокоамплитудном компоненте сигнала в соответствии с системой цветопередачи RGB color. Предельные области компонента соответствуют диапазону значений от 42 до 117. На основании установленных граничных значений высокоамплитудного компонента сигнала определялись площади данных участков сигнала при количественной оценке вейвлет-картин, соответствующих основным неисправностям типов дисбаланс, расцентровка, потеря жесткости опор.

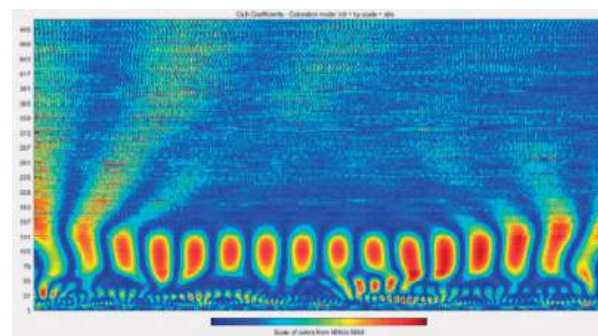
В продолжении исследования было определено изменение отношения площади участков красного цвета к общей площади вейвлет-картин. Это соотношение было принято как «колориметрический показатель амплитуды» (CAI).

С помощью программы ImageJ проводилось определение площади высокоам-



a)

a) Colormap — pink;



b)

b) Colormap — jet

Рисунок 1. Сравнение вейвлет-картин одного типа в разных режимах окраски при коэффициенте масштабирования, равном 512

Figure 1. Comparison of wavelet patterns of the same type in different coloring modes with a scaling factor of 512

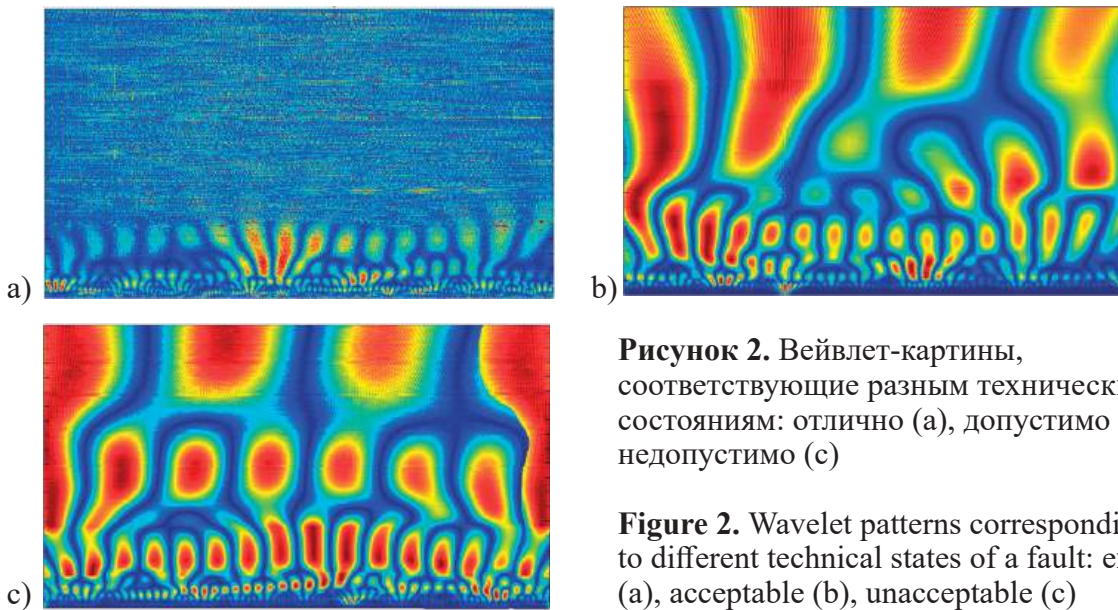


Рисунок 2. Вейвлет-картины, соответствующие разным техническим состояниям: отлично (а), допустимо (b), недопустимо (с)

Figure 2. Wavelet patterns corresponding to different technical states of a fault: excellent (a), acceptable (b), unacceptable (c)



Рисунок 3. Шкала цветового распознавания амплитудной составляющей вибросигнала по вейвлет-картине

Figure 3. Scale for color recognition of the amplitude component of the vibration signal by wavelet picture

плитудного компонента сигнала на примере неисправности типа дисбаланс при техническом состоянии «допустимо» (рисунок 4).

На основании полученных значений колориметрического показателя амплитуды введена шкала соответствия значений САІ техническому состоянию ЦНА, представленная на рисунке 5, которая может быть использована для визуального контроля оператором на рабочем месте.

Таким образом, расчет колориметрического показателя амплитуды с помощью визуально-распознаваемого вида вейвлет-картины модельного вибросигнала является ключевым этапом постановки «диагноза» ЦНА.



Рисунок 4. Определение площади участков высокоамплитудного компонента сигнала

Figure 4. Determining the area of sections of the high-amplitude signal component



Рисунок 5. Шкала соответствия значений CAI техническому состоянию при высокоамплитудном компоненте вибросигнала неисправности типа дисбаланс ЦНА

Figure 5. Scale of correspondence of CAI values to the technical condition for a high-amplitude component of the vibration signal of a malfunction such as imbalance of the centrifugal pump unit

Вывод

В дополнение к применяемым методам цифровой обработки вибросигналов, основанным на спектральном анализе Фурье, для определения степени развития основных неисправностей ЦНА типов «дисбаланс», «расцен-

тровка» и «потеря жесткости опор» вейвлет-картин разработан новый подход, который включает в себя анализ вейвлет-картины вибросигнала, исходя из ее цветовой наполненности, с применением колориметрического показателя амплитуды.

Список источников

1. Kelly S. Graham. Advanced Vibration Analysis (Dekker Mechanical Engineering). 2013. 637 p. ISBN: 978-0849334191.
2. Geitner F.K., Bloch H.P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Butterworth Heinemann, 2012. 760 p. ISBN: 9780123860453.
3. Солодовников Д.С. Вейвлеты и детерминированный хаос при анализе вибросигналов центробежно-компрессорных агрегатов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. 124 с.
4. Корнишин Д.В. Вейвлет-анализ и мультифрактальная параметризация при оценке технического состояния центробежных насосных агрегатов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. 171 с.
5. Закирничная М.М., Насырова Э.Р. Необходимость очистки вибросигнала от шумовой составляющей с использованием вейвлет-анализа для раннего выявления неисправностей насосных агрегатов // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2022. С. 315-316. EDN: LCKYBX.
6. Закирничная М.М., Варламов В.А., Палладина Я.А. Оценка влияния коэффициента масштабирования базовой функции вейвлет-преобразования на степень проявления основных неисправностей центробежных насосных агрегатов в вейвлет-картинах // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2024. Т. 20, № 1. С. 106–120.

DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-106-120.
EDN: MUVTSL.

7. Закирничная М.М., Корнишин Д.В., Варламов В.А. Мультифрактальная параметризация вейвлет-картин вибросигналов при оценке технического состояния центробежных насосных агрегатов // Инженерное образование в контексте будущих промышленных революций — СИНЕРГИЯ-2020: сб. науч. ст. Междунар. сетев. науч.-практ. конф. по инженерному образованию / Под редакцией А.И. Могучева. 2020. С. 38-44. EDN: HZVLXE.

8. Закирничная М.М., Варламов В.А., Корнишин Д.В. Перспективность использования вейвлет-анализа вибросигналов при оценке технического состояния центробежных насосных агрегатов // Информационные системы и технологии: достижения и перспективы: II Междунар. науч. конф. Сумгаит, 2020. С. 140-141. EDN: CNTOOQ.

9. Ануфренко А.В., Гойденко В.К., Гончаренко В.И., Журавлева Н.Г. Методический подход и модели реализации вейвлет-анализа при диагностике состояния интегрированных систем и комплексов связи // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD-2019): матер. Двенадцатой междунар. конф. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2019. С. 739-742. DOI: 10.25728/mlsd.2019.1.0739. EDN: TBOCBO.

10. Черезов Г.А., Леушин В.Б., Исайчева А.Г. Применение вейвлет анализа для оценки спектров сигналов // Транспортная инфраструктура

Сибирского региона. 2015. Т. 1. С. 311-314. EDN: UNWIZB.

11. Riabova S. Application of Wavelet Analysis to the Analysis of Geomagnetic Field Variations // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. P. 012146. DOI: 10.1088/1742-6596/1141/1/012146.

12. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S. Application of Wavelet Analysis for Synchronization of Current Signals in the Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors // *International Ural Conference on Electrical Power Engineering: Proceedings of International Ural Conference on Measurements, UralCon, 2022. Magnitogorsk, 2022. P. 367-372. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906641.*

References

1. Kelly S. Graham. *Advanced Vibration Analysis (Dekker Mechanical Engineering)*. 2013, 637 p. ISBN: 978-0849334191.

2. Geitner F.K., Bloch H.P. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Butterworth Heinemann, 2012, 760 p. ISBN: 9780123860453.

3. Solodovnikov D.S. *Veivlety i determinirovannyi khaos pri analize vibrosignalov tsentrobezchno-kompressornykh agregatov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Wavelets and Deterministic Chaos in the Analysis of Vibration Signals of Centrifugal Compressor Units: Dis. ...Cand. Engin. Sci.]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 1999. 124 p. [in Russian].

4. Kornishin D.V. *Veivlet-analiz i mul'tifraktal'naya parametrizatsiya pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya tsentrobezchnykh nasosnykh agregatov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Wavelet Analysis and Multifractal Parameterization in Assessing the Technical Condition of Centrifugal Pumping Units: Dis. ... Cand. Engin. Sci.]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2015. 171 p. [in Russian].

5. Zakirnichnaya M.M., Nasyrova E.R. Neobkhodimost' ochistki vibrosignala ot shumovoi sostavlyayushchei s ispol'zovaniem veivlet-analiza dlya rannego vyavleniya neispravnosti nasosnykh agregatov [The Need to Clear a Vibration Signal from Noise Effects Using Wavelet Analysis for Early Detection of faults in Pumping Units]. *Sbornik trudov XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii»* [Collection of Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate «Students and Young Scientists Youth and Modern Information Technologies»]. Tomsk, 2022, pp. 315-316. EDN: LCKYBX. [in Russian].

6. Zakirnichnaya M.M., Varlamov V.A., Palladina Ya.A. Otsenka vliyaniya koeffitsienta masshtabirovaniya bazovoi funktsii veivlet-preobrazovaniya na stepen' proyavleniya osnovnykh neispravnosti tsentrobezchnykh nasosnykh agregatov v veivlet-kartinakh [Assessing the Influence of the Scaling Factor of the Basic Wavelet Transform Function on the Degree of Manifestation of the Main Faults of Centrifugal Pumping Units in Wavelet Patterns]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, Vol. 20, No. 1, pp. 106–120. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-1-106-120. EDN: MUVTSL. [in Russian].

7. Zakirnichnaya M.M., Kornishin D.V., Varlamov V.A. Mul'tifraktal'naya parametrizatsiya veivlet-kartin vibrosignalov pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya tsentrobezchnykh nasosnykh agregatov [Multifractal Parameterization of Wavelet Patterns of Vibration Signals When Assessing the Technical Condition of Centrifugal Pumping Units]. *Sbornik nauchnykh statei mezhdunarodnoi setevoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po inzhenernomu obrazovaniyu «Inzhenernoe obrazovanie v kontekste budushchikh promyshlennykh revolyutsii — SINERGIYA-2020»*. [Collection of Scientific Articles of the International Network Scientific and Practical Conference on Engineering Education «Engineering Education in Subsequent Industrial Revolutions — SYNERGY-2020»]. 2020, pp. 38-44. EDN: HZVLXE. [in Russian].

8. Zakirnichnaya M.M., Varlamov V.A., Kornishin D.V. Perspektivnost' ispol'zovaniya veivlet-analiza vibrosignalov pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya tsentrobezchnykh nasosnykh agregatov [Prospects for Using Wavelet Analysis of Vibration Signals in Assessing the Technical Condition of Centrifugal Pumping Units]. *II mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Informatsionnye sistemy i tekhnologii: dostizheniya i perspektivy»* [II International Scientific Conference «Information Systems and Technologies: Achievements and Prospects»]. Sumgait, 2020. pp. 140-141. EDN: CNTOOQ. [in Russian].

9. Anufrenko A.V., Goidenko V.K., Goncharenko V.I., Zhuravleva N.G. Metodicheskii podkhod i modeli realizatsii veivlet-analiza pri diagnostike sostoyaniya integrirovannykh sistem i kompleksov svyazi [Methodological Approach to the Implementation of Wavelet Analysis in Diagnosing the State of Integrated Systems and Communication Complexes]. *Materialy dvenadtsatoi mezhdunarodnoi konferentsii «Upravlenie razvitiem krupno-*

masshtabnykh sistem (MLSD'2019)». [Proceedings of the Twelfth International Conference «Management of the Development of Large-Scale Systems (MLSD'2019)»]. 2019, pp. 739-742. DOI: 10.25728/mlsd.2019.1.0739. EDN: TBOCBO. [in Russian].

10. Cherezov G.A., Leushin V.B., Isaicheva A.G. Primenenie veivlet analiza dlya otsenki spektrov signalov [Application of Wavelet Analysis to Evaluate Signal Spectra]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona — Transport Infrastructure of the Siberian Region*, 2015, Vol. 1, pp. 311-314. EDN: UNWIZB. [in Russian].

11. Riabova S. Application of Wavelet Analysis to the Analysis of Geomagnetic Field Variations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, pp. 012146. DOI: 10.1088/1742-6596/1141/1/012146.

12. Petushkov M.Yu., Kholodilov S.S. Application of Wavelet Analysis for Synchronization of Current Signals in the Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering. Proceedings — International Ural Conference on Measurements, UralCon, 2022*, Magnitogorsk, 2022, pp. 367-372. DOI: 10.1109/UralCon-54942.2022.9906641.

Статья поступила в редакцию 29.07.2024; одобрена после рецензирования 15.08.2024; принята к публикации 11.09.2024.

The article was submitted 29.07.2024; approved after reviewing 15.08.2024; accepted for publication 11.09.2024.

Научная статья

УДК 004.942

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-107-116

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ МАРШРУТИЗАЦИОННОГО И КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Эрик Русланович Хакимов****Erik R. Khakimov**

магистрант кафедры «Информационные технологии и прикладная математика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

**Игорь Нугуманович Сулейманов****Igor N. Suleymanov**

кандидат технических наук,
доцент кафедры математики,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

Актуальность

Работа посвящена решению задачи для области сетевых коммуникаций – моделированию работы и внутренних процессов блока управления с архитектурой работы, привязанной к машинным тактам.

С увеличением сложности и объёма сетевого оборудования в современных телекоммуникационных системах возрастает потребность в более энергоэффективных устройствах и возможности чёткого и точного мониторинга показаний с целью выявления и предупреждения аварий, поломок, потери данных и многих других внештатных ситуаций, которые могут возникать в процессе эксплуатации и нагрузки устройств. Моделирование разрабатываемых управляющих блоков позволит сократить различные издержки, а также повысить эффективность и надёжность как отдельных устройств, так и множества объединённого в крупные системы.

Цель исследования

Обзор методов с последующим моделированием блока управления для маршрутизационного и коммутационного оборудования. Анализ выборок результатов моделирования.

Методы исследования

Для проведения исследования использованы данные, которые основываются на характеристиках разрабатываемого модуля управления в компании заказчика.

Первый этап работы представлен в виде краткого обзора существующих и подходящих методов под поставленную задачу, а также обоснования конкретных выбранных методов моделирования и их теоретического описания.

Ключевые слова

моделирование, модуль управления, маршрутизационное оборудование, коммутационное оборудование, методы СМО, теория графов, машинные такты, оптимальный путь

На втором этапе создана схема моделируемого модуля, проведены расчётные испытания модели при разных входных параметрах с применением языка программирования Python, созданы графики и выборки, приведены объяснение модели и полученных конечных выводов.

Результаты

В работе предложена методика для моделирования и расчёта модуля управления для сетевого оборудования. Выбор инструментов и математических методов основан на анализе предметной области и с учётом соотношения точности модели физического блока на затрачиваемые ресурсы для моделирования и расчётов.

Для цитирования: Хакимов Э. Р., Сулейманов И. Н. Моделирование блока управления маршрутизационного и коммутационного оборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 107-116. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-107-116>.

Original article

MODELING OF THE CONTROL MODULE OF ROUTING AND SWITCHING EQUIPMENT

Relevance

The work is devoted to solving the problem for the field of network communications – modeling the operation and internal processes of the control module with the architecture of work tied to machine cycles.

With increasing complexity and volume of network equipment in modern telecommunication systems the need for more energy efficient devices and the possibility of clear and accurate monitoring of readings in order to identify and prevent accidents, breakdowns, data loss and many other emergencies that can occur during operation and load devices. The modeling of the control modules being developed will reduce various costs, as well as improve the efficiency and reliability of both individual devices and multiple devices combined into large systems.

Aim of research

Review of methods followed by modeling of control module for routing and switching equipment. Sample analysis of simulation results.

Research methods

The data used for the research is based on the characteristics of the control module being developed in the customer's company.

The first stage of the work is presented in the form of a brief review of existing and suitable methods for the task, as well as justification of specific selected modeling methods and their theoretical description.

At the second stage, a schematic of the modeled module is created, computational tests of the model under different input parameters are performed using the Python programming language, graphs and sampling are created, and the model and the final conclusions obtained are explained.

Results

The paper proposes a methodology for modeling and computation of a control module for network equipment. The choice of tools and mathematical methods is based on the analysis of the subject area and taking into account the ratio of the accuracy of the physical unit model to the resources consumed for modeling and computation.

Keywords

modeling, control module, routing equipment, switching equipment, LMS methods, graph theory, machine cycles, optimal path

For citation: Khakimov E. R., Suleymanov I. N. Modelirovanie bloka upravleniya marshrutizatsionnogo i kommutatsionnogo oborudovaniya [Modeling of the Control Module of Routing and Switching Equipment]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 107-116 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-107-116>.

Введение

Моделируемый блок управления и мониторинга имеет отличительные особенности в архитектуре работы. Выполнение всех функций и циклов работы привязано к машинным тактам и имеет строгие временные рамки выполнения. Также все вызовы и выполнения функций являются не блокирующими, что означает, что после запуска функции устройство не дожидается полного выполнения и проходит по следующим фрагментам кода, а сбор результатов или статуса выполненной функции происходит при следующем проходе общего цикла работы. Данный подход позволяет сделать устройство отказоустойчивым и предотвращает его зависание. В случае если при работе происходит какая-то критическая ошибка, к примеру отказ одного из интерфейсов, устройство сможет продолжить свою работу и переключиться в аварийный режим [1].

Основной задачей данной работы является моделирование блока управления и мониторинга простыми и быстрыми методами с приемлемой точностью. Немаловажным фактором для выбора методов служит возможность быстрого повторного расчета с изменением одной или нескольких характеристик модели, поскольку данная модель рассчитана на несколько моделей будущих устройств, имеющих различные частотные характеристики, а также для быстрого составления расчетных выборок и их последующего анализа для выявления оптимальных настроек блока управления, которые позволят обеспечить наилучшую эффективность и наименьшее количество потерянных пакетов телеметрических данных [2].

Машинные такты и машинные циклы

Все алгоритмы и циклы работы модуля управления, такие как транзакции пакетов данных, сбор данных с сенсоров и блоков питания, отправка команд управления периферией и многие другие внутренние процессы, управляются машинными тактами, объединёнными в более большие машинные циклы, что обусловлено архитектурой, заложенной производителем в микроконтроллер, который лежит в основе моделируемого модуля.

Машинные циклы и машинные такты являются основополагающими понятиями в области архитектуры компьютера и цифровой электроники. Они определяют процесс выполнения инструкций в любом устройстве под управлением процессора и представляют собой основные единицы измерения времени во время работы процессора [3].

Машинный цикл — это основная единица времени во время выполнения инструкций в компьютере. Он представляет собой полный цикл выполнения одной инструкции, который состоит из нескольких последовательных этапов, таких как извлечение инструкции из памяти, декодирование инструкции, выполнение операции, запись результатов обратно в память и т.д. Каждый машинный цикл занимает определённое количество времени, которое зависит от частоты работы процессора и сложности выполняемой операции [4].

Машинный такт — это ещё более мелкая единица времени, которая представляет собой один период осцилляции часового сигнала процессора. Обычно один машинный цикл состоит из

нескольких машинных тактов, каждый из которых представляет собой отдельный шаг выполнения инструкции. Таким образом, количество машинных тактов в одном машинном цикле зависит от архитектуры процессора и конкретной инструкции. Например, процессор с тактовой частотой 2 ГГц имеет тактовую частоту в 2 миллиарда тактов секунду.

Машинные циклы и машинные такты играют важную роль в оптимизации производительности компьютерных систем и улучшении работы программного обеспечения. Понимание этих двух определений помогает разработчикам оптимизировать код программ, сокращать время выполнения операций и повышать эффективность работы компьютера в целом [5].

Именно поэтому понимание этих терминов позволяет определить, какие исходные параметры имеет моделируемый модуль, такие как количество операций (заявок) в секунду, скорость обработки этой операции и многие другие.

Общая схема модели

Общая схема работы модуля правления изображена на рисунках 1 и 2. Данный модуль имеет источники данных (потoki заявок), которые представлены в виде блоков питания (к примеру И1_1 и И1_2), различных сенсоров температуры и влажности (И1_3), системы охлаждения или кулеров (И1_4, И1_5). Источники объединены в группы по интерфейсу или шине обмена данными (к примеру первая группа — все, что связано с питанием, вторая группа — телеметрия). Каждый пакет данных (заявка) обладает одним из приоритетов. В зависимости от приоритета заявка отправляется в один из буферов данных для обмена данными с головным процессором (на схеме Н1_1, Н1_2, Н1_3, Н1_4). Логика приоритетов пакетов данных (заявок) изображена на схеме в виде селекторов, где С1_9 — это наи-

высший приоритет, который отвечает за различные критические и аварийные данные; С1_3 — это данные, которые имеют наименьший приоритет, и являются часто повторяющимися, а значит в них допускается потеря некоторых пакетов данных (к примеру обороты вентиляторов или температура некоторых отдельных элементов); С1_5 — это более значимые данные, где требуется большая точность и должно быть меньше потерь данных; С1_7 — самые важные данные, которые не являются критическими или аварийными, однако их потери тоже почти недопустимы и должны сводиться к минимуму (показания питания, температура значимых или наиболее горячих элементов). После попадания пакета данных в буфер происходит ожидание отправки по каналу связи или шине интерфейса (К1_1, К1_2, К1_3, К1_4). Отправка данных может осуществляться в ЦП через шину данных или через различные каналы связи напрямую в веб-интерфейс, где они в зависимости от приоритета (С1, С2) попадают в определённые буферы для хранения и последующего использования (Н1, Н2, Н3, Н4) [6].

Теория графов

Граф — это топологическая модель, которая состоит из множества вершин и множества соединяющих их рёбер. При этом значение имеет только сам факт, какая вершина с какой соединена.

Вершина — точка в графе, отдельный объект, для топологической модели графа не имеет значения координата вершины, её расположение, цвет, вкус, размер; однако при решении некоторых задачах вершины могут раскрашиваться в разные цвета или сохранять числовые значения.

Ребро — неупорядоченная пара двух вершин, которые связаны друг с другом. Эти вершины называются концевыми точками или концами ребра. При этом

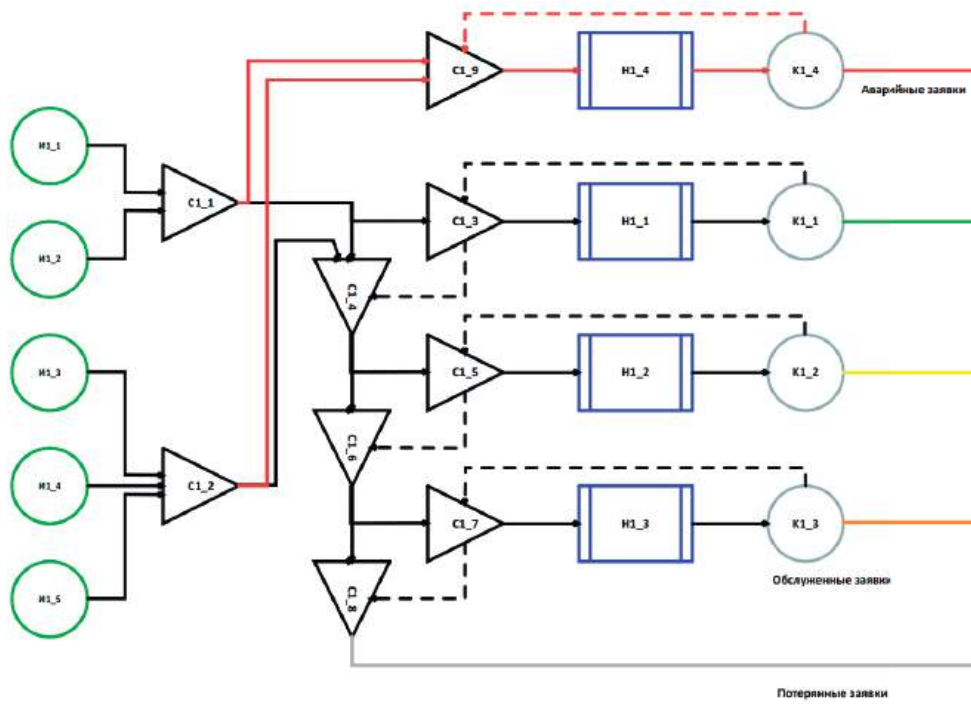


Рисунок 1. Схема работы модуля

Figure 1. Module operation diagram

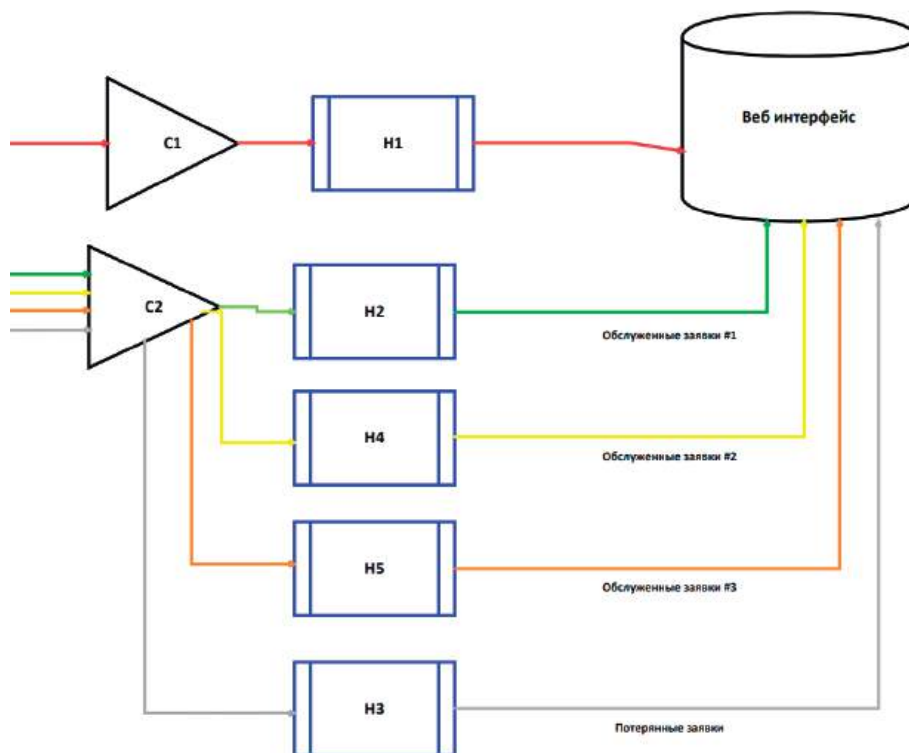


Рисунок 2. Схема работы модуля (серверная часть)

Figure 2. Module operation diagram (cloud server part)

важен сам факт наличия связи, каким именно образом осуществляется эта связь и по какой дороге — не имеет значения; однако рёбрам может быть при-

своен «вес», что позволит говорить о «нагруженном графе» и решать задачи оптимизации.

Взвешенный граф — это граф, в котором каждое ребро обозначается своим весом.

Вес — это стоимость использования данного ребра. Например, приведённый выше граф может представлять дорожную сеть, где вершины — это города, ребра — дороги между ними, а вес — стоимость строительства этих дорог.

При помощи теории графов мы можем представить данную схему в виде взвешенного графа (рисунок 3), где веса будут представлены временем, затрачиваемым на отправку (обслуживание) пакета данных от одного элемента модели к другому. Эти данные необходимы для моделирования методами систем массового обслуживания (СМО). Все веса, отображенные на графе модели (рисунок 3), нормализованы к одной единице измерения (миллисекунды) и основаны на частотных характеристиках физических используемых микроконтроллера и интерфейсов передачи данных.

Моделирование методом СМО

Системы массового обслуживания имеют разные виды и классификации,

однако для моделирования используются одноканальная и многоканальная СМО с ожиданием и ограниченной очередью [6].

Однако, как видно из рассмотренной ранее схемы (рисунки 1 и 2), видно, что данный модуль можно представить в виде отдельных одноканальных СМО для каждого из приоритетов, а общий поток заявок случайно генерируется с разными приоритетами, распределяясь по этим системам и каналам.

Для решения задачи с получением адекватных и точных характеристик рассматриваемой модели необходимо правильно сформулировать задачу и, по возможности, как можно точнее определить характеристики входящего потока заявок и обслуживающих каналов [7].

Для описания одноканальной системы необходимо задать граф состояний (рисунок 4), где

- S0 — в системе нет ни одной заявки, канал свободен;
- S1 — в системе имеется одна заявка, она обслуживается каналом;
- S2 — в системе имеется две заявки, одна обслуживается каналом, а вторая заявка ожидает в очереди;

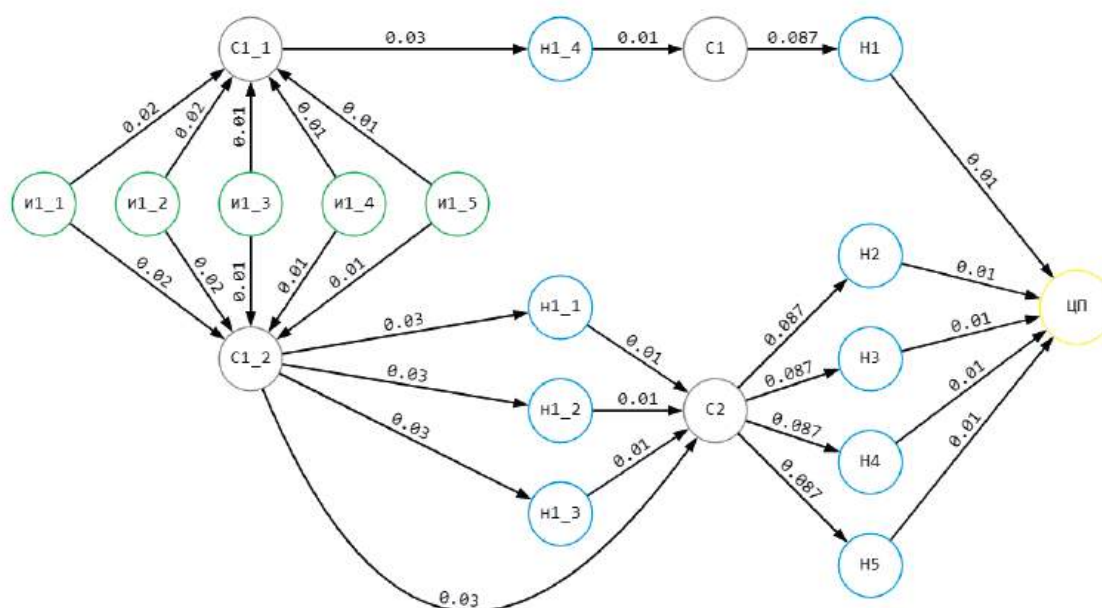


Рисунок 3. Взвешенный ориентированный граф модели

Figure 3. Weighted oriented graph model

— Sm — в системе имеется m -заявок, одна обслуживается каналом, а $(m-1)$ -заявок ожидают в очереди;

— $Sm+1$ — в системе имеется $(m+1)$ -заявок, одна обслуживается каналом, а m -заявок ожидают в очереди.

Для определения динамических характеристик необходимо построить систему уравнений Эрланга (3), а также задать начальное условие (1) и условие нормировки (2):

$$p_0 = 1, p_1 = 0, p_2 = 0, \dots, p_i = 0, \quad (1)$$

где p_i — вероятность того, что канал i занят обслуживанием;

$i = 0 \dots (m+1)$ — номер заявки в очереди.

$$\sum_{i=0}^{m+1} p_i = 1, \quad (2)$$

где m — это размерность очереди канала.

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda p_0(t) - (\lambda + \mu) p_1(t) + \mu p_2(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - (\lambda + \mu) p_2(t) + \mu p_3(t) \\ \dots \\ \frac{dp_m(t)}{dt} = \lambda p_{m-1}(t) - (\lambda + \mu) p_m(t) + \mu p_{m+1}(t) \\ \frac{dp_{m+1}(t)}{dt} = \lambda p_m(t) - \mu p_{m+1}(t) \end{cases} \quad (3)$$

где λ — интенсивность потока заявок, отображающая число заявок, поступающих в систему в единицу времени;

μ — интенсивность потока обслуживания одним каналом, выражающая число заявок, которое система обслуживает в единицу времени [8].

Для стационарной системы расчёт показателей СМО осуществляется по следующим формулам:

1. интенсивность нагрузки (ρ):

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}; \quad (4)$$

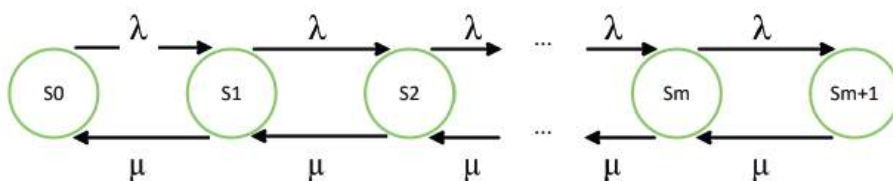


Рисунок 4. Граф состояний для одноканальной системы

Figure 4. State graph for a single-channel system

2. среднее время обслуживания ($t_{обс}$):

$$t_{обс} = \frac{1}{\mu}; \quad (5)$$

3. доля времени простоя канала (p_0):

$$p_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}}, \quad (6)$$

где m — длина очереди;

4. вероятность отказа ($p_{отк}$):

$$p_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}}, \quad (7)$$

где Z — среднее число занятых каналов;

5. относительная пропускная способность (q):

$$q = \frac{\mu}{(\mu+\lambda)}; \quad (8)$$

6. абсолютная пропускная способность (A):

$$A = Z \cdot \mu; \quad (9)$$

7. среднее число заявок в очереди ($L_{очр}$):

$$L_{очр} = \rho^2 \cdot \frac{1-\rho^m \cdot (m-m \cdot \rho+1)}{(1-\rho)^2} \cdot p_0; \quad (10)$$

8. среднее время ожидания заявки в очереди ($T_{очр}$):

$$T_{очр} = \frac{L_{очр}}{A}; \quad (11)$$

9. среднее число обслуживаемых заявок (Q):

$$Q = 1 - \rho^{m+1} \cdot p_0; \quad (12)$$

10. коэффициент простоя заявки в очереди (K):

$$K = \frac{L_{очр}}{m}; \quad (13)$$

11. среднее число заявок в системе ($L_{СМО}$):

$$L_{СМО} = L_{очр} + L_{обс}; \quad (14)$$

12. среднее время пребывания заявки в СМО ($T_{СМО}$):

$$T_{СМО} = T_{очр} + T_{обс}. \quad (15)$$

Анализ выборок расчетных данных

Для выбора приемлемых настроек моделируемого блока были выполнены расчеты с разными частотными характеристиками и параметрами обслуживания пакетов данных. На основе расчетных данных были сформированы таблицы 1 и 2, а также проведен анализ с ранжированием показателей системы по приоритетам для выявления необходимой конфигурации и настройки системы. Таблица 1 отражает вероятности того, что канал занят обслуживанием в данный момент времени, и новый входящий

пакет данных попадет в ту или иную позицию в очереди. Анализ данной таблицы позволяет понять, что количество мест в очереди для всех рассматриваемых систем удовлетворяет всем нагрузкам каналов и количество потерянных пакетов данных будет минимально возможным [9].

В таблице 2 красным обозначены самые критические и важные характеристики, которые имеют вес, равный 3; желтым — менее значимые и имеющие вес 2; а зеленым выделены пункты, которые имеют наименьшее значение или

Таблица 1. Показатели вероятности занятости канала обслуживания

Table 1. Service channel occupancy probability indicators

	Система 1	Система 2	Система 3	Авария 1	Авария 2	Авария 3
p0	0,2105	0,2460	0,1970	0,1440	0,0475	0,2400
p1	0,1335	0,1141	0,1515	0,0253	0,0024	0,0962
p2	0,0952	0,0540	0,1215	0,0044	0,0001	0,0385
p3	0,0743	0,0260	0,1011	0,0008	6,00E-06	0,0154
p4	0,0616	0,0127	0,0866	0,0001	0	0,0062
p5	0,0533	0,0063	0,0767	2.4E-5	0	0,0025

Таблица 2. Ранжированные характеристики моделируемых систем

Table 2. Ranked characteristics of the modeled systems

	Система 1	Система 2	Система 3	Авария 1	Авария 2	Авария 3
Вероятность отказа	0,0500	0,0060	0,0765	0,0000	0,0000	0,0020
Относительная пропускная способность	0,9470	0,9940	0,9235	1,0000	1,0000	0,9980
Абсолютная пропускная способность	42,6000	87,0000	22,16	5,0000	5,0000	4,9880
Интенсивность нагрузки	0,6750	0,4625	0,804	0,1750	0,0500	0,4000
Среднее время пребывания заявки в СМО	0,0410	0,0102	0,0994	0,0420	0,0105	0,1310
Среднее число заявок в системе	1,6870	0,8410	2,1625	0,2120	0,0526	0,6550
Средняя длина очереди	1,0540	0,3820	1,428	0,0371	0,0026	0,2560
Доля времени простоя канала	0,3720	0,5405	0,2655	0,8250	0,9500	0,6010
Среднее время простоя СМО	0,0260	0,0047	0,066	0,0074	0,0005	0,0514
Среднее число обслуживаемых заявок	0,6280	0,4595	0,7345	0,1750	0,0500	0,3990
Коэффициент простоя заявки в очереди	0,2120	0,0766	0,286	0,0074	0,0005	0,0512

которыми можно пренебречь, вес равен 1. На основе данных оценок характеристик можно выбрать наиболее подходящий вариант системы и ее настроек из представленных. При сравнении всех характеристик наглядно видно, что наилучшим вариантом является Система 2, поскольку она по всем параметрам превосходит остальные варианты, что позволяет реализовать эффективный блок управления с наименьшими потерями пакетов данных [10].

Выводы

Проведенная работа позволила смоделировать блок управления, который способен эффективно распределять свои вычислительные ресурсы, а также снизить потери и повысить актуальность телеметрических данных для мониторинга работы устройства. Путем анализа нагрузки каналов потоков данных и частотных характеристик блока управления получилось рассчитать приемлемые настройки интерфейсов передачи данных и сенсоров сбора телеметрических данных. Это позволяет снизить излишние процессы и отправки данных, что повышает эффективность работы как блока управления, так и всего устройства в целом.

Применение теории графов позволило определить некоторые важные параме-

тры, которые были необходимы для моделирования методами СМО. Также возможно последующее применение теории графов для поиска оптимальных путей управления питанием и передачи телеметрических данных, что позволит снизить задержки в сети и улучшить производительность передачи данных. Оптимизация маршрутов обеспечивает более быструю и надежную передачу информации между устройствами, что, в свою очередь, повышает общую производительность сети.

Анализ машинных тактов и частотных характеристик работы модуля управления позволяет предсказать возможные сбои или проблемы в работе оборудования заранее. Мониторинг и оптимизация временных параметров работы модуля управления снижают риски непредвиденных сбоев в сети.

Таким образом, результаты работы демонстрируют, что моделирование модуля управления питанием и телеметрией с использованием современных методов анализа и оптимизации позволяет значительно улучшить работу сети, обеспечить оптимальное использование ресурсов и повысить эффективность функционирования оборудования в современных телекоммуникационных сетях.

Список источников

1. Patterson D.A., Hennessy J.L. Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface. San Francisco: Elsevier, 2005. 697 p. [https://vowi.fsinf.at/images/9/95/TU_Wien-Rechnerstrukturen_VO_\(Gr%C3%BCnbacher\)_-_David_A._Patterson_John_L._Hennessy_Computer_Organization_and_Design_BookFi.org_-2.pdf/](https://vowi.fsinf.at/images/9/95/TU_Wien-Rechnerstrukturen_VO_(Gr%C3%BCnbacher)_-_David_A._Patterson_John_L._Hennessy_Computer_Organization_and_Design_BookFi.org_-2.pdf/).
2. Harris D.M., Harris S.L. Digital Design and Computer Architecture. Burlington: Morgan Kaufman, 2013. 290 p.
3. Hennessy J.L., Patterson D.A. Computer Architecture: A Quantitative Approach. Waltham:

Elsevier, 2012. 705 p. <http://www.nicevt.ru/wp-content/uploads/2019/10/6.-Hennessy-and-Patterson.-Computer-Architecture-A-Quantitative-Approach.pdf>.

4. Хакимов Э.Р. Моделирование системы интернета промышленных вещей методами систем массового обслуживания // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по матер. ССХСIX Междунар. науч.-практ. конф. М.: Интернаука, 2023. Т. 10 (299). С. 152-154. EDN: GNNUOO.
5. Солнышкина И.В. Теория систем массового обслуживания. Комсомольск-на-Амуре: Издательство государственного технического

университета Комсомольск-на-Амуре, 2015. 76 с. ISBN: 978-5-7765-1053-3.

6. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. 264 с. ISBN: 978-5-7996-3539-8.

7. Черушева Т.В., Зверовщикова Н.В. Теория массового обслуживания. Пенза: Издательство ПГУ, 2021. 224 с. ISBN 978-5-907456-66-2.

8. Дубов М.А. Теория систем массового обслуживания. Ярославль: Практикум Ярославский государственный университет, 2015. 44 с.

9. Романенко В.А. Системы и сети массового обслуживания. Самара: Издательство Самарского университета, 2021. 67 с. ISBN 978-5-7883-1631-4.

10. Скворцов В.Н. Системы массового обслуживания и случайные процессы методические указания и задания. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2014. 26 с.

References

1. Patterson D.A., Hennessy J.L. *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*. San Francisco: Elsevier, 2005. 697 p. [https://vowi.fsinf.at/images/9/95/TU_Wien-Rechnerstrukturen_VO_\(Gr%C3%BCnbacher\)_David_A._Patterson_John_L._Hennessy_Computer_Organization_and_Design_BookFi.org_-2.pdf](https://vowi.fsinf.at/images/9/95/TU_Wien-Rechnerstrukturen_VO_(Gr%C3%BCnbacher)_David_A._Patterson_John_L._Hennessy_Computer_Organization_and_Design_BookFi.org_-2.pdf).

2. Harris D.M., Harris S.L. *Digital Design and Computer Architecture*. Burlington, Morgan Kaufman, 2013. 290 p.

3. Hennessy J.L., Patterson D.A. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Waltham, Elsevier, 2012. 705 p. <http://www.nicevt.ru/wp-content/uploads/2019/10/6.-Hennessy-and-Patterson.-Computer-Architecture-A-Quantitative-Approach.pdf>.

4. Khakimov E.R. Modelirovanie sistemy interneta promyshlennykh veshchei metodami sistem massovogo obsluzhivaniya [Modeling Systems of the Internet of Industrial Things by Methods of Mass Service Systems]. *Sbornik statei po materialam CCXCIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodoi issledovatel': vyzovy i perspektivy»* [Collection of Articles Based on the Materials of the CCXCIX International Scientific and Practical Conference «Young Researcher: Challenges and Prospects»]. Moscow, Internauka Publ., 2023, Vol. 10 (299), pp. 152-154. EDN: GNNUOO. [in Russian].

5. Solnyshkina I.V. *Teoriya sistem massovogo obsluzhivaniya* [Theory of Queueing Systems]. Komsomol'sk-na-Amure, Izdatel'stvo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta Komsomol'sk-na-Amure, 2015. 76 p. ISBN: 978-5-7765-1053-3. [in Russian].

6. Pleskunov M.A. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queueing Theory]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2022. 264 p. ISBN: 978-5-7996-3539-8. [in Russian].

7. Cherusheva T.V., Zverovshchikova N.V. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Theory of Queueing Systems]. Penza, Izdatel'stvo PGU, 2021. 224 p. ISBN 978-5-907456-66-2. [in Russian].

8. Dubov M.A. *Teoriya sistem massovogo obsluzhivaniya* [Theory of Queueing Systems]. Yaroslavl', Praktikum Yaroslavskii gosudarstvennyi universitet, 2015. 44 p. [in Russian].

9. Romanenko V.A. *Sistemy i seti massovogo obsluzhivaniya* [Queueing Systems and Networks]. Samara, Izdatel'stvo Samarskogo universiteta, 2021. 67 p. ISBN 978-5-7883-1631-4. [in Russian].

10. Skvortsov V.N. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya i sluchainye protsessy* [Queueing Systems and Random Processes]. Lipetsk, Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014. 26 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 19.08.2024; одобрена после рецензирования 03.09.2024; принята к публикации 17.09.2024.

The article was submitted 19.08.2024; approved after reviewing 03.09.2024; accepted for publication 17.09.2024.

Научная статья

УДК 621.396

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-117-124

ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

**Виталий Сергеевич Андрианов****Vitaly S. Andrianov**

инженер лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования»,
Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

**Максим Александрович Кича****Maksim A. Kicha**

кандидат технических наук, член-корреспондент МАНЭБ,
научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота
«Военно-морская академия»,
Санкт-Петербург, Россия

Актуальность

Технологии беспроводной передачи данных неуклонно развиваются и уже позволяют передавать данные под водой на расстояние до 1 м. Однако сложность и масштабность подводных проектов также возрастает, поэтому возникает острая необходимость разработки решений, которые позволят обеспечивать надёжную подводную коммуникацию на больших расстояниях. Одновременно при проведении конфиденциальных работ передача данных на существенно большие расстояния может служить демаскирующим фактором. Учет данных факторов важен для слаженной работы стационарных и носимых элементов подводного оборудования, которые должны эффективно взаимодействовать между собой в условиях ограниченной видимости. Разработка таких решений способна значительно повысить эффективность, безопасность и конфиденциальность подводной связи, обеспечить более точный контроль и управление подводными операциями, а также расширить возможности для проведения научных исследований и мониторинга подводной среды, поэтому задача обеспечения надёжной подводной коммуникации на высокочастотных радиоканалах становится все более актуальной в текущих условиях.

Цель исследования

Цель работы – оценка дальности передачи данных с использованием радиопередатчиков для разработки эффективных методов подводной радиосвязи. Объектом исследования являются радиопередатчики частоты 868 МГц и 2,4 ГГц, работающие в подводных условиях.

Методы исследования

Исследование базируется на проведении экспериментов по определению максимального расстояния передачи данных под водой с

Ключевые слова

подводная связь,
высокочастотные
передатчики, мощность
сигнала, LoRa Wan,
Bluetooth, RSSI

использованием радиопередатчиков различной частоты с замерами уровня сигнала и количества потерянных в процессе передачи пакетов.

Результаты

Рассмотрены характеристики различных модулей радиопередачи. В два этапа проведены испытания модулей в подводной среде. Проанализированы результаты максимального расстояния передачи данных рассматриваемых радиопередатчиков.

Полученные данные могут быть использованы при реализации подводной коммуникации с максимальным расстоянием до 1,5 м.

Для цитирования: Андрианов В. С., Кича М. А. Возможности радиопередатчиков для подводной связи в информационных системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 117-124. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-117-124>.

Original article

CAPABILITIES OF RADIO TRANSMITTERS FOR UNDERWATER COMMUNICATION IN INFORMATION SYSTEMS

Relevance

Wireless data transmission technologies are steadily developing and already allow data to be transmitted underwater at a distance of up to one meter. However, the complexity and scale of underwater projects is also increasing, so there is an urgent need to develop solutions that will ensure reliable underwater communication over long distances. At the same time, when conducting confidential work, data transmission over significantly long distances can serve as a masking factor. Consideration of these factors is important for the coordinated operation of stationary and wearable elements of underwater equipment, which must effectively interact with each other in conditions of limited visibility. The development of such solutions can significantly improve the efficiency, security and confidentiality of underwater communications, provide more accurate control and management of underwater operations, as well as expand opportunities for scientific research and monitoring of the underwater environment. Therefore, the task of ensuring reliable underwater communication on high-frequency radio channels is becoming more and more urgent in the current conditions.

Aim of research

The purpose of the work is to conduct a comparative analysis of the data transmission range using radio transmitters to develop effective methods of underwater radio communication. The object of research is 868 MHz and 2,4 GHz radio transmitters operating in underwater conditions.

Research methods

The research is based on conducting experiments to determine the maximum data transmission distance underwater using radio transmitters of various frequencies with measurements of signal strength and the number of packets lost during transmission.

Results

The authors examined the characteristics of various radio transmission modules. The modules were tested in two stages in an underwater environment. The results of determining the maximum data transmission range of the considered radio transmitters are analyzed.

The data obtained can be used for underwater communication at a maximum distance of up to 1,5 m.

Keywords

underwater communication, radio transmitters, LoRa Wan, Bluetooth, RSSI

For citation: Andrianov V. S., Kicha M. A. Vozmozhnosti radiopredatchikov dlya podvodnoy svyazi v informatsionnykh sistemakh [Capabilities of Radio Transmitters for Underwater Communication in Information]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 117-124 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-117-124>.

Введение

Вопросом передачи данных под водой все чаще задаются в последнее время. Так, авторы статьи [1] исследовали возможность разработки бесконтактной подводной связи для подводных сенсорных сетей. В своем исследовании они использовали передатчики Zigbee, которые работают на частоте 2,4 ГГц. В результате проведенного исследования авторам удалось добиться передачи данных на расстоянии до 20 см под водой.

Расстояние, на котором обеспечивается устойчивая подводная радиосвязь, зависит от мощности радиопередатчика, частоты радиосигнала и чувствительности приемника. В общем случае зависимость интенсивности излучения радиопередатчика определяется по формуле:

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} e^{-\mu(R-R_0)},$$

где P — мощность радиопередатчика;

R_0 — постоянная радиопередатчика (условный радиус);

R — расстояние $[R_0; \infty)$ от центра радиопередатчика до приемника;

μ — коэффициент интенсивности поглощения радиоволны, как функция ее частоты и свойств воды;

I — интенсивность излучения в зоне приемника.

В данной формуле учтен закон Бугера-Ламберта-Бера, определяющий ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде, а также закон обратных квадратов, определяющий ослабление потока света при его равномерном распространении от точечного источника в пространство. Графически зависимость интенсивности излучения радиопередатчика от расстояния до при-

емника излучения при заданных условиях представлена на рисунке 1.

В статье [2] авторы провели теоретический анализ, который помог определить фактическую осуществимость связи двух модулей LoRa Wan, работавших на частоте 868 МГц. После проведенного анализа авторы провели полевые испытания в плавательном бассейне. В ходе испытаний были проанализированы характеристики передачи с точки зрения индикатора уровня принимаемого сигнала (RSSI) и отношения сигнал/шум (SNR). Результаты испытаний подтвердили возможность передач данных LoRa Wan на расстоянии до 1,1 м под водой.

Вопросом качества подключения LoRa в интернете подводных вещей озадачились и авторы статьи [3]. Они представили исчерпывающий анализ возможностей функционирования модулей LoRa с частотой 868 МГц в подводных условиях. Авторы провели несколько сценариев использования. В первом сценарии предполагалось, что один модуль LoRa находится над водой, а другой — под водой. Второй сценарий, в свою очередь, рассматривал ситуацию, когда оба модуля находятся под водой. Авторам удалось достигнуть максимального расстояния в 1,4 м, когда оба модуля находились под водой, потеря данных при этом была нулевой.

Цель данной работы — исследовать возможность передачи данных в подводных условиях для радиопередатчиков, которые работают на частотах 2,4 ГГц и 868 МГц, и найти такой радиопередатчик, который способен обеспечить устойчивую передачу данных на дистанциях свыше 1 м под водой. Использование

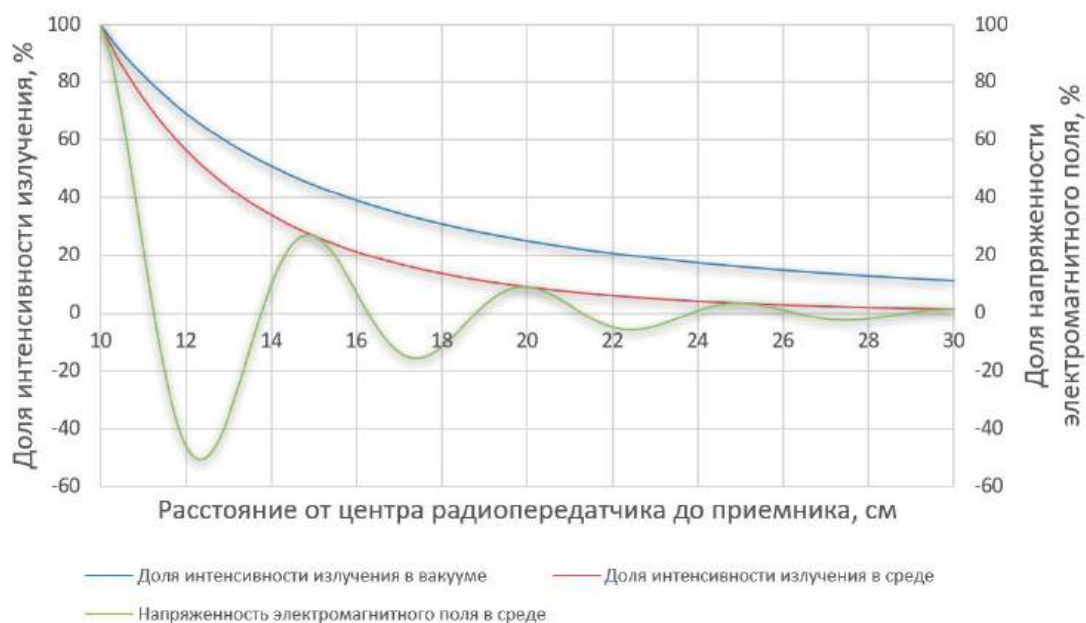


Рисунок 1. Зависимость интенсивности излучения радиопередатчика и напряженности электромагнитного поля от расстояния от центра излучателя до приемника излучения (при условном радиусе 10 см и коэффициенте интенсивности поглощения $0,1 \text{ см}^{-1}$)

Figure 1. Dependence of the radiation intensity of the radio transmitter and the intensity of the electromagnetic field on the distance from the center of the emitter to the radiation receiver (with a conditional radius of 10 cm and an absorption intensity coefficient of 0.1 cm^{-1})

высокочастотных радиоканалов обусловлено одновременным ограничением максимальной дальности передачи данных, например, при проведении конфиденциальных работ, когда сигнал радиопередатчика может служить демаскирующим фактором.

Материалы и методы

В проводимом исследовании использовались три устройства. Первое устройство — cc2541, это устройство реализует Bluetooth версии 4 и работает на частоте 2,4 ГГц. Второе устройство — nRF52840, это устройство реализует Bluetooth версии 5.4 и Zigbee. Поскольку nRF52840 реализует Bluetooth v5.4, то оно способно работать в режиме long range, то есть чувствительность приёмника выше. Третье устройство — LLCC68, которое представляет Lora Wan и работает на частоте 868 МГц.

Bluetooth модуль cc2541 — разработка компании Texas Instruments. Модуль

cc2541 имеет следующие характеристики: технология передачи данных — Bluetooth (версии 4, с поддержкой Bluetooth Low Energy (BLE)), рабочая частота — 2,4 ГГц, максимальная мощность испускаемого сигнала — 0 дБм, чувствительность приемника — минус 94 дБм.

Модуль nRF52840 разработала компания Nordic Semiconductor. Данный модуль имеет следующую конфигурацию: технология передачи данных — Bluetooth (версии 5.4, с поддержкой BLE и режима long range), рабочая частота — 2,4 ГГц, максимальная мощность испускаемого сигнала — плюс 8 дБм, чувствительность приемника — минус 95 дБм или минус 103 дБм в режиме long range. Основное отличие nRF52840 от cc2541 — версия Bluetooth, более новая версия позволяет осуществлять передачу данных на более высоких скоростях, а также позволяет работать в режиме long range. Режим long range повышает чув-

ствительность приемника, что дает возможность улавливать сигнал на большем расстоянии. Стоит также отметить, что nRF52840 реализует и протокол Zigbee.

Модуль LLCC68, производства компании Semtech, имеет более сложную конфигурацию: технология передачи данных — LoRa Wan, рабочая частота — 868 МГц, максимальная мощность испускаемого сигнала — плюс 22 дБм, чувствительность приемника — минус 148 дБм.

Конфигурации модулей приведена в таблице 1.

Все три устройства протестированы в полевых условиях. Тестирование проводилось в два этапа: на первом этапе устройства погружались в емкость, а на втором этапе — в водоем.

На первом этапе тестирования устройства погружались в резервуар, который имеет следующие размеры: глубина — 0,5 м, ширина — 1 м, высота — 0,5 м.

Таблица 1. Модули беспроводной связи

Table 1. Wireless communication modules

Наименование устройства	Технология передачи	Частота, МГц	Максимальная мощность испускаемого сигнала, дБм	Чувствительность, дБм
Texas Instruments, cc2541	BLE v4	2400	0	–94
Nordic Semiconductor, nRF52840	BLE v5.4	2400	8	–103
Semtech, LLCC68	LoRa wan	868	22	–148



Рисунок 2. Условия проведения первого этапа тестирования

Figure 2. Conditions for the first stage of testing



Рисунок 3. Условия проведения второго этапа тестирования

Figure 3. Conditions for the second stage of testing

Метрологическое обеспечение испытаний осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.820-2013 с учетом [4–6].

Результаты

Полученные результаты тестирования первого этапа представлены в таблице 2.

Результаты первого этапа тестирования демонстрируют, что модули, работающие на частоте 2,4 ГГц, не способны осуществить заданное требование по рабочему расстоянию. Из этого следует, что во втором этапе тестирования участие будет принимать только LLCC68.

Результаты второго этапа тестирования для модуля LLCC68 представлены в таблице 3.

Результаты второго этапа тестирования показывают, что модуль LLCC68 способен работать на расстоянии до 1,5 м, что удовлетворяет поставленным требованиям. На расстоянии, больше чем 1,5 м, начинается потеря пакетов, LLCC68 начинает хуже улавливать сигнал.

Обсуждение результатов

Авторы статьи [1] приводят результаты тестирования модуля 2,4 ГГц, который реализует технологию Zigbee. Им удалось достигнуть рабочего расстояния до 0,2 м. Кроме того, можно и рассмотреть результаты статьи [7], в которой удалось получить максимальное расстояние в 0,26 м для сигнала 2,427 ГГц. В проведенном исследовании удалось получить рабочее расстояние до 0,3 м в режиме long range для модуля Bluetooth 5.4. Эти результаты подтверждают, что использование высокочастотных приемопередатчиков, которые работают на частоте 2,4 ГГц и выше, в поставленной задаче невозможно.

Рассматривая второй тип устройств, которые работают на частоте 868 МГц, можно говорить о хороших результатах. Опираясь на результаты проведенного исследования и данные [2, 3, 8, 9], можно утверждать, что приемопередатчик, работающий на частоте 868 МГц, способен обеспечить передачу данных в водной среде на расстоянии до 1,5 м. Эти

Таблица 2. Рабочие расстояния устройств беспроводной связи (этап 1)

Table 2. Operating distances of wireless communication devices (stage 1)

Наименование устройства	Устойчивая связь, м	Отсутствие связи, м	RSSI, дБм
Texas Instruments, cc2541	0,1	0,3	–91
Nordic Semiconductor, nRF52840	0,35	0,45	–81
Nordic Semiconductor, nRF52840 (long range)	0,25	0,3	–97
Semtech, LLCC68	1,05	–	–76

Таблица 3. Рабочее расстояние устройства беспроводной связи (этап 2)

Table 3. Operating distance of wireless communication devices (stage 2)

Semtech, LLCC68		
№	Расстояние, м	RSSI, дБм
1	1	–77
2	1,2	–88
3	1,5	–100

результаты удовлетворяют поставленным требованиям.

Выводы

В ходе проведенного исследования рассмотрены возможности использования различных радиопередатчиков для беспроводной передачи данных в подводных условиях. Используемые модули включали устройства Bluetooth: cc2541 от компании Texas Instruments и nRF52840 от компании Nordic Semiconductor, а также устройство LoRa Wan модуль LLCC68 от компании Semtech, работающие на частотах 2,4 и 868 МГц соответственно.

Результаты исследования показали, что модули, работающие на частоте 2,4 ГГц, такие как cc2541 и nRF52840, не смогли удовлетворить требованиям по дальности передачи данных. Даже режим long range, реализованный в nRF52840, позволил достигнуть рабо-

чего расстояния только до 0,3 м, что подтверждает ограниченность высокочастотных передатчиков в подводной среде.

Наиболее перспективным оказался модуль LLCC68, работающий на частоте 868 МГц. Он успешно прошел оба этапа тестирования, продемонстрировав стабильную передачу данных на расстоянии до 1,5 м. Эти результаты подтверждают, что использование радиопередатчиков на более низких частотах является более эффективным для подводных коммуникаций.

В результате можно сказать, что вне зависимости от используемого протокола передатчики на частоте 2,4 ГГц не обеспечивают нужное расстояние для связи между устройствами. Чтобы поддерживать связь на расстоянии до 1 м, следует использовать передатчики с частотой ниже 1 ГГц.

Список источников

1. Bergmann N.W., Juergens J., Hou L., Wang Y., Trevathan J. Wireless Underwater Power and Data Transfer // *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks — Workshops*, Sydney, NSW, Australia, 2013, pp. 104-107, DOI: 10.1109/LCNW.2013.6758505.
2. Cappelli I., Fort A., Mugnaini M., Parrino S., Pozzebon A. Underwater to above Water LoRa-WAN Networking: Theoretical Analysis and Field Tests // *Measurement*. 2022. Vol. 196. P. 111140. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111140. EDN: NQNCJP.
3. Godkhindi S.S., Reddy P., Prabhakar T.V. Link Quality Analysis of LoRa for Internet of Underwater Things // *2023 15th International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*, Bangalore, India, 2023. 2023. P. 222-224. DOI: 10.1109/COMSNETS56262.2023.10041316.
4. Кича Е.И., Кича М.А., Маловик Д.С., Михайленко В.С., Зайцева В.В. Вариант оформления документа «Перечень контролируемых и измеряемых параметров» // *Вестник МАНЭБ*. 2022. Т. 27, № 2. С. 73-80. EDN: LEUPRP.
5. Кича Е.И., Кича М.А., Маловик Д.С., Михайленко В.С., Зайцева В.В. Вариант оформ-

ления документа «Перечень специального испытательного оборудования» // *Вестник МАНЭБ*. 2022. Т. 27, № 2. С. 81-88. EDN: RMGCZZ.

6. Зайцева В.В., Кича М.А., Маловик Д.С., Михайленко В.С., Кича Д.А., Кича Е.И. Зависимость точности определения предела случайной погрешности воспроизведения или определения физической величины техническим средством от количества измерений // *Вестник МАНЭБ*. 2021. Т. 26, № 3. С. 27-30. EDN: PJRPYX.

7. Sendra S., Lloret J., Rodrigues P.C., Aguiar J.M. Underwater Wireless Communications in Freshwater at 2.4 GHz // *IEEE Communications Letters*. September 2013. Vol. 17, No. 9. P. 1794-1797. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.072313.131214.

8. Dala A., Arslan T. Design, Implementation, and Measurement Procedure of Underwater and Water Surface Antenna for LoRa Communication // *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 1-18. DOI: 10.3390/s21041337. EDN: STKDQD.

9. Андрианов В.С., Потехин В.В., Кича М.А., Федотов А.А. Разработка системы управления бортовым комплексом обеспечения дыхания водолазов // *Неделя науки ИКНХ: матер. докл. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–17 апреля 2024 года*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический универ-

ситет Петра Великого, 2024. С. 244-246. EDN: JPXMJM.

References

1. Bergmann N.W., Juergens J., Hou L., Wang Y., Trevathan J. Wireless Underwater Power and Data Transfer. *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks — Workshops, Sydney, NSW, Australia*, 2013, pp. 104-107, DOI: 10.1109/LCNW.2013.6758505.
2. Cappelli I., Fort A., Mugnaini M., Parrino S., Pozzebon A. Underwater to above Water LoRaWAN Networking: Theoretical Analysis and Field Tests. *Measurement*, 2022, Vol. 196, pp. 111140. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111140. EDN: NQNCJP.
3. Godkhindi S.S., Reddy P., Prabhakar T.V. Link Quality Analysis of LoRa for Internet of Underwater Things. *2023 15th International Conference on COMMunication Systems & NETworkS (COMSNETS), Bangalore, India*, 2023, pp. 222-224. DOI: 10.1109/COMSNETS56262.2023.10041316.
4. Kicha E.I., Kicha M.A., Malovik D.S., Mikhailenko V.S., Zaitseva V.V. Variant of form of the document «Perechen' kontroliruemyykh i izmeryaemykh parametrov» [Version of the Document «List of Controlled and Measured Parameters»]. *Vestnik MANEB — Bulletin of IAELPS*, 2022, Vol. 27, No. 2, pp. 73-80. EDN: LEUPRP. [in Russian].
5. Kicha E.I., Kicha M.A., Malovik D.S., Mikhailenko V.S., Zaitseva V.V. Variant of form of the document «Perechen' spetsial'nogo ispytatel'nogo oborudovaniya» [Version of the Document «List of Special Test Equipment»]. *Vestnik MANEB — Bulletin of IAELPS*, 2022, Vol. 27, No. 2, pp. 81-88. EDN: RMGCZZ. [in Russian].
6. Zaitseva V.V., Kicha M.A., Malovik D.S., Mikhailenko V.S., Kicha D.A., Kicha E.I. Zavisimost' tochnosti opredeleniya predela sluchainoi pogreshnosti vosproizvedeniya ili opredeleniya fizicheskoi velichiny tekhnicheskimi sredstvami ot kolichestva izmerenii [The Accuracy Dependence of Determining the Limit of the Random Error of Reproduction or the Determination of a Physical Value by Technical Means on the Number of Measurements]. *Vestnik MANEB — Bulletin of IAELPS*, 2021, Vol. 26, No. 3, pp. 27-30. EDN: PJRPYX. [in Russian].
7. Sendra S., Lloret J., Rodrigues P.C., Aguiar J.M. Underwater Wireless Communications in Freshwater at 2.4 GHz. *IEEE Communications Letters*, September 2013, Vol. 17, No. 9, pp. 1794-1797, DOI: 10.1109/LCOMM.2013.072313.131214.
8. Dala A., Arslan T. Design, Implementation, and Measurement Procedure of Underwater and Water Surface Antenna for LoRa Communication. *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 4, pp. 1-18. DOI: 10.3390/s21041337. EDN: CTKDQD.
9. Andrianov V.S., Potekhin V.V., Kicha M.A., Fedotov A.A. Razrabotka sistemy upravleniya bortovym kompleksom obespecheniya dykhaniya vodolazov [Development of a Control System for an Onboard Complex for Providing Breathing for Divers]. *Materialy dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nedelya nauki IKNK», Sankt-Peterburg, 15–17 aprelya 2024 goda* [Proceedings of the Reports of the Scientific and Practical Conference «Science Week of the IKNK», Saint-Petersburg, 15 –April 17, 2024]. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2024, pp. 244-246. EDN: JPXMJM. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 19.08.2024; одобрена после рецензирования 04.09.2024; принята к публикации 13.09.2024.

The article was submitted 19.08.2024; approved after reviewing 04.09.2024; accepted for publication 13.09.2024.

Научная статья

УДК 681.2.089.6:004.932.2

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-125-134

ПОВЕРКА ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

**Елена Вячеславовна Кузьминская****Elena V. Kuz'minskaya**

кандидат технических наук,
доцент Отделения автоматизации и робототехники,
Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Максим Владимирович Скороспешкин****Maxim V. Skorospeshkin**

кандидат технических наук,
доцент Отделения автоматизации и робототехники,
Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Валерий Валерьевич Осипов****Valery V. Osipov**

ассистент кафедры управления качеством
Факультета инновационных технологий,
Томский государственный университет, Томск, Россия

Актуальность

Ежегодно больше 87 миллионов единиц средств измерений проходят периодическую поверку. Процесс поверки средств измерений строго регламентирован и занимает огромное количество времени, при этом данная работа является рутинной и однообразной. Благодаря цифровым технологиям можно упростить работы по метрологическому обслуживанию средств измерений за счет автоматизации таких процедур, как подача эталонных сигналов, контроль и фиксация показаний поверяемого средства измерений, обработка полученных результатов измерений, установление пригодности средств измерений и внесение данных о поверке в Федеральную государственную информационную систему «Аршин».

Цель исследования

Разработка и апробация автоматизированной системы для поверки цифровых средств измерений, не имеющих интерфейсов обратной связи.

Методы исследования

Работа выполнена на основе теории погрешности, теории компьютерного зрения и математической обработки изображений. При расче-

Ключевые слова

автоматизированная
система, поверка,
цифровые средства
измерений,
машинное зрение

тах использовались программные продукты математического моделирования и электронных таблиц.

Результаты

Предложена и апробирована автоматизированная система, направленная на проведение поверочных работ цифровых средств измерений, основанная на системной интеграции машинного зрения, реализованного в среде математического моделирования, и обработки результатов измерений в программе электронных таблиц. Применение такой системы позволит повысить производительность и эффективность за счет автоматической подачи эталонных значений и последующую их фиксацию на поверяемом средстве измерений, а также повысить точность благодаря исключению погрешности оператора при обработке полученных результатов измерений и передачи сведений в Федеральную государственную информационную систему «Аршин».

Для цитирования: Кузьминская Е. В., Скороспешкин М. В., Осипов В. В. Поверка цифровых средств измерений с использованием машинного зрения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 125-134. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-125-134>.

Original article

VERIFICATION OF DIGITAL MEASURING INSTRUMENTS USING MACHINE VISION

Relevance

Every year, more than 87 million units of measuring instruments undergo periodic verification. The process of verification of measuring instruments is strictly regulated and takes a huge amount of time, while this work is routine and monotonous. Thanks to digital technologies, it is possible to simplify the ofwork on metrological maintenance of measuring instruments by automating such procedures as the supply of reference signals, control and recording of readings of the verified measuring instrument, processing the obtained measurement results, establishing the suitability of measuring instruments and entering verification data into the Federal state information system «Arshin».

Aim of research

Development and testing of an automated system for verification of digital measuring instruments that do not have feedback interfaces.

Research methods

The work is based on the theory of error, the theory of computer vision and mathematical image processing. The calculations were carried out using software products for mathematical modeling and spreadsheets.

Results

An automated system aimed at carrying out verification work on digital measuring instruments has been proposed and tested. It is based on the system integration of machine vision implemented in the environment of mathematical modeling and processing of measurement results in a spreadsheet program. The use of such a system will increase productivity and efficiency due to the automatic submission of reference values and their subsequent recording on the verified measuring instrument, as well as increase accuracy due to the elimination of operator error when processing the obtained measurement results and transferring information to the Federal State Information System «Arshin».

Keywords

automated system, verification, digital measuring instruments, machine vision

For citation: Kuzminskaya E. V., Skorospeshkin M. V., Osipov V. V. Poverka tsifrovyykh sredstv iz-merenii s ispol'zovaniem mashinnogo zreniya [Verification of Digital Measuring Instruments Using Machine Vision]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 125-134 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-125-134>.

Введение

Развитие технологий и цифровая трансформация жизнедеятельности человека открывают большие возможности в области автоматизации метрологических работ. Это связано с внедрением новых цифровых подходов «Индустрии 4.0» и ряда национальных программ, требующих гармоничного и опережающего развития цифровизации в системе обеспечения единства измерений [1–3]. Благодаря цифровизации метрологии в последнее время удалось добиться множества значимых с практической точки зрения успехов и достижений, которые позволили улучшить и упростить работу метрологов, поверителей и пользователей средств измерений (СИ) [4–7].

В современных реалиях каждый год больше 87 миллионов единиц СИ [8] проходят поверку. По этой причине необходимо разрабатывать и внедрять новые технологии в метрологическое обслуживание СИ, основанные на автоматизации и системной интеграции.

Операции, производимые во время процесса поверки, строго регламентированы методиками поверки. Несмотря на разнообразие средств измерений, имеется ряд общих операций. При их укрупнении для всех приборов можно выделить основные: внешний осмотр СИ, определение метрологических характеристик (МХ) СИ, формирование протокола поверки и передача данных о поверке в Федеральную государственную информационную систему (ФГИС) «Аршин». Весь процесс поверочных работ автоматизировать невозможно [9], это связано с тем, что оператор нужен для визуального внешнего осмотра СИ,

его подключения к эталонным приборам, выбора режимов поверки. Однако такие процедуры, как подача требуемых сигналов на поверяемое СИ, контроль показаний поверяемого СИ и обработка полученных результатов измерений, установление пригодности СИ и внесение данных о поверке во ФГИС «Аршин» поддаются автоматизации [10]. Существуют решения, направленные на частичную автоматизацию поверки СИ [11, 12]. Однако предложенные решения имеют ряд ограничений, связанных с применяемыми эталонными средствами измерений и используемым программным обеспечением. Из-за этих ограничений существующие разработки могут быть использованы и внедрены в метрологические службы, оснащенные определенными калибраторами зарубежного производства.

Для минимизации человеческих ошибок и повышения эффективности поверки СИ за счет автоматизации ряда операций поверки была разработана система, соединяющая в себе распознавание данных с помощью машинного зрения и обработку полученных данных с последующей передачей результатов во ФГИС «Аршин».

Автоматизация поверки цифровых средств измерений

На рисунке 1 приведена система, позволяющая проводить поверочные работы цифровых СИ в автоматическом режиме. Автоматизированная система состоит из эталона, поверяемого СИ, компьютера с установленным программным продуктом и Web-камеры. В качестве эталона должен быть использован

калибратор утвержденного типа и оснащенный интерфейсом подключения к компьютеру.

В предлагаемой автоматизированной системе определение метрологических характеристик поверяемого СИ происходит методом непосредственного сравнения с эталонным значением, установленным на калибраторе. Далее для каждой контрольной точки диапазона измерений определяются абсолютная и относительная погрешности поверяемого СИ, которые сравниваются с его нормируемыми метрологическими характеристиками.

В связи с тем, что автоматизированная система состоит из стандартных средств измерений, более детального рассмотрения заслуживают алгоритм и программный продукт, необходимые для распознавания показаний с панели цифрового СИ и дальнейшей обработки полученной информации.

Алгоритм разработанного программного обеспечения

На рисунке 2 приведен алгоритм разработанного программного продукта, позволяющий определять показания с

дисплея прибора благодаря системе машинного зрения, реализованной в программе математического моделирования и производить автоматическую обработку полученных данных в программе электронных таблиц с использованием макроса MS Visual Basic. Начальным этапом работы программы является формирование рабочего пространства. На данном шаге оператор/поверитель может выбрать тип и наименование калибратора и поверяемого средства измерений с указанием их заводских номеров. Также на этом этапе оператор может выбрать/внести данные поверителя и организации-владельца СИ, занести условия проведения поверочных работ. Подробно данный этап был рассмотрен в статье [7].

После формирования рабочего пространства оператору необходимо вручную установить на приборе начальный режим работы (только для многорежимных приборов, например мультиметров) в соответствии с режимом, указанным в программе. По умолчанию в разработанном программном продукте начальный



Рисунок 1. Схема подключения оборудования при автоматизированной поверке СИ

Figure 1. Equipment connection diagram for automated verification of measuring instruments

режим соответствует первому режиму, описанному в методике поверки СИ.

Далее на основании методики поверки СИ в протоколе формируются и устанавливаются контрольные точки для каждого режима работы СИ. Значения контрольных точек будут дистанционно подаваться по интерфейсу на эталонный прибор (калибратор), а далее с эталонного прибора это же значение величины передается на поверяемое СИ.

Регистрация и фиксация измеренных значений с панели поверяемого СИ будет происходить благодаря Web-камере. Для регистрации результатов измерений была разработана программа в среде математического моделирования, позволяющая распознавать значения семисегментных дисплеев прибора. Более подробные пояснения к реализации программного кода будут приведены ниже.

После того как в протокол поступило значение для конкретной контрольной точки, программа подает новое значение в соответствии с ранее сформированным протоколом. И этот цикл будет повторяться до тех пор, пока все контрольные точки для выбранного режима не будут зафиксированы в протоколе. Если все контрольные точки установленного режима работы СИ проверены, тогда оператор может выбрать следующий режим работы СИ, и тем самым программный продукт будет совершать начальные этапы для выбранного режима.

После фиксации значений в контрольных точках программа автоматически рассчитывает метрологические характеристики поверяемого СИ и формирует протокол поверки с указанием пригодности

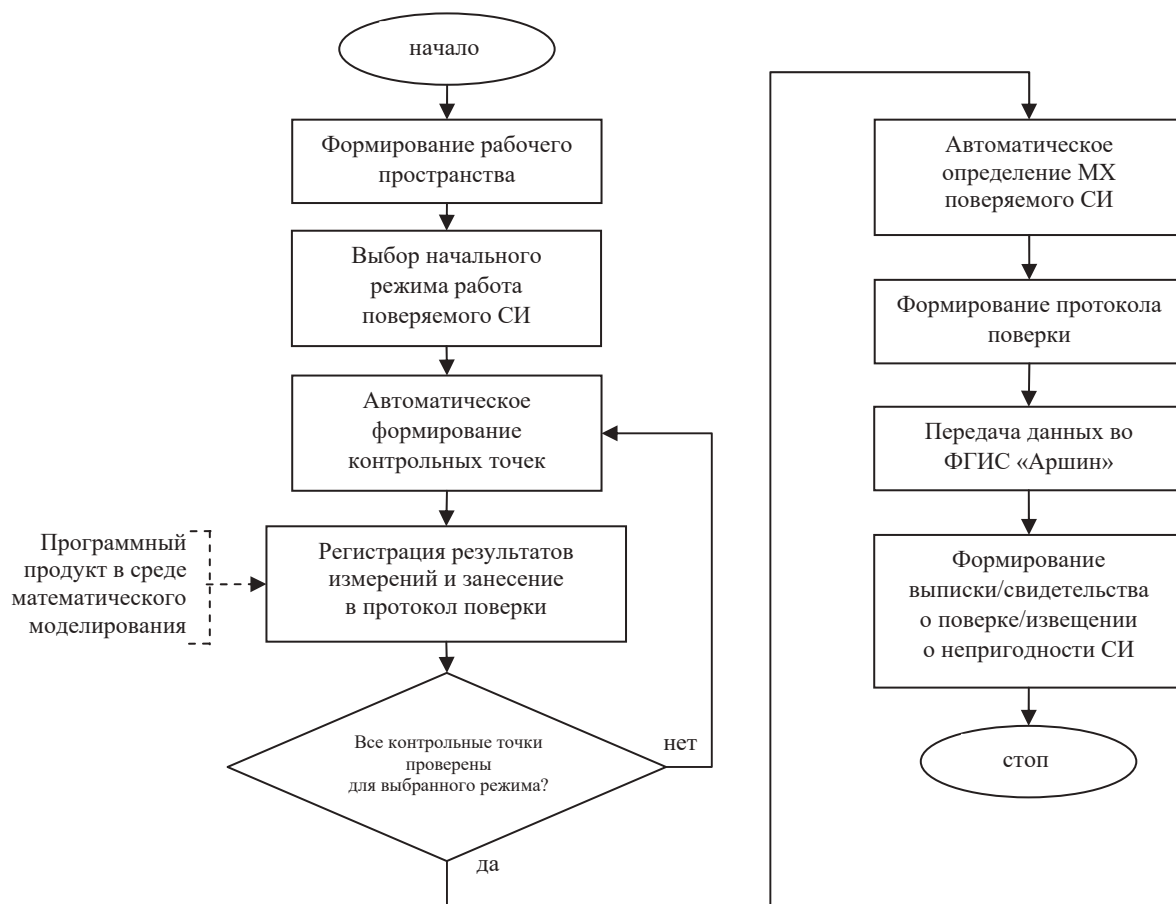


Рисунок 2. Алгоритм разработанного программного продукта

Figure 2. Algorithm of the developed software product

сти/непригодности СИ в виде таблицы в формате xml.

На заключительном этапе производится передача результатов поверки во ФГИС «Аршин» с формированием документов, что позволяет сократить время работы оператора и уменьшить ввод некорректных или ошибочных данных о СИ.

Реализация машинного зрения

Для повышения эффективности работы оператора и минимизации ручной фиксации результатов измерений была реализована система машинного зрения для распознавания семисегментного дисплея СИ. Модель системы машинного зрения приведена на рисунке 3.

Цифровое значение на дисплее СИ захватывается через подключенную к компьютеру Web-камеру и поступает в блок From Multimedia File, где блоки X ROI и Y ROI описывают область захвата изображения. После этого выделенная область через блок Construct ROI поступает в блок Display Results. Фрагмент изображения с блока From Multimedia File проходит фильтрацию для повышения контрастности изображения в блоке Extract ROI. Для синхронизации работы эталона, поверяемого средства измерений и разработанного программного пакета в блоках Step и Boolean задается

частота считывания. Блок Store Background необходим для разделения изображения на фрагменты для дальнейшей обработки и анализа. В блоке Detect происходят дальнейшая обработка полученного фрагмента с распознаванием значений семисегментных элементов и преобразование их в численный вид. После считывания и распознавания измеренного значения с семисегментного дисплея поверяемого СИ происходит загрузка полученного значения в программный продукт электронных таблиц для определения МХ СИ и формирования протокола поверки в соответствии с разработанным алгоритмом.

Апробация предложенного решения

Для апробации предложенного технического и программного решения была собрана система, состоящая из многофункционального калибратора Fluke 5520A, мультиметра, компьютера и Web-камеры. Дистанционное управление и подключение калибратора к компьютеру произведено через разъем IEEE-488. Внешний вид системы представлен на рисунке 4.

Проверка распознавания изображений и фиксации значений была произведена для трех разных мультиметров. Результаты измерений представлены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, результаты измерения распознаются кор-

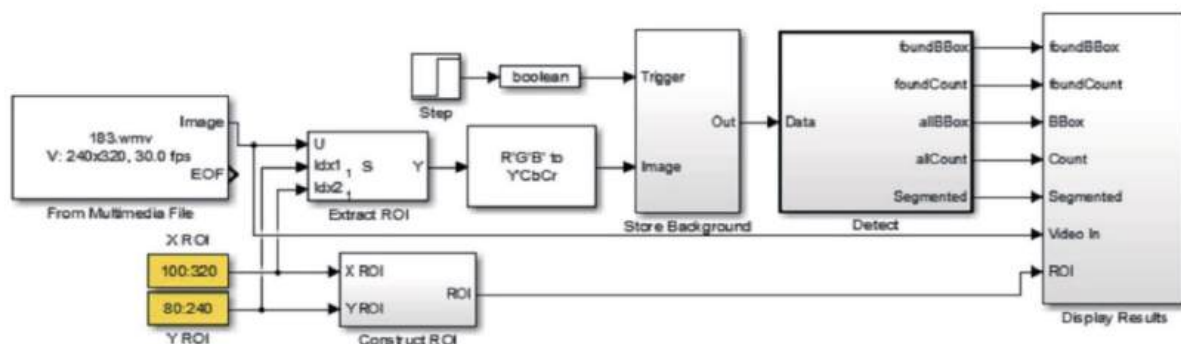


Рисунок 3. Модель системы машинного зрения

Figure 3. Machine vision system model



Рисунок 4. Автоматизированная система поверки

Figure 4. Automated verification system

ректно, и программа фиксирует плавающее изображение в виде запятой.

Работоспособность системы в целом была произведена на примере поверки мультиметра АРРА-305. В ходе автоматизированной поверки выбранного мультиметра определялись метрологические характеристики в таких режимах, как измерение напряжение постоянного и переменного тока, измерение силы постоянного и переменного тока, измерение сопротивления постоянного тока, измерение частоты. Полученные результаты измерений внесены в прокол, фрагмент которого приведен на рисунке 5.

Проведенные натурные испытания автоматизированной системы показали, что Web-камера и разработанное программное обеспечение машинного зрения улавливают и распознают изображения с различных дисплеев. Конечно, возникают трудности при распознавании изображения в сильно освещенном

Таблица 1. Полученные результаты измерений при проверке работы программы машинного зрения

Table 1. Results of measurements obtained during testing of the machine vision program

Калибратор Fluke 5520A	АРРА-305		DT-830B		Актаком АМ-1109	
Установленное значение величины	Измеренное значение		Измеренное значение		Измеренное значение	
	Машинное зрение	Ручное	Машинное зрение	Ручное	Машинное зрение	Ручное
100 Ом	100,05 Ом	100,05 Ом	100,1 Ом	100,1 Ом	100,07 Ом	100,07 Ом
300 Ом	299,87 Ом	299,87 Ом	299,9 Ом	299,9 Ом	299,94 Ом	299,94 Ом
1 кОм	0,9995 кОм	0,9995 кОм	0,996 кОм	0,996 кОм	0,999 кОм	0,999 кОм
3 кОм	2,9987 кОм	2,9987 кОм	2,997 кОм	2,997 кОм	2,996 кОм	2,996 кОм
10 кОм	10,003 кОм	10,003 кОм	10,06 кОм	10,06 кОм	10,008 кОм	10,008 кОм
30 кОм	30,005 кОм	30,005 кОм	30,05 кОм	30,05 кОм	30,003 кОм	30,003 кОм
100 кОм	100,06 кОм	100,06 кОм	100,1 кОм	100,1 кОм	100,02 кОм	100,02 кОм
300 кОм	300,29 кОм	300,29 кОм	300,2 кОм	300,2 кОм	300,18 кОм	300,18 кОм
1 МОм	1,0026 МОм	1,0026 МОм	1,02 МОм	1,02 МОм	1,005 МОм	1,005 МОм
3 МОм	3,007 МОм	3,007 МОм	3,05 МОм	3,05 МОм	3,007 МОм	3,007 МОм
10 МОм	10,143 МОм	10,143 МОм	10,4 МОм	10,4 МОм	10,16 МОм	10,16 МОм
30 МОм	30,36 МОм	30,36 МОм	30,5 МОм	30,5 МОм	30,27 МОм	30,27 МОм

ПАО «ГАЗПРОМ», ООО «Газпром трансгаз Томск», Инженерно-технический Центр, 634027, Томская область, г. Томск, ул. Мостовая, 28А. Телефон (8322) 27-29-35, 27-29-25.				Протокол периодической поверки № ВСП. -006-2023 24.03.2023 г.		Регистрационный номер аттестата аккредитации: RA.RU. 310626 от 12.02.2015 г.						
Наименование	Тип	Модификация	Зав. №	Год выпуска	Номер ГР (при наличии)	Класс точности:	Зависит от вида и диапазона					
Мультиметр цифровой	APPA-305	APPA-305	64201415	-	20088-05	Диапазон измерений:	(0-30) МОм; (0-1000) В; (0-10) А.					
Принадлежность СИ, место эксплуатации:				ООО «Газпром трансгаз Томск», Александровское ЛПУМГ		КС "Александровская", участок КИПиА						
Поверка согласно документа: Мультиметры цифровые APPA - 301, APPA - 303, APPA - 305. Методика поверки 71 - 10437 - 2МП.												
Средства поверки:												
Наименование	Тип	Зав. №	Годен до	Шифр этикетки/		Условия поверки						
Калибратор многофункциональный	Fluke 5520A	9285004	27.07.2023	29282.05.2P.00356741		Напряжение сети	223 В					
				29282.05.2P.00648306		Частота сети	50 Гц					
				29282.05.1P.00356728		Давление	100,9 кПа					
				29282.05.2P.00648305		Температура	21,5 °C					
				29282.05.4P.00356755		Влажность	56 %					
Мультиметр цифровой	Yokogawa TY720	JKP4160	22.05.2023	С-ВЗ/23-05-2022/157877033								
Барометр-термометр	M - 67	3659	05.06.2024	45289/203								
Измеритель влажности и температуры	HBTM - 7M5	24549	16.06.2023	С-НН/17-06-2022/164512872								
Проведение поверки.												
1. Визуальный осмотр												
2. Опробование												
3. Определение метрологических характеристик.												
Измерение напряжения постоянного тока												
номинал	измер	нижний	верхний									
знач ИВ	знач ИВ	предел	предел									
10	10,003	✓	9,986	10,014								
30	30,021	✓	29,974	30,036								
100	100,07	✓	99,92	100,08								
300	300,23	✓	299,75	300,25								
1000	1000,23	✓	999,75	1000,25								
1	1,0002	✓	0,9992	1,0008								
3	3,0005	✓	2,9995	3,001								
10	10,005	✓	9,995	10,01								
30	30,015	✓	29,985	30,025								
100	100,05	✓	99,95	100,08								
300	300,17	✓	299,83	300,25								
1000	1000,47	✓	999,53	1000,5								
10000	10000,53	✓	9999,47	10000,5								
100000	100000,57	✓	99999,43	100000,5								
1000000	1000000,67	✓	999999,33	1000000,5								
Измерение силы постоянного тока												
номинал	измер	нижний	верхний									
знач ИВ	знач ИВ	предел	предел									
10	10,009	✓	9,976	10,024								
30	30,017	✓	29,936	30,064								
100	100,13	✓	99,76	100,24								
300	300,32	✓	299,36	300,64								
1000	1000,54	✓	999,46	1000,8								
1	0,9979	✓	0,9976	1,0024								
3	3,0009	✓	2,9996	3,0064								
10	10,017	✓	9,983	10,024								
30	30,034	✓	29,966	30,064								
100	100,14	✓	99,86	100,24								
300	300,41	✓	299,59	300,64								
1000	1000,71	✓	999,29	1000,8								
10000	10000,71	✓	9999,29	10000,8								
100000	100000,71	✓	99999,29	100000,8								
1000000	1000000,71	✓	999999,29	1000000,8								
Измерение силы переменного тока f = 50 Гц												
номинал	измер	нижний	верхний									
знач ИВ	знач ИВ	предел	предел									
10	10,017	✓	9,976	10,024								
30	30,039	✓	29,936	30,064								
100	100,14	✓	99,76	100,24								
300	300,41	✓	299,36	300,64								
1	0,9997	✓	0,9976	1,0024								
3	2,9962	✓	2,9936	3,0064								
10	9,996	✓	9,986	10,014								
30	29,994	✓	29,984	30,004								
100	99,992	✓	99,982	100,002								
300	299,988	✓	299,978	300,002								
1000	999,988	✓	999,978	1000,002								
10000	9999,988	✓	9999,978	10000,002								
100000	99999,988	✓	99999,978	100000,002								
1000000	999999,988	✓	999999,978	1000000,002								
Измерение напряжения переменного тока												
номинал	измер	нижний	верхний									
знач ИВ	знач ИВ	предел	предел									
10	10,072	✓	9,85	10,15								
30	30,116	✓	29,85	30,155								
100	100,148	✓	99,855	101,15								
300	300,148	✓	299,855	301,15								
1000	1000,148	✓	999,855	1001,15								
1	1,0075	✓	0,9885	1,0115								
3	3,0148	✓	2,9785	3,0215								
10	10,093	✓	9,985	10,115								
30	30,113	✓	29,785	30,215								
100	100,78	✓	99,85	101,15								
300	301,46	✓	297,85	302,15								
1000	1001,46	✓	997,85	1002,15								
1	1,0075	✓	0,9885	1,0115								
3	3,0148	✓	2,9785	3,0215								
10	10,093	✓	9,985	10,115								
30	30,113	✓	29,785	30,215								
100	100,78	✓	99,85	101,15								
300	301,46	✓	297,85	302,15								
1000	1001,46	✓	997,85	1002,15								
1	1,0075	✓	0,9885	1,0115								
3	3,0148	✓	2,9785	3,0215								
10	10,093	✓	9,985	10,115								
30	30,113	✓	29,785	30,215								
100	100,78	✓	99,85	101,15								
300	301,46	✓	297,85	302,15								
1000	1001,46	✓	997,85	1002,15								
Измерение сопротивления постоянному току												
номинал	измер	нижний	верхний									
знач ИВ	знач ИВ	предел	предел									
100	100,05	✓	99,68	100,32								
300	300,87	✓	299,08	300,92								
1	0,9995	✓	0,9968	1,0032								
3	2,9987	✓	2,9908	3,0092								
10	10,003	✓	9,9968	10,032								
30	30,005	✓	29,9908	30,032								
100	100,06	✓	99,968	100,32								
300	300,29	✓	299,08	300,92								
1	1,0006	✓	0,9993	1,007								
3	3,007	✓	2,987	3,013								
10	10,143	✓	9,945	10,355								
30	30,36	✓	29,45	31,55								
Измерение емкости												
номинал	измер	нижний	верхний									
знач ИВ	знач ИВ	предел	предел									
1	0,985	✓	0,961	1,039								
3	2,971	✓	2,909	3,097								
10	10,07	✓	9,71	10,29								
30	30,17	✓	29,53	30,47								
100	99,1	✓	97,1	101,9								
300	301,9	✓	295,3	304,7								
1	0,983	✓	0,971	1,029								
3	3,016	✓	2,953	3,047								
10	9,87	✓	9,61	10,39								
30	30,38	✓	29,23	30,77								
100	102,5	✓	96,1	109,9								
300	305,4	✓	292,3	307,7								
1	0,979	✓	0,951	1,049								
3	3,048	✓	0,993	3,107								
10	10,15	✓	9,655	10,545								
30	30,71	✓	8,539	9,461								
Измерение температуры												
номинал	измер	нижний	верхний									
знач ИВ	знач ИВ	предел	предел									
100	100,05	✓	99,68	100,32								
300	300,87	✓	299,08	300,92								
1	0,9995	✓	0,9968	1,0032								
3	2,9987	✓	2,9908	3,0092								
10	10,003	✓	9,9968	10,032								

Автоматизации, к сожалению, пока не поддаются такие действия, как внешний осмотр СИ, подключение соединительных проводов и переключение режимов работы используемых СИ.

Предложенная автоматизированная система позволит повысить производи-

тельность и качество работы при проведении поверочных работ за счет уменьшения человеческих ошибок при определении метрологических характеристик СИ и передачи данных во ФГИС «Аршин».

Список источников

1. Национальная программа «Цифровая экономика РФ», утв. протоколом заседания президиума Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам от 4.06.2019 № 7.

2. Федеральный закон от 27.12.2019 № 496-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений».

3. Концепция информатизации деятельности Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии на период до 2018 г., утв. протоколом от 29.10.2014 № 388-пр. «Стратегия обеспечения единства измерений в РФ до 2025 г.», утв. Правительством РФ в 2017 г.

4. Красавин И.В., Пилюгин А.Ю. ФГИС «Аршин» – драйвер цифровой трансформации обеспечения единства измерений // Главный метролог. 2020. № 4 (115). С. 15-19. EDN: YWQNKL.

5. Кузнецов Д.А. Совершенствование законодательства в области обеспечения единства измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 3 (171). С. 5-7. EDN: QPXYAF.

6. Золотухин К.В., Скорнякова Е.А. Программа для передачи данных о результатах поверок средств измерений в федеральную государственную информационную систему «Аршин» // Автоматизация в промышленности. 2022. № 7. С. 48-51. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.08. EDN: GLFMDD.

7. Осипов В.В., Кузьминская Е.В., Спиридонова А.С. Автоматизированное оформление результатов поверки средств измерений с передачей данных // Компетентность. 2023. № 4. С. 40-45. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-4-40-45. EDN: XLPFQC.

8. <https://prof-resurs.ru/news/metrologiya/tpost/gpfmvd69t1-statistika-rossiiskaya-metrologiya-v-tsi>.

9. Данилов А.А. Автоматизация поверки: терминология, уровни автоматизации, состав автоматизированного рабочего места и его статус // Законодательная и прикладная метрология. 2024. № 2. С. 28-32. EDN: BPJZQK.

10. Данилов А.А. Экономические вопросы автоматизации поверки средств измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2024. № 3. С. 30-34. DOI: 10.32446/2782-5418.2024-3-30-34. EDN: PDIBPJ.

11. Юрченко Ю.Л. Автоматизация процедуры поверки мультиметров // Известия ТулГУ. 2022. № 4. С. 360-363. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-360-363. EDN: VDIFDZ.

12. Захарова А.Г., Григорьев А.В., Лобур И.А., Шаулева Н.М., Магницкий Д.К., Лебедев Г.М. Автоматизация операций поверки и калибровки электроизмерительных приборов // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 5. С. 41-50. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-41-50. EDN: VBBMXQ.

References

1. *Natsional'naya programma «Tsifrovaya ekonomika RF», utv. protokolom zasedaniya prezidiuma Soveta pri Prezidente RF po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nyim proektam ot 4.06.2019 № 7* [National Program «Digital Economy of the Russian Federation», approved by the protocol of the meeting of the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and National Projects dated 4.06.2019 No. 7].

2. *Federal'nyi zakon ot 27.12.2019 № 496-FZ «O vnesenii izmenenii v Federal'nyi zakon «Ob obespechenii edinstva izmerenii»* [Federal Law dated 27.12.2019 No. 496-FZ «On Amendments to the Federal Law «On Ensuring the Uniformity of Measurements»].

3. *Kontseptsiya informatizatsii deyatel'nosti Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii na period do 2018 g., utv. protokolom ot 29.10.2014 № 388-pr. «Strategiya obespecheniya edinstva izmerenii v RF do 2025 g.», utv. Pravitel'stvom RF v 2017 g.* [Concept of Informatization of the Activities of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology for the Period up to 2018, Approved by the protocol dated 29.10.2014 No. 388-pr. «Strategy for Ensuring the Uniformity of Measurements in the

Russian Federation until 2025», Approved. by the Government of the Russian Federation in 2017].

4. Krasavin I.V., Pilyugin A.Yu. FGIS «Arshin» – draiver tsifrovoy transfor-matsii obespecheniya edinstva izmerenii [FGIS «Arshin» – a Driver of Digital Transformation of Ensuring the Uniformity of Measurements]. *Glavnyi metrolog – Chief Metrologist*, 2020, No. 4 (115), pp. 15-19. EDN: YWQNKL. [in Russian].

5. Kuznetsov D.A. Sovershenstvovanie zakonodatel'stva v oblasti obespecheniya edinstva izmerenii [Improving Legislation in the Field of Ensuring the Uniformity of Measurements]. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya – Legislative and Applied Metrology*, 2021, No. 3 (171), pp. 5-7. EDN: QPXYAF. [in Russian].

6. Zolotukhin K.V., Skornyakova E.A. Programma dlya peredachi dannykh o rezul'tatakh poverok sredstv izmerenii v federal'nyu gosudarstvennyu informatsionnyu sistemu «Arshin» [Program for Transmitting Data on the Results of Verification of Measuring Instruments to the Federal State Information System «Arshin»]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti – Automation in Industry*, 2022, No. 7, pp. 48-51. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.08. EDN: GLFMDD. [in Russian].

7. Osipov V.V., Kuz'minskaya E.V., Spiridonova A.S. Avtomatizirovannoe oform-lenie rezul'tatov poverki sredstv izmerenii s peredachei dannykh [Automated Registration of the Measuring Instruments Verification Results with Data Transfer]. *Kompetentnost' – Competitiveness*, 2023, No. 4, pp. 40-45. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-4-40-45. EDN: XLPFQC. [in Russian].

8. <https://prof-resurs.ru/news/metrologiya/tpost/gpfmvd69t1-statistika-rossiiskaya-metrologiya-v-tsi>. [in Russian].

9. Danilov A.A. Avtomatizatsiya poverki: terminologiya, urovni avtomatizatsii, sostav avtomatizirovannogo rabocheho mesta i ego status [Verification Automation: Terminology, Levels of Automation, Composition of the Automated Workplace and Its Status]. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya – Legislative and Applied Metrology*, 2024, No. 2, pp. 28-32. EDN: BPJZQK. [in Russian].

10. Danilov A.A. Ekonomicheskie voprosy avtomatizatsii poverki sredstv izmerenii [Economic Issues of Measuring Instrument Verification Automation]. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya – Legislative and Applied Metrology*, 2024, No. 3, pp. 30-34. DOI: 10.32446/2782-5418.2024-3-30-34. EDN: PDIBPJ. [in Russian].

11. Yurchenko Yu.L. Avtomatizatsiya protsedury poverki mul'timetrov [Automation of the Multimeter Verification Procedure]. *Izvestiya TulGU – Bulletin of TulSU*, 2022, No. 4, pp. 360-363. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-4-360-363. EDN: VDIFDZ. [in Russian].

12. Zakharova A.G., Grigor'ev A.V., Lobur I.A., Shauleva N.M., Magnitskii D.K., Lebedev G.M. Avtomatizatsiya operatsii poverki i kalibrovki elektroizmeritel'nykh priborov [Automation of Verification and Calibration of Electrical Measuring Instruments]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika – Mining Equipment and Electromechanics*, 2021, No. 5, pp. 41-50. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-41-50. EDN: VBBMXQ. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена после рецензирования 18.09.2024; принята к публикации 25.09.2024.

The article was submitted 11.09.2024; approved after reviewing 18.09.2024; accepted for publication 25.09.2024.

Научная статья

УДК 621.3.082

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-135-144

РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В ПРОЦЕССЕ КАРОТАЖА НА БУРИЛЬНЫХ ТРУБАХ

**Павел Владимирович Переверзин****Pavel V. Pereverzin**

заведующий сектором акустических
и электрических методов отдела электроники,
ООО НПФ «АМК Горизонт»,
Октябрьский, Россия

**Андрей Павлович Переверзин****Andrey P. Pereverzin**

студент Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

**Владимир Станиславович Фетисов****Vladimir S. Fetisov**

доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации, телекоммуникации
и метрологии, Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

**Дмитрий Георгиевич Миловзоров****Dmitry G. Milovzorov**

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

Актуальность

Одной из важных задач при проведении каротажа на бурильных трубах является измерение глубины погружения бурильной колонны в скважину. В настоящее время сложилась практика использования для этой цели систем измерения механической скорости бурения, входящих в состав оборудования службы геолого-технического исследования скважин. Однако, как показывает практика, существующие методические и аппаратные решения не могут обеспечить требуемую точность определения расположения геологических интервалов, оперативность монтажа и универсальность конструкции датчиков. Поэтому

Ключевые слова

геофизическое
исследование скважины,
каротаж на бурильных
трубах, механическая
скорость бурения, глубина
погружения бурильной
колонны, система
измерения глубины
в процессе каротажа

вопрос разработки систем измерения глубины для скважинной геофизической аппаратуры, спускаемой на бурильных трубах, является актуальным и требует решения, основанного на предыдущем опыте и современных достижениях электронной инженерии.

Цель исследования

Изучение методических и аппаратных аспектов работы систем измерения глубины погружения бурильной колонны в скважину, формирование требований к конструкции датчиков перемещения талевого блока, разработка концепции развития современных систем измерения глубины погружения бурильной колонны в процессе каротажа на бурильных трубах.

Методы исследования

Использование многолетнего опыта авторов в разработке и практическом применении различных систем измерения глубины погружения бурильной колонны, анализ литературы и научных публикаций по данной тематике.

Результаты

Рассмотрены особенности применения датчика оборотов лебедки, применяемого службой геолого-технологических исследований для регистрации механической скорости бурения, сформулированы актуальные требования к аппаратным и методическим аспектам задачи разработки систем измерения глубины погружения в процессе каротажа на бурильных трубах, предложена концепция дальнейшего развития таких систем.

на бурильных трубах,
датчик перемещения
талевого блока,
датчик оборотов лебедки

Для цитирования: Переверзин П. В., Переверзин А. П., Фетисов В. С., Миловзоров Д. Г. Разработка современных систем измерения глубины погружения бурильной колонны в процессе каротажа на бурильных трубах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 135-144. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-135-144>.

Original article

DEVELOPMENT OF MODERN SYSTEMS FOR MEASURING THE DEPTH OF A DRILLING RIG DURING THE LOGGING ON A DRILL PIPE

Relevance

One of the important tasks in the logging on a drill pipe is to measure the depth of the drilling rig into the well. It is now common practice to use drilling speed measurement systems as part of the well exploration equipment. However, it has been shown that the existing methodological and hardware solutions cannot provide the required accuracy of geological positioning, quick installation and universal sensor design. Therefore, the question of developing depth measurement systems for well geophysical instrumentation descending on drilling pipes is urgent and requires a solution based on previous experience and modern advances in electronic engineering.

Aim of research

Study of methodological and hardware aspects of the operation of systems for measuring depth of the drilling rig in the well, formulation of requirements for the design of sensors measuring displacement of the hoist block, proposal of a concept for the development of modern systems of drilling rig depth measurement in the process of logging.

Keywords

geophysical well investigation, logging on a drill pipe, mechanical drilling speed, depth of sinking of the drilling rig, system for measuring the drilling rig depth during logging, sensor of displacement of the hoist block, winch speed sensor

Research methods

Use of the authors' long-term experience in developing and applying various systems for measuring the depth of a drilling rig, analysis of literature and scientific publications on this subject.

Results

The features of application of the winch revolution sensor, used by the geological investigation service for recording the mechanical speed of drilling are considered, the basic requirements for hardware and methodological aspects of the problem of developing systems for measuring depth of the drilling rig in the well in the process of logging are formulated, a concept for further development of such systems is proposed.

For citation: Pereverzin P. V., Pereverzin A. P., Fetisov V. S., Milovzorov D. G. Razrabotka sovremennykh sistem izmereniya glubiny pogruzheniya buril'noi kolonny v protsesse karotazha na buril'nykh trubakh [Development of Modern Systems for Measuring the Depth of a Drilling Rig during the Logging on a Drill Pipe]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 135-144 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-135-144>.

Введение

Строительство и эксплуатация нефтегазовых скважин представляет собой сложный технологический процесс, включающий в себя геофизическое исследование скважины (ГИС). MWD (Measurements while Drilling) и LWD (Logging while Drilling) — это две главные технологии ГИС, которые применяются непосредственно при бурении скважин [1]. При использовании MWD измеряют геометрические параметры ствола скважины, например его азимут и зенитный угол [2]. При реализации LWD выполняют каротажные измерения, которые необходимы для получения информации о геологической структуре разбуриваемых пород [3].

В обеих указанных технологиях автономные скважинные приборы доставляются в забой с помощью бурильной колонны. Одной из задач при этом является привязка полученной информации по глубине, на основе которой происходит принятие решений о расположении геологических интервалов и планировании последующих производственных операций [4, 5].

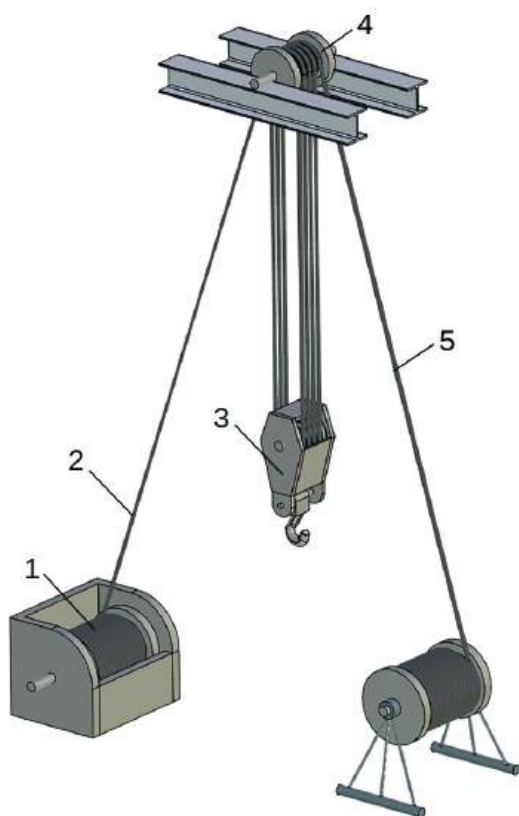
Спуск и подъем бурильной колонны осуществляются с помощью механизма,

показанного на рисунке 1. Он включает в себя буровую лебедку и талевую систему. Механизм приводится в действие, как правило, электродвигателем.

Информацию о перемещении бурильной колонны внутри скважины можно получить, измеряя перемещение талевых блока. Но эта информация может оказаться искаженной, так как при выполнении спуско-подъемных работ выполняют некоторые вспомогательные операции, во время которых возникают «холостые пробеги», когда бурильная колонна не движется. Холостые пробеги легко идентифицируются по весу на талевом блоке [6].

Измерение скорости бурения (проходки)

В процессе бурения служба геологического исследования (ГТИ) непрерывно производит измерения механической скорости бурения (проходки). Это выполняется методом непрерывного автоматизированного измерения длины бурильной колонны, спускаемой в скважину, и является ключевой характеристикой эффективности разбуривания породы [7]. При этом мгновенная скорость перемещения колонны характери-



1 — буровая лебедка; 2 — ходовая ветвь талевого каната; 3 — талевый блок; 4 — кронблок; 5 — неподвижная ветвь талевого каната

1 — drill winch; 2 — moving branch of the rope; 3 — hook block; 4 — crown block; 5 — fixed branch of the rope

Рисунок 1. Спуско-подъемный механизм

Figure 1. Lifting mechanism

зается как быстро меняющаяся величина с большими значениями дисперсии, поэтому она практически непригодна для использования в системах управления бурением. В связи с этим используют другую величину — среднюю механическую скорость [8]:

$$v_{\text{ср.}} = \Delta h / \Delta t,$$

где Δh — приращение длины буровой колонны за некоторый интервал времени Δt .

На первый взгляд, регистрируемая службой ГТИ кривая глубины погружения буровой колонны в скважину $h(t)$ — это и есть тот параметр, который

позволит привязать информацию каротажа по глубине, но, как показывает практика, это не всегда возможно.

Обычно для измерения $h(t)$ используют датчики оборотов лебедки (ДОЛ), примеры которых показаны на рисунках 2 и 3. ДОЛ преобразует углы поворота вала лебедки в импульсы. Их количество пропорционально перемещению талевого блока (а значит, и перемещению буровой колонны) [9].

Для устранения указанных погрешностей применяют коррекцию по мере инструмента. Это хорошо известная технология, когда до начала бурения, используя мерную рулетку, выполняют промер труб и других элементов буровой колонны на поверхности [9, 10], а в процессе спуска в скважину оператор службы ГТИ, в случае расхождения показаний ДОЛ с мерой, оперативно корректирует текущее значение глубины или коэффициент преобразования ДОЛ.



Рисунок 2. Датчик оборотов вала буровой лебедки

Figure 2. Drill winch revolution sensor



Рисунок 3. Датчик оборотов лебедки с ременной передачей крутящего момента

Figure 3. Drill winch revolution sensor with belt transmission

В результате график глубины погружения бурильной колонны в скважину на отдельных участках может иметь ступенчатый характер, но в целом, это не оказывает существенного влияния на точность определения механической скорости бурения v_{cp} , т.к. при её вычислении используют метод осреднения на заданном интервале времени [7].

На рисунке 4 показан типичный пример выполнения службой ГТИ коррекции по мере инструмента в процессе каротажа на трубах (MWD) на скважине 13858 (Южно-Приобское месторождение). Здесь на графике глубины имеется резкий переход (ступенька) со значения 3152,17 м до 3161,00 м, что составляет 8,83 м. Как видно из табличных данных, расчетное значение мгновенной скорости в 2:01:09 составило 6357,6 м/ч, а в соседних точках — 0 м/ч. Очевидно, что буровая лебедка не способна за короткий отрезок времени достичь такой скорости и мгновенно остановиться, поэтому

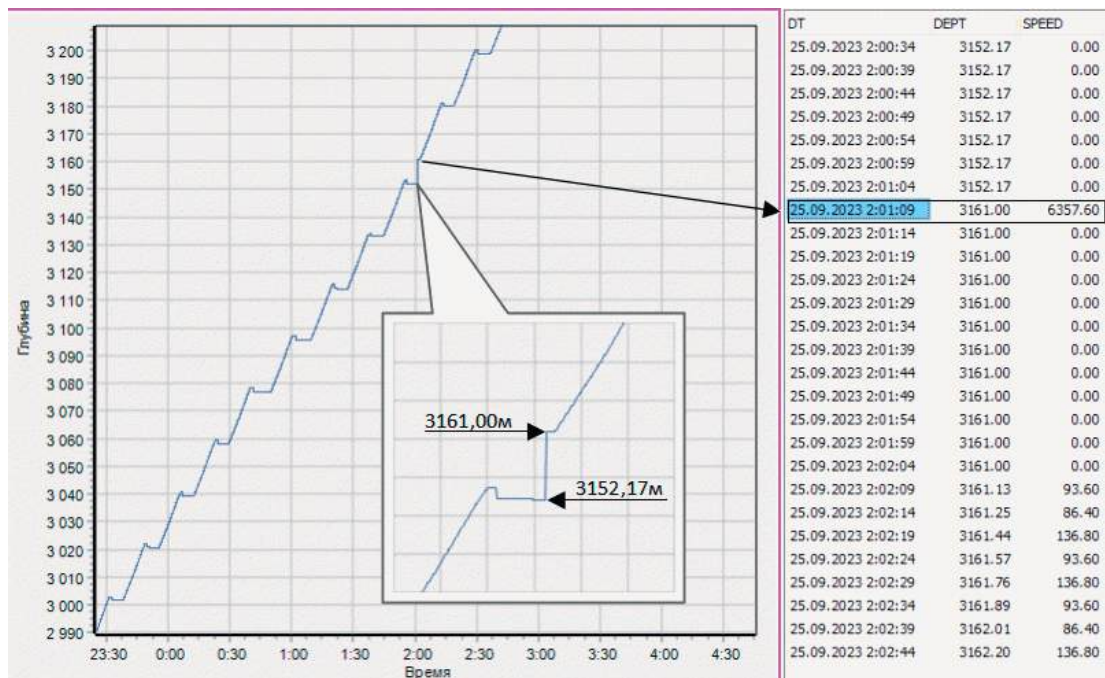


Рисунок 4. Пример коррекции по мере инструмента службы ГТИ в процессе каротажа на трубах (MWD) на скважине 13858, Южно-Приобское месторождение

Figure 4. Example of correction with instrument standard applied by the geological investigation service in process of logging, Borehole 13858, Yuzhno-Priobskoye field

можно сделать вывод, что этот скачок является результатом применения службой ГТИ коррекции по мере инструмента, и данные о мгновенной скорости в этот момент времени недостоверны.

Привязка по глубине данных ГИС

Для качественной привязки по глубине данных ГИС на бурильных трубах требуется точное значение мгновенной механической скорости бурения. Если для её вычисления использовать график глубины погружения бурильной колонны с коррекцией по мере инструмента, то на интервалах, где была применена коррекция, получить достоверные данные о расположении геологических интервалов будет невозможно. Специалистам, работающим в сфере ГТИ, понятно, что, как было описано выше, перед службой ГТИ стоят несколько иные задачи, которые они успешно решают, и поэтому не стоит ожидать с их стороны какого-либо качественного прорыва в области технологий измерения глубины погружения бурильной колонны ввиду отсутствия такой необходимости.

Таким образом, при разработке скважинной геофизической аппаратуры довольно актуальным является дополнение такой аппаратуры системой измерения глубины погружения бурильной колонны в процессе каротажа, которая должна включать в себя: датчик перемещения талевого блока (глубиномер), датчик веса на талевом блоке и соответствующее программное обеспечение для формирования кривой глубины. Приступая к реализации такой системы, необходимо предварительно изучить все аспекты этого вопроса и выработать концепцию дальнейшего развития, опираясь на опыт специалистов в области ГТИ, современные возможности электронной инженерии и руководствуясь актуальными требованиями, предъявляемыми к

подобной аппаратуре при проведения ГИС.

Методы измерения перемещения талевого блока

Задача измерения веса на талевом блоке хорошо изучена и не вызывает вопросов у специалистов, поэтому ключевым элементом разрабатываемой системы является глубиномер. Описанию методов измерения и конструкции датчиков перемещения талевого блока посвящено значительное количество литературы [7–9, 11]. Наиболее полная классификация измерителей глубины (таблица 1), сохранившая свою актуальность и на сегодняшний день в части разделения по принципу действия, приведена Э.Е. Лукьяновым и В.В. Стрельченко в [11]. Между тем, как показывает практика, вопрос разработки измерителей глубины погружения бурильной колонны остается открытым и в сфере ГТИ. Сложные условия эксплуатации измерительной аппаратуры в совокупности с требованиями по ее точности, надежности, универсальности и стоимости вынуждают искать новые решения.

При выборе метода измерения необходимо понимать различия в организации работ на буровой при проведении ГТИ и ГИС. Служба ГТИ всегда находится на буровой установке, перемещается вместе с ней по всему месторождению и выполняет работы по установке наземных датчиков только при переезде на новую скважину. В свою очередь, геофизическому отряду, выполняющему ГИС, на подготовку к каротажу отводится только несколько часов. При этом на каждой буровой установке техник-геофизик, кроме подготовки скважинной аппаратуры, вынужден затрачивать значительное время на трудоемкий монтаж/демонтаж наземных измерительных преобразователей, включающий прокладку питающих кабелей и калибровку датчи-

ков. Дополнительный отрицательный фактор в этой ситуации — это многообразие конструкций самих буровых установок.

Между тем, в настоящее время наряду с достоверностью полученных данных ГИС, на первый план выходит и необходимость оперативной выдачи его результатов [6, 12], что невозможно обеспечить, используя существующие конструкции первичных преобразователей службы ГТИ.

Актуальные требования к системам измерения глубины

Исходя из вышеперечисленного, сформулируем требования как к аппаратным, так и к методическим аспектам задачи разработки системы измерения

глубины погружения в процессе каротажа на бурильных трубах [6].

Во-первых, конструкция датчиков должна быть такой, чтобы обеспечивалась возможность их быстрого монтажа или демонтажа одним человеком без внесения каких-либо изменений в конструкции буровой установки.

Во-вторых, датчики должны быть достаточно универсальными в смысле способов их установки, так как модели буровых установок довольно разнообразны и условия размещения на них дополнительного оборудования тоже разные.

В-третьих, установленные измерительные устройства не должны оказывать негативного влияния на безопасность эксплуатации буровой установки.

Таблица 1. Классификация измерителей перемещения талевого блока

Table 1. Classification of traveling block displacement meters

Признак классификации		Типы измерителей перемещения талевого блока (измерителей глубины)				
По принципу действия	Основной	Гидростатические	Тросовые	Связанные с вращением ролика кранблока	Связанные с ходовым концом талевого каната	Связанные с барабаном лебедки
	Дополнительный	Напорный сосуд на вертлюге	С противогрузом	Фрикционные	Фрикционные	Торцевые со шкивом, со звездочкой
		Шланг вокруг бурового рукава	С подмоткой	С разъемной шестерней	Бесконтактные	Фрикционные от реборды барабана
По типу преобразователя	Датчик давления		Сельсин	Сельсин	Сельсин	Сельсин
			Мерный барабан	Индуктивный Электромагнитный	Оптический Электромагнитный	Оптический
По месту установки преобразователя	Пол буровой		Подкранблочная площадка	Подкранблочная площадка	Успокоитель талевого каната над лебедкой	Лебедка
			Пол буровой			Вал лебедки
По удобству монтажа	Неудобно		Неудобно	Неудобно	Неудобно	Удобно
По точности	Низкая		Низкая	Высокая	Низкая	Высокая
По надежности	Низкая		Низкая	Низкая	Низкая	Высокая

Обобщенная концепция разработки современных систем измерения глубины

Из сформулированных выше требований вытекает обобщенная концепция разработки современных систем измерения глубины в процессе каротажа на бурильных трубах. При выборе метода измерения перемещения талевого блока в первую очередь необходимо ориентироваться на возможность оперативного монтажа первичных преобразователей, которые должны быть реализованы в виде беспроводных устройств с батарейным питанием. Соответственно в качестве первичных преобразователей целесообразно использовать миниатюрные, малопотребляющие датчики физических величин с возможностью работы от одного элемента питания. Современная электронная промышленность предоставляет для этого большой выбор:

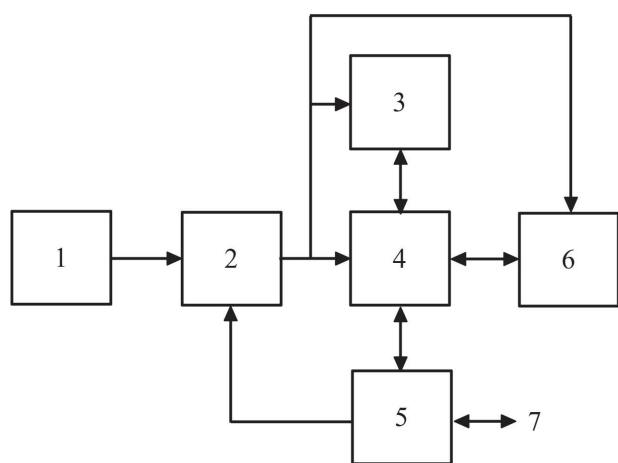
- МЭМС-акселерометры;
- индуктивные датчики;
- датчики магнитного поля;
- тензорезистивные датчики давления;
- акустические и лазерные дальномеры, лидары;
- датчики атмосферного давления с высоким разрешением и др.

Также в настоящее время получили распространение средства для высокоскоростной беспроводной передачи данных. Однако, учитывая технологию проведения ГИС на бурильных трубах, отпадает необходимость передачи информации о глубине в реальном времени. Измеренные данные можно хранить во встроенной энергонезависимой памяти и считывать их после завершения каротажа. Это позволит уменьшить габариты и увеличивать время непрерывной работы автономной аппаратуры за счет экономии энергии. В свою очередь, для батарейного питания автономных

устройств доступны различные химические источники тока (как правило на основе лития), обеспечивающие стабильную работу в условиях низких температур (до минус 50 °С).

Исходя из представленной концепции структурная схема датчика, входящего в состав системы измерения глубины, будет иметь вид, приведенный на рисунке 5. В качестве элемента питания 1 можно использовать литиевый гальванический элемент. Преобразователь напряжения 2 представляет собой энергоэффективный DC-DC импульсный повышающий/понижающий преобразователь напряжения с выходным напряжением 3,3 В. Для сохранения значений измеряемых параметров служит модуль энергонезависимой памяти 3. Микроконтроллер 4 осуществляет управление работой всех узлов устройства и выполнение необходимых вычислений. Преобразователь интерфейсов 5 служит для связи с внешним компьютером 7. В качестве чувствительного элемента 6 может быть использован один из датчиков физических величин, указанных выше.

Следует отметить, что датчик глубины, как и все измерительные устройства, после выполнения монтажа на буровой установке должен подвергаться калибровке. Этот вопрос также необходимо учитывать при разработке системы измерения глубины с учетом перечисленных выше требований и условий эксплуатации. Один из возможных вариантов решения задачи калибровки — это оснащение системы дополнительными устройствами, позволяющими автоматизировать процесс и сократить время подготовки к каротажу. Очевидно, что подходы и решения при разработке дополнительных датчиков должны быть аналогичны приведенным в данной работе.



1 — элемент питания;
2 — преобразователь напряжения;
3 — энергонезависимая память;
4 — микроконтроллер;
5 — преобразователь интерфейсов;
6 — чувствительный элемент;
7 — персональный компьютер

1 — power supply; 2 — voltage converter;
3 — energy-independent memory;
4 — microcontroller; 5 — interface converter;
6 — sensor; 7 — personal computer

Рисунок 5. Структурная схема первичного преобразователя (датчика)

Figure 5. Structural diagram of the measuring transducer

Выводы

Анализ существующего положения дел в области измерения глубины погружения бурильной колонны показал, что используемые системы не обеспечивают требуемую точность, универсальность и оперативность монтажа на буровой уста-

новке для использования их в процессе каротажа на бурильных трубах. Сформулированы основные требования к таким системам. Предложена концепция их дальнейшего развития на основе современных достижений электронной инженерии.

Список источников

1. Итоги научно-практической конференции «Современные технические средства управления траекторией скважин». МОО ЕАГО, Москва, 2023. Online. Доступно на сайте: URL: https://eago.ru/f/itogi_konferencii_gis_2023.pdf (дата обращения: 09.09.2024).

2. Chin W.C. Measurement while Drilling: Signal Analysis, Optimization and Design. 2nd ed. John Wiley & Sons Limited, 2018. 522 p. ISBN: 978-1-119-47930-7.

3. Prawira A.Y. Logging while Drilling Operation // Engineering Solid Mechanics. 2019. No. 7. P. 163-178. DOI: 10.5267/j.esm.2019.6.001.

4. Wang Y., Wen G., Chen H. Horizontal Directional Drilling-Length Detection Technology while Drilling Based on Bi-Electro-Magnetic Sensing // Sensors. 2017. No. 17. Vol. 967. DOI: 10.3390/s17050967.

5. Huang M., Chen Z., Hong C., Sha P., Wu Z. Intelligent Drilling Depth Monitoring System for Geotechnical Site Investigation // Shock and Vibration. 2022. Article ID 6730484. <https://doi.org/10.1155/2022/6730484>.

6. Переверзин П.В. Особенности применения глубиномера в составе АМК «ГОРИЗОНТ» //

Каротажник. 2014. № 3 (237). С. 56-68. EDN: SAEJJT.

7. Бражников В.А., Фурнэ А.А. Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин. М.: Недра, 1989. 206 с. ISBN: 5-247-01394-8.

8. Бражников В.А., Кузнецов В.А. Информационные устройства для определения эффективности управления процессом бурения. М.: Недра, 1978. 108 с.

9. Лукьянов Э.Е., Стрельченко В.В. Геологические исследования в процессе бурения. М.: Нефть и газ, 1997. 688 с. ISBN: 5-7246-0042-0.

10. Васильев С.И., Лапушова Л.А. Датчики систем автоматизации технологических процессов бурения нефтяных и газовых скважин. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. 138 с. ISBN: 978-5-91327-416-8. DOI: 10.17513/np.20. EDN: YMIXRP.

11. Ракитин М.В., Игленкова Е.А., Штепин Д.В., Васильев Д.В., Асанова Т.Р. Технология увязки данных ГИС при бурении сверхпротяженных наклонно-горизонтальных скважин // Каротажник. 2014. № 8 (242). С. 33-40. EDN: SIKMAL.

12. Калугин О.В., Власенко П.И., Власенко Е.П. Новые возможности программно-аппаратурных комплексов для каротажа на буровых трубах современной аппаратурой ООО «Нефтегазгеофизика» // Каротажник. 2021. № 6 (312). С. 194-204. EDN: PRXUTK.

References

1. *Itogi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye tekhnicheskie sredstva upravleniya traektoriei skvazhin»* [Results of the Scientific and Practical Conference «Modern Technical Means of Well Trajectory Control»]. MOO EAGO, Moskva, 2023. Online. Available at: URL: https://eago.ru/f/itogi_konferencii_gis_2023.pdf (accessed 09.09.2024). [in Russian].
2. Chin W.C. *Measurement while Drilling: Signal Analysis, Optimization and Design*. 2nd ed. John Wiley & Sons Limited, 2018. 522 p. ISBN: 978-1-119-47930-7.
3. Prawira A.Y. Logging while Drilling Operation. *Engineering Solid Mechanics*, 2019, No. 7, pp. 163-178. DOI: 10.5267/j.esm.2019.6.001.
4. Wang Y., Wen G., Chen H. Horizontal Directional Drilling-Length Detection Technology while Drilling Based on Bi-Electro-Magnetic Sensing. *Sensors*, 2017, No. 17, Vol. 967. DOI: 10.3390/s17050967.
5. Huang M., Chen Z., Hong C., Sha P., Wu Z. Intelligent Drilling Depth Monitoring System for Geotechnical Site Investigation. *Shock and Vibration*, 2022, Article ID 6730484. <https://doi.org/10.1155/2022/6730484>.
6. Pereverzin P.V. Osobennosti primeneniya glubinomera v sostave AMK «GORIZONT» [Deep-Meter Use Peculiarities When It Is Used in the Complex of Amk Gorizont]. *Karotazhnik — Well Logger*, 2014, No. 3 (237), pp. 56-68. EDN: SAEJTT. [in Russian].
7. Brazhnikov V.A., Furne A.A. *Informatsionnoe obespechenie optimal'nogo upravleniya bureniem skvazhin* [Information Support for Optimal Control of Well Drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 206 p. ISBN: 5-247-01394-8. [in Russian]. [in Russian].
8. Brazhnikov V.A., Kuznetsov V.A. *Informatsionnye ustroystva dlya opredeleniya effektivnosti upravleniya protsessom bureniya* [Information Devices for Determining the Efficiency of Drilling Process Control]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 108 p. [in Russian]. [in Russian].
9. Luk'yanov E.E., Strel'chenko V.V. *Geologo-tekhnologicheskie issledovaniya v protsesse bureniya* [Geological and Technological Studies during Drilling]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 1997. 688 p. ISBN: 5-7246-0042-0. [in Russian]. [in Russian].
10. Vasil'ev S.I., Lapushova L.A. Datchiki sistem avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov bureniya neftnykh i gazovykh skvazhin [Sensors for Automation Systems of Technological Processes of Drilling Oil and Gas Wells]. Moscow, Izdatel'skii dom Akademii Estestvoznaniya, 2016. 138 p. ISBN: 978-5-91327-416-8. DOI: 10.17513/np.20. EDN: YMIXRP. [in Russian].
11. Rakitin M.V., Iglenkova E.A., Shtepin D.V., Vasil'ev D.V., Assanova T.R. Tekhnologiya uvyazki dannykh GIS pri burenii sverkhprotyazhennykh naklonno-gorizontallykh skvazhin [Technology for Matching Well Logging Data in Drilling Super-Long Inclined and Horizontal Wells]. *Karotazhnik — Well Logger*, 2014, No. 8 (242), pp. 33-40. EDN: SIKMAL. [in Russian].
12. Kalugin O.V., Vlasenko P.I., Vlasenko E.P. Novye vozmozhnosti programmno-apparaturnykh kompleksov dlya karotazha na burovyykh trubakh sovremennoi apparaturoi ООО «Нефтегазгеофизика» [Novel Capabilities of Software-and-Tool Systems for Drillstem Logging Using State-of-the-Art Tools Designed by Neftegazgeofizika LLC]. *Karotazhnik — Well Logger*, 2021, No. 6 (312), pp. 194-204. EDN: PRXUTK. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 16.09.2024; одобрена после рецензирования 23.09.2024; принята к публикации 25.09.2024.

The article was submitted 16.09.2024; approved after reviewing 23.09.2024; accepted for publication 25.09.2024.

Научная статья

УДК 004.93

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-145-156

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ФАЗ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ В ТРУБОПРОВОДЕ СТЕНДА

**Дим Русланович Хурамшин****Dim R. Khuramshin**

магистрант Высшей школы информационных и социальных технологий,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

**Рим Рамазанович Уликанов****Rim R. Ulikanov**

заведующий лабораторией математического моделирования и разработки
программного обеспечения, ООО «НИИ Транснефть»,
Москва, Россия

**Сергей Николаевич Коледин****Sergey N. Koledin**

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры
информационных технологий и прикладной математики,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

Актуальность

Проблема внутренней коррозии в трубопроводном транспорте нефтепродуктов, вызванная накоплением воды, остается недостаточно исследованной, особенно в линейной части трубопровода, где обнаружение статических водяных зон затруднено.

Специализированные гидродинамические стенды, моделирующие перекачку модельной жидкости с формированием водных скоплений в нижних точках, предоставляют важные данные для изучения динамики процесса их накопления. Стенды оборудованы датчиками для измерения и контроля параметров режима течения, таких как: угол наклона измерительной линии, скорость течения жидкости, концентрация воды в смеси и значения давления в измерительной линии. Однако объем водного скопления невозможно точно определить напрямую при помощи имеющихся датчиков из-за изменяющихся условий эксперимента и непрерывного изменения уровня жидкости в нижней точке при накоплении и удалении воды. Для вывода математических моделей закономерностей параметров трубопровода и скоплений и оптимизации процессов перекачки необходимо обеспечить в режиме реального времени

Ключевые слова

внутренняя коррозия,
трубопроводный
транспорт, водные
скопления, компьютерное
зрение, программное
обеспечение,
гидродинамический стенд

динамически и точно измерение объема воды в лабораторных условиях. Применение методов компьютерного зрения представляет собой перспективный подход для измерения объема водных скоплений.

Цель исследования

Целью исследования является создание программного обеспечения для определения объема водных скоплений в трубопроводе стенда с использованием методов компьютерного зрения.

Методы исследования

В ходе исследования были использованы видеоматериалы работы блока для накопления и выноса воды (БНВВ) гидродинамической установки «стенд для исследования течения жидкости в трубопроводе», находящейся в НТЦ ООО «НИИ «Транснефть». По полученным видеоматериалам необходимо вычислить объем водных скоплений на указанных кадрах видеороликов.

Для решения задачи рассмотрены методы, применяемые при измерении объема жидкости в прозрачных емкостях. Однако эти методы предполагают вертикальное расположение емкостей и размещение камеры перпендикулярно объекту измерения, что не подходит для неоднородной формы трубы. Вертикальное изучение трубопровода также вносит искажения из-за различной ширины трубы в различных пикселях изображения.

Разработан алгоритм, учитывающий прозрачность воды и основанный на вычислении объема трубопровода на каждом пикселе изображения. Для устранения влияния фона за водой, использовались полотна красного и черного цветов. Использован метод выделения объектов на основе анализа цвета (color-based) в цветовом пространстве RGB. Важным аспектом при выборе этого метода является его простота в реализации и высокая скорость обработки.

Для обработки данных и изображений, а также для разработки графического интерфейса программы был выбран язык программирования Python и библиотеки OpenCV и PyQt5.

Результаты

Разработанное программное обеспечение представляет собой инновационный подход к решению поставленной задачи и демонстрирует относительную точность в определении объема водных скоплений в трубопроводе на специальном гидродинамическом стенде. Результаты сравнения численных и экспериментальных данных демонстрируют погрешность не более 9 %, что подтверждает эффективность предложенного метода. В дальнейшем полученные данные в результате работы программы могут быть использованы специалистами трубопроводного транспорта для определения закономерностей изменения параметров трубопровода, имеющего водные скопления.

Для цитирования: Хураштин Д. Р., Уликанов Р. Р., Коледин С. Н. Разработка программного обеспечения для определения объема фаз двухфазной смеси в трубопроводе стенда // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 145-156. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-145-156>.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR DETERMINING THE VOLUME OF PHASES OF A TWO-PHASE MIXTURE IN THE PIPELINE OF THE STAND

Relevance

The problem of internal corrosion in pipeline transport of petroleum products, caused by the accumulation of water, remains insufficiently studied, especially in the linear part of the pipeline, where detection of static water zones is difficult. Effectively controlling the hydraulic flow regime of a multiphase fluid is a key method of preventing internal corrosion, especially at low points in the pipeline, by reducing fluid accumulation.

Specialized hydrodynamic stands that simulate the pumping of a model fluid with the formation of water accumulations provide important data for studying the dynamics of the accumulation process. The stands are equipped with sensors for measuring and monitoring parameters during research, such as the angle of inclination of the measuring line, the speed of liquid flow, the concentration of water in the mixture, and the pressure values in the measuring line. These parameters can be measured with high accuracy using appropriate sensors. However, the volume of water accumulation cannot be accurately determined directly using sensors due to the changing experimental conditions and the continuous change in the liquid level during accumulation and removal of water. To derive mathematical models of patterns in pipeline parameters and accumulations and optimize pumping processes, it is necessary to provide real-time, dynamic and accurate measurements of water volume in laboratory conditions. The use of computer vision techniques represents a promising approach for measuring the volume of water accumulations.

Aim of research

Aim of research is to create software for determining the volume of water copies on a pipeline stand using computer vision methods.

Research methods

During the study, video materials of the operation of the block for accumulation and removal of water (BARW) of the hydrodynamic installation «stand for studying the flow of liquid in a pipeline», which is located at the Scientific and Technical Center of Transneft Research Institute LLC, were used. It is necessary to calculate the volume of water accumulations in the specified video frames.

To solve the problem, methods used in measuring the volume of liquid in transparent containers are considered. However, these methods require vertical placement of containers and placement of the camera perpendicular to the measurement object, which is not suitable for non-uniform pipe shapes. Vertical examination of a pipeline also introduces distortions due to the different widths of the pipe at different pixels in the image.

An algorithm has been developed that takes into account water transparency and is based on calculating the volume of the pipeline at each pixel of the image. A method for identifying objects based on color analysis (color-based) was used, taking into account water transparency. To eliminate the influence of the background behind the water, canvases of red and black colors were used. The color-based method was used in the RGB color space. An important aspect when choosing this method is its ease of implementation and high processing speed.

Keywords

internal corrosion, pipeline transport, water accumulations, computer vision, software, hydrodynamic stand

To process data and images, as well as to develop a graphical interface for the program, the Python programming language and the OpenCV and PyQt5 libraries were chosen.

Results

The developed software represents an innovative approach to solving the problem and demonstrates relative accuracy in determining the volume of water accumulations in a pipeline on a special hydrodynamic stand. The results of comparison of numerical and experimental data show an error of no more than 9 %, which confirms the effectiveness of the proposed method. The data obtained as a result of the program will be used for study by pipeline transport specialists to determine the patterns of pipeline parameters, oil pumping modes and the amount of water accumulation. The discovered patterns will make it possible to minimize the risk of internal corrosion and increase the reliability of pipelines.

Для цитирования: Khuramshin D. R., Ulikanov R. R., Koledin S. N. Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya opredeleniya ob"ema faz dvukhfaznoi smesi v truboprovode stenda [Software Development for Determining the Volume of Phases of a Two-Phase Mixture in the Pipeline of the Stand]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 145-156 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-3-145-156>.

Введение

В трубопроводном транспорте жидких углеводородов существует проблема внутренней коррозии, обусловленная наличием водных скоплений, расположенных в низких точках профиля трубопровода [1]. Обнаружение квазистатических водяных зон в линейной части трубопровода является сложной задачей и в настоящее время не решена.

Одним из эффективных способов борьбы с водными скоплениями является задание оптимального режима течения. Это направление работы позволяет уменьшить накопление жидкостей в системе, что, в свою очередь, оказывает положительный эффект на снижение или исключение внутренней коррозии [2, 3].

Изучение динамики формирования, накопления и миграции водных скоплений происходит, в том числе, на специальных гидродинамических стендах, позволяющих моделировать перекачку модельной жидкости с возможностью формирования водных скоплений. Для установления зависимости изменения объема водного скопления от расхода двухфазной жидкости проводятся эксперименты с различными параметрами

расхода модельной жидкости и угловыми положениями измерительной линии с дальнейшим определением объема водного скопления [3–5].

Определение объема водных скоплений в каждый момент времени является основной задачей при выполнении экспериментальных исследований и разработки математических моделей. Для обеспечения скорости и точности измерений предлагается применять методы компьютерного зрения.

Целью данной работы является создание программного обеспечения для определения объема водных скоплений в трубопроводе стенда с использованием методов компьютерного зрения.

Экспериментальная установка и постановка задачи

Оборудование для исследования параметров течения жидкости в трубопроводах находится в ООО НТЦ «НИИ Транснефть». В составе размещенного в одном помещении стенда (рисунок 1) предусмотрено несколько блоков, каждый из которых предназначен для определенной цели [4, 6]:

1. блок с изменяемой геометрией (БИГ) – для моделирования процессов самотечного течения жидкости, вытеснения жидкости сжатым воздухом или инертным газом, а также выноса газа при различных углах наклона трубопровода;

2. блок накопления и выноса воды (БНВВ) – для исследования процессов накопления и выноса воды при различных углах наклона трубопровода;

3. блок нестационарных процессов (БНП) – для моделирования утечек жидкости из трубопровода и исследования методов их обнаружения, моделирования и исследования движения волн давления по трубопроводам (гидравлического удара);

4. блок четырех насосных агрегатов (БЧНА) – для моделирования режимов

работы трубопровода с различными вариантами подключения насосных агрегатов;

5. блок последовательной перекачки (БПП) – для исследования процессов смесеобразования при последовательной перекачке различных жидкостей, в том числе и процессов дополнительного смесеобразования при остановке последовательной перекачки и влияния тупиковых отводов;

6. блок емкостей (БЕ) – для приема, хранения и отпуска модельных жидкостей.

Для исследования процессов накопления и выноса воды внутри трубопроводов, рассматриваемых в данной работе, наиболее подходящим является БНВВ (рисунок 2).



Рисунок 1. Общий вид стенда «НИИ Транснефть»

Figure 1. General view of the Transneft Research Institute stand



Рисунок 2. Общий вид блока накопления и выноса воды

Figure 2. General view of the water accumulation and removal block

Стенд оборудован датчиками для измерения и контроля различных параметров и характеристик в процессе исследований, таких как угол наклона измерительной линии, скорость течения жидкости, концентрация воды в смеси, а также значения давления в измерительной линии [5].

Следует отметить, объем водного скопления невозможно определить напрямую при помощи имеющихся датчиков на данной установке. Это связано с тем, что уровень жидкости может динамически изменяться во время проведения эксперимента.

В связи с этим поставлены задачи:

1. При помощи алгоритмов компьютерного зрения рассчитать объем жидкости внутри трубопровода;
2. Расчеты производить на основе фото- или видеоматериалов работы стенда;
3. Предусмотреть ввод параметров, влияющих на процесс скопления и вывод полученных результатов в excel файл и в виде графика в окне программы.

Подобное решение автоматизирует процесс определения объема жидкости в нижней точке экспериментального тру-

бопровода, что сократит время на обработку результатов эксперимента.

Модель расчета

На данный момент задача по определению количества жидкости в БНВВ решена с использованием мерных шаблонов, изготовленных для различных углов наклона измерительной секции. Имеющееся решение может быть использовано при остановленном режиме перекачки, но для случая, когда ведется перекачка модельной жидкости, задача по определению объема водного скопления не решена. Для поиска подходящего решения этой задачи рассмотрены исследования, связанные с определением объема жидкости в прозрачных емкостях. Однако методы, разработанные для таких емкостей, предполагают вертикальное расположение емкостей, размещение камеры в перпендикулярном положении к объекту измерения, а также наличие точных данных о характеристиках самих емкостей и известном объеме жидкости в них [7]. Эти методы обычно сводятся к определению объема жидкости через измерение площадей поверхности емкости и

площади жидкости, в случае если форма последней является равномерной [8], или через определение границы между жидкостью и емкостью и последующее соотнесение этой границы с мерной шкалой, размещенной вблизи емкости (рисунок 3).

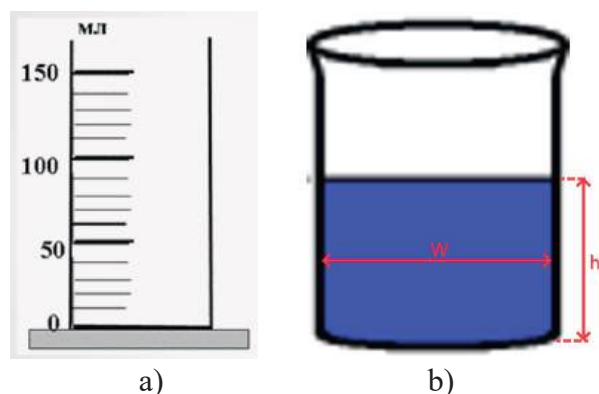
Однако описанные методы не применимы к задаче определения объема жидкости внутри трубопроводов, наклоненных к горизонтальной оси (рисунок 4, а).

Для решения данной задачи был разработан следующий алгоритм, заключающийся в вычислении объема трубопровода на каждом пикселе изображения путем перемножения значения пикселя изображения на площадь соответствующего сегмента трубопровода (рисунок 4, б):

$$S_{BCD} = R^2 \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) - (R - h)\sqrt{2Rh - h^2},$$

где h — высота водного скопления;
 R — радиус трубы.

Для вычисления объема (рисунок 4) необходимо знать высоту водного скопления, радиус трубы в пикселях, а



а) мерная шкала; б) цилиндрическая емкость

a) measuring scale; b) cylindrical container

Рисунок 3. Измерение в прозрачных емкостях

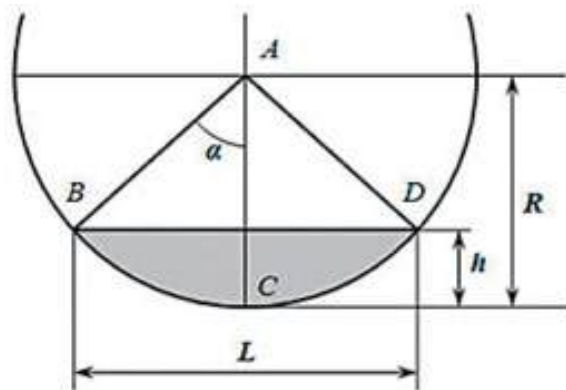
Figure 3. Measurement in transparent containers

также коэффициент перевода величин из пикселей в действительные. Данные величины возможно определить, зная границы водного скопления, их положение выделяется при помощи алгоритмов компьютерного зрения.

В решении данной задачи был выбран наиболее эффективный метод выделения объектов на основе анализа цвета (color-based). Этот выбор обоснован явными различиями в цветовой характеристике масла и воды внутри трубопровода при отсутствии четко определенной геометрической формы водных скоплений, что делает невозможным их описание конкретными геометрическими фигурами. Кроме того, данный метод отличается простотой реализации и не требует зна-



а)



б)

а) изображение трубы;
 б) площадь сегмента трубы

a) image of a pipe;
 b) area of the pipe segment

Рисунок 4. Экспериментальный стенд

Figure 4. Experimental stand

чительных вычислительных ресурсов [9, 10].

Важным аспектом при выборе метода color-based для решения данной задачи является прозрачность воды. Поскольку вода является прозрачным веществом, не сами водные скопления, а фон, который находится за стендом, влияет на определение цвета на изображении. Для устранения этой сложности, позади стенда устанавливались полотна.

Применение метода color-based осуществлялось в цветовом пространстве RGB (red, green, blue). Для его применения необходимо было выбрать интересующий цвет или диапазон цветов, который соответствует цвету воды на изображении. Затем производился анализ изображения и выделение пикселей, соответствующих выбранному цвету или диапазону цветов. Диапазон цветов формировался на основе анализа цветов воды на изображениях.

В рамках исследования были рассмотрены два варианта использования полотен разных цветов, а именно красного и черного. Оказалось, что полотно красного цвета превосходит черное в данном контексте, поскольку различия между цветами масла и воды были более выразительными. В отличие от этого, черное полотно оказалось недостаточно плотным, что приводило к просвечиванию белой стены на фоне, влияя на точность разделения цветов масла и воды.

Основными преимуществами данного метода являются его простота в реализации и скорость обработки изображений, позволяющая получать результаты более оперативно по сравнению с альтернативными методами. Кроме того, учет цвета

на изображении является важным критерием для надежного выделения объектов, обеспечивая высокую точность и надежность в результате обработки изображений.

Принцип работы программы

Для реализации программы был выбран язык Python в силу его высокого уровня и богатого набора библиотек, в том числе в области обработки данных и изображений. Для работы с изображениями и видео использовалась библиотека OpenCV, предоставляющая инструменты для создания приложений в области компьютерного зрения, а также обладающая активным сообществом, что обеспечивает доступ к решениям и советам в ходе разработки. Разработка графического интерфейса программы осуществлялась с применением библиотеки PyQt5 и инструмента разработки интерфейсов Qt Designer.

Структура программы представлена на рисунке 5 и состоит из 5 основных скриптов:

- main.py – отвечает за запуск программы;
- ui.py – отображение пользовательского интерфейса и обработка его составляющих. Создаются окна, кнопки, поля ввода, которые позволяют пользователю взаимодействовать с программой;
- video.py – обеспечивает функциональность по разделению видеоролика на отдельные изображения, а также склеивание изображений в видеоролик;
- image.py – обработка изображений;
- mathematic.py — расчет объема жидкости.

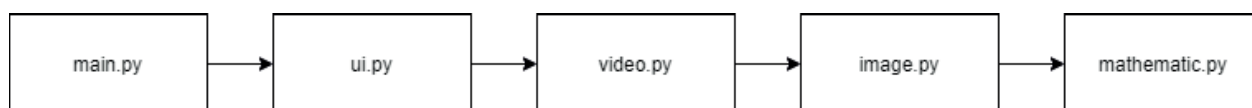


Рисунок 5. Скрипты программы

Figure 5. Program scripts

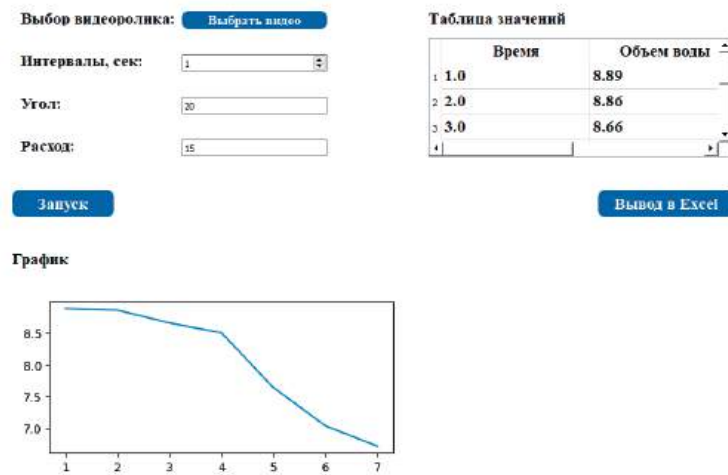


Рисунок 6. Интерфейс программы

Figure 6. Program interface

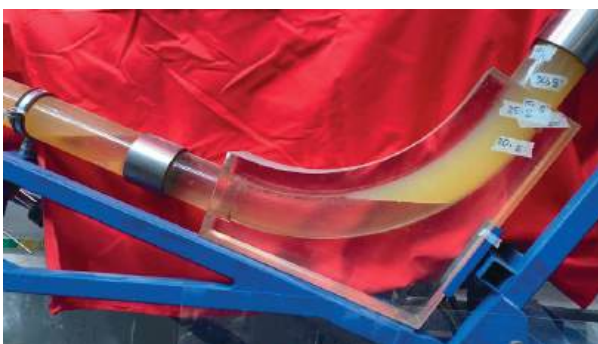
При запуске программы открывается окно (рисунок 6), в котором необходимо выбрать видеоролик с перекачкой нефти на стенде, задать установленные параметры и интервал в секундах для разбиения видеоролика на фотографии и нажать кнопку запуска программы.

После разбиения видеоролика на изображения (рисунок 7) каждая фотография поступает на обработку, выделяется трубопровод по маске и кольцу. Выделение происходит за счет определения отличных от черного цвета пикселей на маске и отрисовка их по поступающему изображению на полотне.

По маске кольца на трубе (рисунок 8) определяются пиксели красного/черного цвета (цвета воды с полотном) и проводится прямая идентичного воде цвета, описывающая уровень воды за кольцом.

Проводится анализ фото по каждому столбцу пикселей изображения сверху вниз, находится верхняя граница воды в трубе.

Для определения высот воды для каждого пикселя записывается условие уравнения прямой, проходящей через две точки, с учетом условия произведения наклонов перпендикулярных прямых. Составляется система уравнений для



a)



b)

a) кадр на 1 секунде; b) кадр на 8 секунде

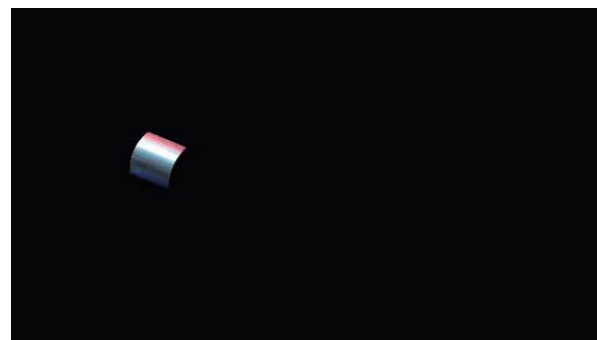
a) frame at 1st second; b) frame at 8th seconds

Рисунок 7. Кадры из видеоролика

Figure 7. Stills from the video



a)



b)

a) трубы; b) кольца на трубе

a) pipes; b) rings on the pipe

Рисунок 8. Маски**Figure 8. Masks**

определения координаты точки перпендикуляра к прямой и определения значения высот воды по уравнению:

$$h = \sqrt{(x_{pi} - x_{vi})^2 + (y_{pi} - y_{vi})^2},$$

где x_{vi}, y_{vi} – координаты точки верхней границы водного скопления;

x_{pi}, y_{pi} – координаты точки перпендикуляра на нижней границе.

Аналогичным образом вычисляются высоты трубы на каждом пикселе воды, по отношению высоты трубы к диаметру трубы (120 мм) определяется коэффициент перевода величин из пиксельных в действительные. По формуле (алгоритм расчета) рассчитывается объем и значение выводится на график. При завершении работы программы данные выводятся на таблицу в интерфейсе, создается видеоролик из обрабатываемых кадров, который сохраняется в папке с выбранным для анализа видео, при нажа-

тии на кнопку данные можно сохранить в Excel-файл.

Сравнение численных и экспериментальных результатов

Для проверки работы программного обеспечения выполнена тестовая видеосъемка работы измерительной линии трубопровода с известным количеством воды (таблица 1 столбец 1). Результаты работы программы показаны в таблице 1 столбце 2.

Погрешность измерений не превысила 9 %, которая определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{|x_{изм} - x_{ист}|}{x_{ист}} \cdot 100 \%,$$

где $x_{ист}$ – истинное значение объема водного скопления;

$x_{изм}$ – измеренное значение.

Таблица 1. Значения погрешности измерений в результате работы программы**Table 1.** Measurement error values of the program

Истинное значение, л	Измеренное программой, л	Погрешность, %
1	2	3
5	5,23–5,43	4,6–8,6
10	9,56–10,1	1–4,4

Выводы

Результатом проделанной работы является разработанное программное обеспечение, позволяющее определять объем воды по видеоизображению трубопровода, перекачивающего жидкость и имеющего в нижней точке водное скопление.

Цель и поставленные задачи данной работы выполнены в полном объеме. Для корректной работы программы рекомендуется соблюдать следующие правила использования программы:

- запись видеоролика для обработки должна выполняться под определенным ракурсом и при достаточном освещении. Изменение ракурса может привести к ошибке, так как маски для обработки

фотографий будут неправильно выделять трубу и кольцо;

- при записи за трубопроводом обязательно должно находиться полотно;

- вводимые значения в поля параметров должны быть только положительными величинами, для нецелых величин раздельным знаком устанавливать точку;

- не закрывать программу во время расчета и вывода графиков.

В дальнейшем полученные данные в результате работы программы могут быть использованы специалистами трубопроводного транспорта для определения закономерностей изменения параметров трубопровода, имеющего водные скопления.

Список источников

1. Бахмат Г.В., Васильев Г.Г., Богатенков Ю.В. Справочник инженера по эксплуатации нефтегазопроводов и продуктопроводов. М.: Изд-во «Инфра-Инженерия», 2006. 928 с. ISBN 5-9729-0001-7.
2. Причины и механизм внутренней коррозии // Helpiks: сайт. URL: <https://helpiks.org/7-90094.html> (дата обращения: 02.09.2024).
3. Прогнозирование и предотвращение внутренней коррозии нефтепроводов // Neftegaz.ru: сайт. URL: <https://inlnk.ru/20M3Lo> (дата обращения: 02.09.2024).
4. Пат. 180900 U1 РФ, МПК G 01 M 10/00, F 15 B 19/00. Стенд для исследований накопления и выноса воды в трубопроводе / С.Н. Чужиков, М.И. Валиев, М.Р. Лукманов. 2017137795, Заявлено 30.10.2017; Опубл. 29.06.2018.
5. Бойко В.И., Кханг Н.Т. Влияние режима течения газоводонефтяных смесей на внутреннюю коррозию нефтепроводов // Безопасность трубопроводов: сб. докл. Междунар. конф. М., 1997. С. 8-15.
6. Уликанов Р.Р., Киреев В.Н., Ковалева Л.А. Экспериментальное исследование динамических возмущений давления в цилиндрических трубах, заполненных жидкостью // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2024. Т. 10, № 1. С. 88-103. DOI: 10.21684/2411-7978-2024-10-1-88-103. EDN: RBGZMG.

7. Computer Vision-Based Recognition of Liquid Surfaces and Phase Boundaries in Transparent Vessels, with Emphasis on Chemistry Applications / Cornell University. 2014 URL: <https://arxiv.org/abs/1404.7174> (дата обращения: 02.09.2024). URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.7174>.

8. Bobovnik G., Mušič T., Kutin J. Liquid Level Detection in Standard Capacity Measures with Machine Vision // Sensors. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2676>. DOI: 10.3390/s21082676 (дата обращения: 02.09.2024).

9. Eppel S., Kachman T. Computer Vision-Based Recognition of Liquid Surfaces and Phase Boundaries in Transparent Vessels, with Emphasis on Chemistry Applications // Computer Vision and Pattern Recognition. URL: <https://arxiv.org/abs/1404.7174>. DOI: 10.48550/arXiv.1404.7174 (дата обращения: 02.09.2024).

10. Garcia G.B., Suarez O.D., Espinosa Aranda J.L. Image Processing Using OpenCV. Birmingham: Packt Publishing, 2015. 232 p. ISBN 978-1-78328-765-9.

References

1. Bakhmat G.V., Vasil'ev G.G., Bogatnikov Yu.V. *Spravochnik inzhenera po ekspluatatsii neftegazoprovodov i produktoprovodov* [Engineer's Handbook for the Operation of Oil and Gas Pipelines and Product Pipelines]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2006. 928 p. ISBN 5-9729-0001-7. [in Russian].

2. Prichiny i mekhanizm vnutrennei korrozii [Causes and Mechanism of Internal Corrosion]. *Helpiks: website*. URL: <https://helpiks.org/7-90094.html> (accessed 02.09.2024). [in Russian].
3. Prognozirovanie i predotvrashchenie vnutrennei korrozii nefteprovodov [Prediction and Prevention of Internal Corrosion of Oil Pipelines]. *Neftegaz.ru: website*. URL: <https://inlnk.ru/20M3Lo> (accessed 02.09.2024). [in Russian].
4. Chuzhinov S.N., Valiev M.I., Lukmanov M.R. e.a. *Stend dlya issledovaniy nakopleniya i vynosa vody v truboprovode* [Stand for Studying the Accumulation and Removal of Water in a Pipeline]. Patent RF, No. 180900, 2018. [in Russian].
5. Boiko V.I., Kkhg N.T. Vliyanie rezhima techeniya gazovodonefityanykh smesei na vnutrennyuyu korroziyu nefteprovodov [The Influence of the Flow Regime of Gas-Oil Mixtures on the Internal Corrosion of Oil Pipelines]. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoi konferentsii «Bezopasnost' truboprovodov»* [Collection of Reports at the International Conference «Pipeline Safety»]. Moscow, 1997, pp. 8-15. [in Russian].
6. Ulikanov R.R., Kireev V.N., Kovalova L.A. Eksperimental'noe issledovanie dinamicheskikh vozmushchenii davleniya v tsilindricheskikh trubakh, zapolnennykh zhidkost'yu [Experimental Study of Dynamic Pressure Disturbances in Cylindrical Pipes Filled with Liquid]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika* – Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2024, Vol. 10, No. 1, pp. 88-104. DOI: 10.21684/2411-7978-2024-10-1-88-103. EDN: RBGZMG. [in Russian].
7. *Computer Vision-Based Recognition of Liquid Surfaces and Phase Boundaries in Transparent Vessels, with Emphasis on Chemistry Applications*. Cornell University. 2014. URL: <https://arxiv.org/abs/1404.7174> (accessed 02.09.2024). URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.7174>.
8. Bobovnik G., Mušič T., Kutin J. Liquid Level Detection in Standard Capacity Measures with Machine Vision. *Sensors*, URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2676>. DOI: 10.3390/s21082676 (accessed 02.09.2024).
9. Eppel S., Kachman T. Computer Vision-Based Recognition of Liquid Surfaces and Phase Boundaries in Transparent Vessels, with Emphasis on Chemistry Applications. *Computer Vision and Pattern Recognition*, URL: <https://arxiv.org/abs/1404.7174>. DOI: 10.48550/arXiv.1404.7174 (accessed 02.09.2024).
10. Garcia G.B., Suarez O.D., Espinosa Aranda J.L. *Image Processing Using OpenCV*. Birmingham, Packt Publishing, 2015. 232 p. ISBN 978-1-78328-765-9.

Статья поступила в редакцию 05.07.2024; одобрена после рецензирования 05.08.2024; принята к публикации 11.09.2024.

The article was submitted 05.07.2024; approved after reviewing 05.08.2024; accepted for publication 11.09.2024.

ОБ АВТОРАХ

Абдрахманов Вали Хызырович

кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и физики наноструктур, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Андрианов Виталий Сергеевич

инженер лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования», Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Батыркаева Асель Марсовна

ассистент кафедры «Экоинжиниринг, природообустройство и экологические технологии», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Васильев Петр Игоревич

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

Габидуллина Зульфия Газинуровна

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

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич

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

Закирничная Марина Михайловна

доктор технических наук, заведующая кафедрой «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Кириллов Роман Вячеславович

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

Кича Максим Александрович

кандидат технических наук, член-корреспондент МАНЭБ, научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, Россия

Коледин Сергей Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и прикладной математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Кузьминская Елена Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент Отделения автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Кулакова Екатерина Сергеевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Институт химических технологий и инжиниринга Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Стерлитамаке), Стерлитамак, Россия

Купцов Даниил Викторович

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

Максудов Денис Вилевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Макулов Ирек Альбертович

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

Махиянов Артур Валерьевич

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

Миловзоров Дмитрий Георгиевич

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

Миниахметова София Олеговна

студент кафедры «Экоинжиниринг, природообустройство и экологические технологии», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Осипов Валерий Валерьевич

ассистент кафедры управления качеством Факультета инновационных технологий, Томский государственный университет, Томск, Россия

Палладина Яна Александровна

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

Переверзин Андрей Павлович

студент Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Переверзин Павел Владимирович

заведующий сектором акустических и электрических методов отдела электроники, ООО НПФ «АМК Горизонт», Октябрьский, Россия

Петушков Михаил Юрьевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Саттаров Роберт Радилович

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

Скороспешкин Максим Владимирович

кандидат технических наук, доцент Отделения автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Сулейманов Игорь Нугуманович

кандидат технических наук, доцент кафедры математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Уликанов Рим Рамазанович

заведующий лабораторией математического моделирования и разработки программного обеспечения, ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

Фетисов Владимир Станиславович

доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Хазиева Регина Тагировна

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

Хакимов Эрик Русланович

магистрант кафедры «Информационные технологии и прикладная математика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Холодилов Сергей Сергеевич

доцент кафедры информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Хурамшин Дим Русланович

магистрант Высшей школы информационных и социальных технологий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Шумихин Андрей Юрьевич

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

Яшин Антон Николаевич

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

ABOUT THE AUTHORS

Abdrakhmanov Vali Kh.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Department of Electronics and Physics of Nanostructures, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Andrianov Vitaly S.

Engineer of the laboratory «Modeling of Technological Processes and Design of Power Equipment», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Batyrkaeva Asel M.

Assistant of the Department of Ecoengineering, Environmental Management and Ecological Technologies, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Fetisov Vladimir S.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation, Telecommunication and Metrology 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

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

Khakimov Erik R.

Undergraduate Student of Information Technology and Applied Mathematics 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

Kholodilov Sergey S.

Assistant Professor of Computer Science and Information Security Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Khuramshin Dim R.

Undergraduate Student of Higher School of Information and Social Technologies, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kicha Maksim A.

Candidate of Engineering Sciences, Corresponding Member of IAELPS, Researcher, N.G. Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russia

Kirillov Roman V.

Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Koledin Sergey N.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Information Technologies and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kulakova Ekaterina S.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automated Technological and Information Systems Department, Institute of Chemical Technologies and Engineering, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Sterlitamak, Russia

Kuptsov Daniil V.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Kuzminskaya Elena V.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Makhiyanov Arthur V.

Postgraduate Student of Automation, Telecommunications and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Maksudov Denis V.

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Makulov Irek A.

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Milovzorov Dmitry G.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of the Electronics Engineering Department, Ufa University of Science and Technologies, Ufa, Russia

Miniakhmetova Sofia O.

Student of Ecoengineering, Environmental Engineering and Ecological Technologies Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Osipov Valery V.

Assistant of Quality Management Department, Faculty of Innovative Technologies, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Palladina Yana A.

Postgraduate Student of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Pereverzin Andrey P.

Student of the Institute of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics, National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute», Moscow, Russia

Pereverzin Pavel V.

Chief of the Sector of Acoustic and Electrical Methods in Electronics Department, Scientific Production Firm «AMK Horizon» LLC, Oktyabrsky, Russia

Petushkov Mikhail Yu.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, 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

Shumikhin Andrey Yu.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Skorospeshkin Maxim V.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Suleymanov Igor N.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Ulikanov Rim R.

Head of the Laboratory of Mathematical Modeling and Software Development, The Pipeline Transport Institute Transneft R&D, LLC, Moscow, Russia

Vasiliev Petr I.

Assistant of Electric Power Engineering and Electrical Technology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Yashin Anton N.

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zakirnichnaya Marina M.

Doctor of Engineering Sciences, Head of Automation, Telecommunications and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Страница 116 добавить

Благодарности: Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»).

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «PRIORITY 2030» (National project «Science and University»).

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.