

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 21, 2025

Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, т. 21, 2025

Подписной индекс ПБ092 в каталоге «Почта России».

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

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



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

№ 2, т. 21, 2025

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

Учредитель

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

Международный стандартный серийный
номер ISSN 1999-5458

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

Журнал включен:

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

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

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

Свободная цена. **12+**

Дата выхода в свет: 23.06.2025 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 18.72.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 60.

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. 2, Vol. 21, 2025

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

Founder

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

International standard serial number
ISSN 1999-5458

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

The journal is included:

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

Subscription through Russian Post. Subscription Index ПБ092.

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

Price is free. **12+**

Date of publication 23.06.2025. Paper format 60×84/8.
Offset printing. 18.72 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 60.

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

Ревякин Е. Е., Сушков В. В., Сухачев И. С., Лосев Ф. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА
В НЕПОДВИЖНОЙ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ 9

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

РАСШИРЕНИЕ РЕАЛИЗУЕМОГО ДИАПАЗОНА МЕХАНИЧЕСКИХ
КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ 21

Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г.

АНАЛИЗ СХЕМ РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ
С ОДНИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ДВЕ СВЕЧИ 31

Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА «SWEEP FREQUENCY RESPONSE
ANALYSIS» ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ОБМОТОК СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ ВСКРЫТИЯ БАКА 41

Васильев П. И., Шумихин А. Ю., Афлятунов Р. Р., Павлов А. Д.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 53

Хазиева Р. Т., Мухаметшин А. В., Васильев П. И., Димукашева Г. Е.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОВЕРКИ СХЕМЫ КОНТРОЛЯ И ЗАЩИТЫ
НАПРЯЖЕНИЯ 63

Яшин А. Н., Хакимьянов М. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ УСТАНОВОК ШТАНГОВЫХ
ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ 74

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Нурлыгаянов Т. Р., Демин А. Ю., Нигматуллин И. Р., Нурлыгаянова Е. Ф.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АНАЛИЗА КАПЕЛЬНОЙ
ПРОБЫ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 88

Федоров С. Н., Коловертнов Г. Ю., Краснов А. Н., Прахова М. Ю.

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ УСТАНОВКИ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СКВАЖИНЫ 98

Бадамиин А. Э., Рузанов М. Е., Баязитов Ф. А., Филиппова Е. В.

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К УЛУЧШЕНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
НИЗКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ОСНОВЕ РЕТИНЕКСА
И РЕКУРРЕНТНЫХ СВЕРТОЧНЫХ СЕТЕЙ 111

Хакимов Э. Р., Сулейманов И. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ МАРШРУТИЗАЦИОННОГО И
КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 123

Слепнев С. В., Коледина К. Ф., Коледин С. Н.

КОМПОЗИЦИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ
КИНЕТИКИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ 133

МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Виноградова И. Л., Гизатулин А. Р., Мешков И. К., Ахметханова А. Р.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ
И РАДИОФОТОННОЕ УСТРОЙСТВО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 142

Об авторах 152

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

Revyakin E. E., Sushkov V. V., Sukhachev I. S., Losev F. A.

MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTER SIMULATION
OF A THREE-PHASE TWO-WINDING POWER TRANSFORMER
IN A STATIONARY TWO-PHASE COORDINATE SYSTEM 9

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

EXPANSION OF THE REALIZED RANGE OF MECHANICAL COORDINATES
OF ELECTRIC DRIVES BASED ON SYNCHRONOUS MOTORS EXCITED
BY PERMANENT MAGNETS 21

Gizatullin F. A., Gabidullina Z. G.

ANALYSIS OF DISCHARGE CIRCUIT SCHEMES OF CAPACITIVE IGNITION
SYSTEMS WITH ONE CONVERTER FOR TWO PLUGS 31

Kondrashova Yu. N., Tretiakov A. M., Shalimov A. V.

APPLICATION OF SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS METHOD
FOR DETECTING WINDING DEFORMATION OF POWER TRANSFORMERS
WITHOUT OPENING THE TANK 41

Vasiliev P. I., Shumikhin A. Yu., Aflyatunov R. R., Pavlov A. D.

PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF INDUCTION HEATING SYSTEMS
IN THE OIL AND GAS INDUSTRY 53

Khazieva R. T., Mukhametshin A. V., Vasiliev P. I., Dimukasheva G. Ye.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR VERIFICATION
OF VOLTAGE CONTROL AND PROTECTION CIRCUITS 63

Yashin A. N., Khakimyanov M. I.

STUDY OF THE EFFICIENCY OF USING VALVE MOTORS
IN ELECTRIC DRIVES OF SUCKER-ROD PUMPING UNITS 74

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

Nurlygayanov T. R., Demin A. Yu., Nigmatullin I. R., Nurlygayanova E. F.

AUTOMATED DEVICE FOR ANALYSING DROP SAMPLES OF MOTOR OILS
USING NEURAL NETWORKS 88

Fedorov S. N., Kolovertnov G. Yu., Krasnov A. N., Prakhova M. Yu.

DIAGNOSTIC DIAGRAM OF STATE OF WELL MECHANICAL CLEANING UNIT 98

Badamshin A. E., Ruzanov M. E., Bayazitov F. A., Filippova E. V.

A HYBRID APPROACH TO IMAGE ENHANCEMENT
IN LOW-LIGHT CONDITIONS BASED ON RETINEX AND RECURRENT
CONVOLUTIONAL NETWORKS 111

Khakimov E. R., Suleymanov I. N.

RELIABILITY MODELING FOR ROUTING AND SWITCHING EQUIPMENT 123

Slepnev S. V., Koledina K. F., Koledin S. N.

COMPOSITION OF MACHINE LEARNING METHODS IN THE ANALYSIS
OF THERMALLY STIMULATED LUMINESCENCE KINETICS 133

METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

Vinogradova I. L., Gizatulin A. R., Meshkov I. K., Ahmethanova A. R.

METHODS OF OBTAINING QUADRATIC NONLINEARITY
AND RADIO-PHOTONIC CONVERSION DEVICE 142

About the Authors 152

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-9-20

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В НЕПОДВИЖНОЙ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

**Егор Евгеньевич Ревякин****Egor E. Revyakin***ассистент кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия***Валерий Валентинович Сушков****Valery V. Sushkov***доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Энергетика»,
Нижевартовский государственный университет,
Нижевартовск, Россия***Илья Сергеевич Сухачев****Ilya S. Sukhachev***кандидат технических наук, доцент,
заведующий базовой кафедрой АО «СУЭНКО»,
Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия***Федор Алексеевич Лосев****Fedor A. Losev***кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроэнергетики,
Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия*

Актуальность

Для синтеза систем автоматического регулирования (САР), применяемых в цикле производства и потребления электроэнергии, необходимо использовать математические модели элементов электротехнического комплекса. Качество работы САР зависит от точности используемой математической модели объекта. В настоящее время для синтеза САР электрических машин используются математические модели в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат. Однако

Ключевые слова

силовой трансформатор,
неподвижная двухфазная
система координат,
структурная схема,
математическая модель,
имитационная модель

силовой трансформатор учитывается упрощённой моделью или не учитывается вовсе. Работа посвящена развитию общей теории электротехнических комплексов в части разработки математической модели трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора для решения задач синтеза САР.

Цель исследования

Разработка математической модели трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора в неподвижной двухфазной системе координат.

Методы исследования

В работе использованы методы теории автоматического управления, методы теории линейных электрических цепей, методы имитационного моделирования.

Результаты

Разработана математическая модель трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора с группой соединения обмоток $Y0/\Delta-11$ в двухфазной неподвижной системе координат, одним из выходных параметров которой является напряжение вторичной обмотки. На базе математической модели синтезирована структурная схема, в результате имитационного моделирования которой получены графики изменения токов и напряжений обмоток трансформатора в различных режимах работы трансформатора.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках реализации гранта ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (проект «Программный комплекс поддержки принятия решений по обеспечению надёжности и устойчивости функционирования электротехнической системы нефтяного промысла»).

Для цитирования: Ревякин Е. Е., Сушков В. В., Сухачев И. С., Лосев Ф. А. Математическое и имитационное моделирование трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора в неподвижной двухфазной системе координат // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 9-20. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-9-20>.

Original article

MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTER SIMULATION OF A THREE-PHASE TWO-WINDING POWER TRANSFORMER IN A STATIONARY TWO-PHASE COORDINATE SYSTEM

Relevance

Mathematical models of electrical devices are employed in the design of automatic control systems (ACS) for electrical systems. The efficiency of the ACS depends on the accuracy of these mathematical models. In modern practice, mathematical models implemented in stationary or rotating two-phase coordinate systems are widely adopted for ACS electrical machines design. However, power transformers are represented by oversimplified models or neglected, thereby reducing the reliability of ACS. In this article this gap is addressed.

Aim of research

The purpose of this study is to develop a mathematical model of a three-phase dual-winding power transformer in a stationary two-phase coordinate system.

Keywords

power transformer, stationary two-phase coordinate system, block diagram, mathematical model, computer simulation

Research methods

In this article automatic control theory, linear electrical circuit theory, computer simulation methods are used.

Results

A mathematical model of a three-phase two-winding power transformer with a Y0/Δ-11 winding connection in a two-phase fixed coordinate system has been developed. A block diagram was design based on the developed mathematical model. Current and voltage waveforms in the transformer windings under various operating conditions are yielded as a result of computer simulation of the block diagram.

Acknowledgments: The article was written within the framework of the Grant of Tyumen Industrial University (Project «Software Package for Decision Support to Ensure the Reliability and Sustainability of the Functioning of the Electrical System of the Oil Field»).

For citation: Revyakin E. E., Sushkov V. V., Sukhachev I. S., Losev F. A. Matematicheskoye i imitatsionnoye modelirovaniye trokhfaznogo dvukhobmotochnogo silovogo transformatora v nepodvizhnoy dvukhfaznoy sisteme koordinat [Mathematical Modeling and Computer Simulation of a Three-Phase Two-Winding Power Transformer in a Stationary Two-Phase Coordinate System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 9-20 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-9-20>.

Введение

Электротехнические системы (ЭТС), включающие в себя объекты генерации распределения и преобразования электроэнергии [1], требуют оптимизации, ключевым критерием которой является энергоэффективность. Одно из направлений повышения энергоэффективности работы ЭТС заключается в совершенствовании алгоритмов управления электрооборудованием, для чего используются математические модели элементов ЭТС.

В зависимости от поставленной цели выбирается соответствующий математический аппарат, описывающий исследуемый элемент ЭТС. Например, для синтеза и настройки САР асинхронных двигателей используются подходы с применением систем дифференциальных уравнений в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат [2]. Аналогичные подходы используются при синтезе САР сетевого инвертора [3] или при исследовании динамических процессов в синхронных генераторах [4].

Неотъемлемым элементом любой ЭТС является силовой трансформатор (СТ), который должен учитываться при синтезе САР как объектов потребления, так и генерации. Однако в большинстве случаев СТ учитывается упрощённой моделью или не учитывается вовсе, при этом существующие уточнённые математические модели СТ не согласованы с входными параметрами общепринятых математических моделей электрогенераторов и электродвигателей, используемых для синтеза САР. Таким образом, целью данной работы является разработка математической модели трёхфазного двухобмоточного СТ в неподвижной двухфазной системе координат.

Математическое описание СТ является объектом многих научных работ. В работе [5] показан способ исследования несимметричных режимов работы СТ с помощью электрических схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательности. В работе [6] представлено математическое описание трансформатора в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений для

исследования броска тока намагничивания. В работах [7, 8] автор представил систему дифференциальных уравнений для расчета динамических режимов СТ с различными группами соединения обмоток. В работе [9] для исследования динамических режимов разработана система уравнений СТ в форме обобщенных векторов трёхфазной системы. В работе [10] исследуется САР следящего привода с местной обратной связью на трансформаторе тока, для чего строится структурная схема трансформатора тока. В работе [11] строится структурная схема СТ в виде типовых динамических звеньев. В работах [12, 13] проводится исследование однофазного СТ с зазором в магнитной системе как объекта управления, для чего строится его структурная схема. Анализ вышеуказанных источников показал, что эти модели неприменимы или недостаточно адаптированы для задач синтеза САР элементов ЭТС нефтегазовых месторождений. В работе [5] используется метод схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для исследования несимметричных режимов работы, который не применим для задач синтеза САР. В работах [6–9] представлена математическая модель СТ в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений для каждой фазы, которая не согласована с общепринятыми математическими моделями электрических машин, используемых для синтеза САР. Наиболее приближенные исследования к теме данной статьи изложены в работах [10–13], где на основе математической модели трансформатора проводится синтез структурной схемы. В работах [10, 11] структурная схема трансформатора построена на основании системы уравнений, для решения которой необходима информация о количестве витков обмоток трансформатора, которая отсутствует в паспортных данных на СТ.

Также в работе [11] используется модель, в которой выходным воздействием является ток вторичной обмотки СТ, что делает невозможным согласование этой модели с моделью асинхронного двигателя, где входным воздействием является напряжение. В работах [12, 13] исследуется однофазный СТ специфической конструкции, который не используется в ЭТС нефтегазовых месторождений. Проведённый анализ научных источников подтверждает актуальность заявленной цели.

Теоретическая часть

При описании электромагнитных процессов в СТ использованы общепринятые допущения [14]. В данной работе разработана структурная схема силового трансформатора с группой соединения обмоток $Y0/\Delta-11$, схема электрических соединений которых показана на рисунке 1.

Введём следующие обозначения:

$$\mathbf{U}_\Pi = [u_{10} \quad u_{30} \quad u_{50}]^T,$$

$$\mathbf{I}_\Pi = [i_1 \quad i_3 \quad i_5]^T,$$

$$\mathbf{\Psi}_\Pi = [\psi_1 \quad \psi_3 \quad \psi_5]^T,$$

$$\mathbf{I}_M = [i_{1M} \quad i_{3M} \quad i_{5M}]^T,$$

$$\mathbf{I}_H = [i_H \quad i_H \quad i_H]^T,$$

$$\mathbf{U}'_B = [u'_{62} \quad u'_{24} \quad u'_{46}]^T,$$

$$\mathbf{I}'_B = [i'_{26} \quad i'_{42} \quad i'_{64}]^T,$$

$$\mathbf{\Psi}'_B = [\psi'_2 \quad \psi'_4 \quad \psi'_6]^T,$$

где $\mathbf{U}_\Pi$ — матрица первичных напряжений;

u_{10}, u_{30}, u_{50} — напряжения первичных обмоток, В;

$\mathbf{I}_\Pi$ — матрица первичных токов;

i_1, i_3, i_5 — токи первичных обмоток, А;

$\mathbf{\Psi}_\Pi$ — матрица полных потокоцепления первичных обмоток;

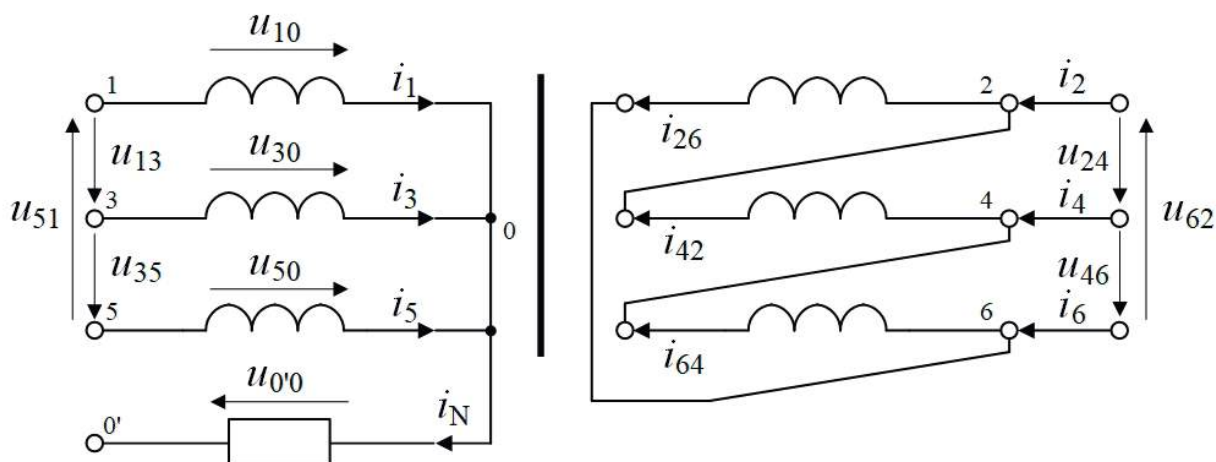


Рисунок 1. Схема электрических соединений трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора с группой соединения обмоток Y0/Δ-11

Figure 1. Three-phase equivalent circuit of the two-winding power transformer with a Y0/Δ-11 winding connection

Ψ_1, Ψ_3, Ψ_5 — полные потокосцепления первичных обмоток, Вб;

$\mathbf{I}_M$ — матрица намагничивающих токов;

i_{1M}, i_{3M}, i_{5M} — намагничивающие токи, А;

$\mathbf{I}_H$ — матрица тока нулевого провода;

i_H — токи нулевого провода, А;

$\mathbf{U}'_B$ — матрица приведённых вторичных напряжений;

$u'_{62}, u'_{24}, u'_{46}$ — приведенные напряжения вторичных обмоток, В;

$\mathbf{I}'_B$ — матрица приведенных токов вторичных обмоток;

$i'_{26}, i'_{42}, i'_{64}$ — приведённые токи вторичных обмоток, А;

Ψ'_B — матрица полных приведённых потокосцепления вторичных обмоток;

$\Psi'_2, \Psi'_4, \Psi'_6$ — полные приведённые потокосцепления вторичных обмоток, Вб.

С учётом принятых обозначений запишем уравнения, связывающие напряжения, токи и потокосцепления трёхфазного трансформатора:

$$\mathbf{U}_\Pi = R_1 \mathbf{I}_\Pi + p \Psi_\Pi + R_M \mathbf{I}_M + R_H \mathbf{I}_H, \quad (1)$$

$$-\mathbf{U}'_B = R_2 \mathbf{I}'_B + p \Psi'_B + R_M \mathbf{I}_M, \quad (2)$$

$$\Psi_\Pi = L_{11} \mathbf{I}_\Pi + M \mathbf{I}'_B, \quad (3)$$

$$\Psi'_B = L'_{22} \mathbf{I}'_B + M \mathbf{I}_\Pi, \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{I}_\Pi + \mathbf{I}'_B, \quad (5)$$

$$i_H = i_1 + i_3 + i_5, \quad (6)$$

где R_1 — активное сопротивление первичной обмотки, Ом;

p обозначает операцию дифференцирования;

R_M — активное сопротивление, учитывающее потери в стали магнитопровода, Ом;

R_H — активное сопротивление нулевого провода первичной обмотки, Ом;

R_2 — приведенное активное сопротивление вторичной обмотки, Ом;

L_{11} — полная собственная индуктивность первичной обмотки, Гн;

M' — приведённая полная взаимная индуктивность, Гн;

L'_{22} — приведённая полная собственная индуктивность вторичной обмотки, Гн.

Из уравнения (3) выразим матрицу токов первичной обмотки:

$$\mathbf{I}_\Pi = \frac{1}{L_{11}} \Psi_\Pi - \frac{M'}{L_{11}} \mathbf{I}'_B. \quad (7)$$

Из уравнения (1), с учётом уравнений (5) и (7), выразим дифференциал

матрицы потокосцеплений первичной обмотки и проинтегрируем результат:

$$\Psi_{\Pi} = \frac{1}{p} \frac{1}{a_1} (a_1 \mathbf{U}_{\Pi} - a_2 \mathbf{I}'_{\text{в}} - a_1 R_{\text{н}} \mathbf{I}_{\text{н}} - \Psi_{\Pi}), \quad (8)$$

где $a_1 = L_{11}/(R_{\text{м}} + R_1)$;

$$a_2 = R_{\text{м}} L_{11}/(R_{\text{м}} + R_1) - M';$$

1/p обозначает операцию интегрирования.

Из уравнения (2), с учётом уравнений (4), (5) и (7), выразим матрицу напряжений вторичной обмотки:

$$-\mathbf{U}'_{\text{в}} = (a_4 + p a_3) \Psi_{\Pi} + (a_6 + p a_5) \mathbf{I}'_{\text{в}}, \quad (9)$$

где $a_3 = M'/L_{11}$; $a_4 = L_{11}/R_{\text{м}}$;

$$a_5 = L'_{22} - M'^2/L_{11};$$

$$a_6 = R'_2 + R_{\text{м}} - R_{\text{м}} M'/L_{11}.$$

Пусть $\mathbf{P}$ — матрица перестановки, которая равна

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В результате вычитания из уравнения (9) самого себя, умноженного на матрицу $\mathbf{P}$, получится уравнение:

$$-\mathbf{U}'_{\text{в}} + \mathbf{P} \mathbf{U}'_{\text{в}} = (a_4 + p a_3) (\Psi_{\Pi} - \mathbf{P} \Psi_{\Pi}) + (a_6 + p a_5) \mathbf{I}'_{\text{вл}}, \quad (10)$$

где $\mathbf{I}'_{\text{вл}}$ — матрица токов в линейных проводах, соединяющих вторичные обмотки и нагрузку, что следует из первого закона Кирхгофа:

$$\mathbf{I}'_{\text{вл}} = (\mathbf{I}'_{\text{в}} - \mathbf{P} \mathbf{I}'_{\text{в}}) = \begin{bmatrix} i'_{26} - i'_{42} \\ i'_{42} - i'_{64} \\ i'_{64} - i'_{26} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i'_2 \\ i'_4 \\ i'_6 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где i'_2, i'_4, i'_6 — приведённые вторичные токи в линейных проводах, А.

Из уравнения (9) выразим матрицу приведённых вторичных токов:

$$\mathbf{I}'_{\text{в}} = \frac{1}{p} \frac{a_6}{a_5} \left(-\frac{1}{a_6} \mathbf{U}'_{\text{в}} - \frac{a_4}{a_6} \Psi_{\Pi} - \mathbf{I}'_{\text{в}} \right) - \frac{a_3}{a_5} \Psi_{\Pi}. \quad (12)$$

Соотношения для перехода к обобщенным векторам:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\Pi} & \mathbf{u}'_{\text{в}} & \Psi_{\Pi} & \Psi'_{\text{в}} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\Pi} & \mathbf{U}'_{\text{в}} & \Psi_{\Pi} & \Psi'_{\text{в}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{\Pi} & \mathbf{i}'_{\text{в}} & \mathbf{i}_{\text{м}} & \mathbf{i}_{\text{н}} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\Pi} & \mathbf{I}'_{\text{в}} & \mathbf{I}_{\text{м}} & \mathbf{I}_{\text{н}} \end{bmatrix}$$

где $\mathbf{A}$ — комплексная матрица поворота прямой последовательности:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{a}$ — оператор поворота на 120° ;

$\mathbf{a}^2$ — оператор поворота на 240° .

При принятых обозначениях справедливо равенство:

$$\mathbf{A} - \mathbf{A} \mathbf{P} = \sqrt{3} e^{-j\frac{\pi}{6}} \mathbf{A}. \quad (14)$$

С учётом (13) и (14) система уравнений математической модели СТ в форме обобщенных векторов, полученная из матричных уравнений (8), (10), (12) и (7), будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \Psi_{\Pi} = \frac{1}{p} \frac{1}{a_1} (a_1 \mathbf{u}_{\Pi} - a_2 \mathbf{i}'_{\text{в}} - \Psi_{\Pi}) \\ \mathbf{u}'_{\text{в}} = (a_4 + p a_3) \Psi_{\Pi} - \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}} (a_6 + p a_5) \mathbf{i}'_{\text{вл}} \\ \mathbf{i}'_{\text{в}} = \frac{1}{p} \frac{a_6}{a_5} \left(-\frac{1}{a_6} \mathbf{u}'_{\text{в}} - \frac{a_4}{a_6} \Psi_{\Pi} - \mathbf{i}'_{\text{в}} \right) - \frac{a_3}{a_5} \Psi_{\Pi} \\ \mathbf{i}_{\Pi} = \frac{1}{L_{11}} \Psi_{\Pi} - \frac{M'}{L_{11}} \mathbf{i}'_{\text{в}} \end{cases}. \quad (15)$$

Система уравнений (15) может быть представлена в виде системы уравнений проекций векторов на оси неподвижной двухфазной системы координат. Известно, что при преобразовании трёхфазной системы координат в неподвижную двухфазную необходимо отдельно учитывать нулевую составляющую токов и напряжений. Действительно, при преобразовании вектор-столбца (1) в обобщённый вектор (15) слагаемое, отвечающее за падение напряжения в нулевом проводе, теряется. Для того, чтобы учесть ток нулевого провода, необходимо составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \psi_{\pi\Sigma} = \frac{1}{a_1} \frac{1}{p} (a_1 u_{\pi\Sigma} - \psi_{\pi\Sigma} - a_2 i'_{\text{в}\Sigma} - 3a_1 R_N i_N) \\ i'_{\text{в}\Sigma} = \frac{a_6}{a_5} \frac{1}{p} \left(-\frac{a_4}{a_6} \psi_{\pi\Sigma} - i'_{\text{в}\Sigma} \right) - \frac{a_3}{a_5} \psi_{\pi\Sigma}, \quad (16) \\ i_{\pi\Sigma} = \frac{1}{L_{11}} \psi_{\pi\Sigma} - \frac{M'}{L_{11}} i'_{\text{в}\Sigma} \end{cases}$$

где $\psi_{\pi\Sigma}$, $i_{\pi\Sigma}$, $u_{\pi\Sigma}$, $i'_{\text{в}\Sigma}$ — величины, полученные путём суммирования элементов вектор-столбцов (1)–(5).

Математическая модель (15), (16) силового трансформатора представлена в виде структурной схемы, показанной на рисунке 2.

Имитационное моделирование режимов работы СТ

Полная структурная схема СТ (рисунок 2) использована для имитационного компьютерного моделирования симметричных, несимметричных, установившихся и переходных режимов. Моделирование режимов выполнено для трансформатора ТДН-16000/110, паспортные данные которого приведены в таблице 1.

Расчет параметров схемы замещения трансформатора выполняется в соответствии с методикой, изложенной в [15].

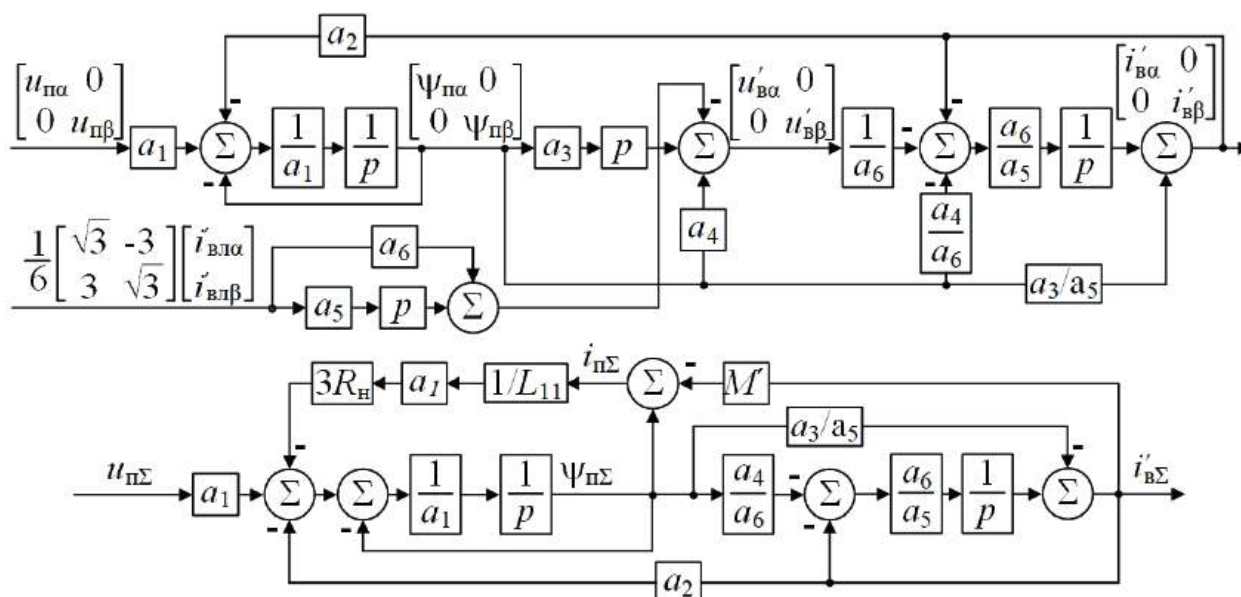


Рисунок 2. Структурная схема трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора Y0/Δ-11 в неподвижной двухфазной системе координат

Figure 2. Block diagram of a three-phase two-winding power transformer with a Y0/Δ-11 winding connection in a two-phase fixed coordinate system

Таблица 1. Паспортные данные трансформатора ТДН-16000/110

Table 1. Power transformer TDN-16000/110 datasheet

	Параметр	Значение	Ед. изм.
1.	Линейное напряжение обмотки ВН, $U_{\text{н.л(ВН)}}$	115	кВ
2.	Линейное напряжение обмотки НН, $U_{\text{н.л(НН)}}$	11	кВ
3.	Напряжение КЗ, $u_{\text{к\%}}$	10,5	%
4.	Активные потери КЗ, $P_{\text{к}}$	85	кВт
5.	Активные потери XX, P_{xx}	19	кВт
6.	Ток XX, $I_{\text{xx\%}}$	0,7	%

Расчётные параметры трансформатора приведены в таблице 2.

На рисунке 3 показаны графики изменения тока, полученные в результате имитационного моделирования опыта короткого замыкания и опыта холостого хода СТ.

Как видно из рисунка 3, *a* при подаче на первичные обмотки напряжения $u_{к\%} \cdot U_{ном}$, в них возникают токи, действующее значение которых соответствует величине номинального тока в установленном режиме. Как видно из ри-

сунка 3, *b*, при подаче номинального напряжения на первичные обмотки и разомкнутых выводах вторичных обмоток действующее значение намагничивающего тока соответствует паспортным данным.

На рисунке 4 показаны графики изменения токов и напряжений обмоток СТ, полученные в результате имитационного моделирования двухфазного короткого замыкания между линейными проводами стороны низкого напряжения.

Таблица 2. Расчётные параметры трансформатора ТДН-16000/110

Table 2. Design parameters of power transformer TDN-16000/110 datasheet

	Параметр	Значение	Ед. изм.
1.	Активное сопротивление первичной обмотки, R_1	2,1955	Ом
2.	Приведённое активное сопротивление вторичной обмотки, R'_2	2,1955	Ом
3.	Индуктивность рассеяния первичной обмотки, $L_{\sigma 1}$	$137,952 \cdot 10^{-3}$	Гн
4.	приведённая индуктивность рассеяния вторичной обмотки, $L'_{\sigma 2}$	$137,952 \cdot 10^{-3}$	Гн
5.	Активное сопротивление ветви намагничивания, R_m	89611	Ом
6.	Приведённая взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками, M'	244,752	Гн

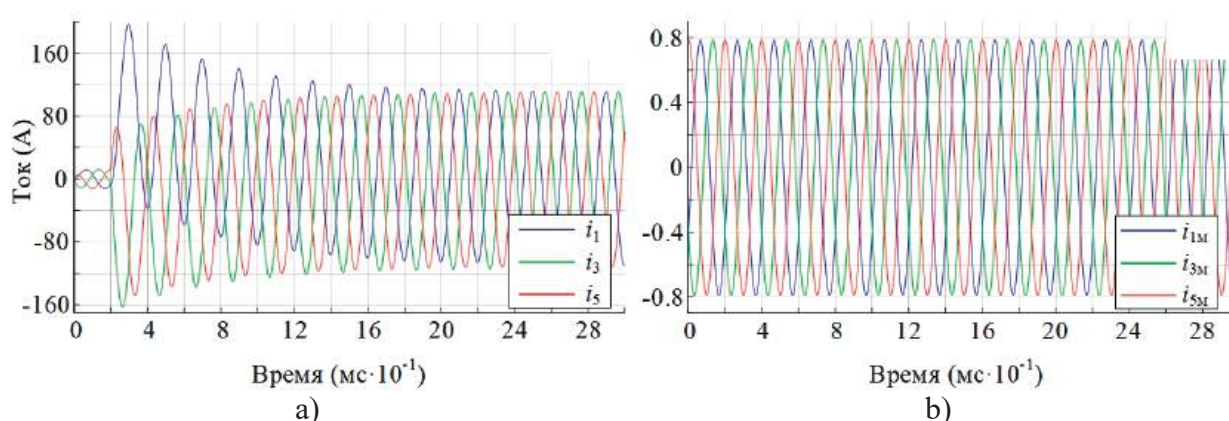


Рисунок 3. Графики изменения тока первичной обмотки, полученные в результате имитационного моделирования опыта короткого замыкания (а) и опыта холостого хода (b)

Figure 3. Simulation waveforms of primary winding currents with short-circuit test (a) and open-circuit test (b)

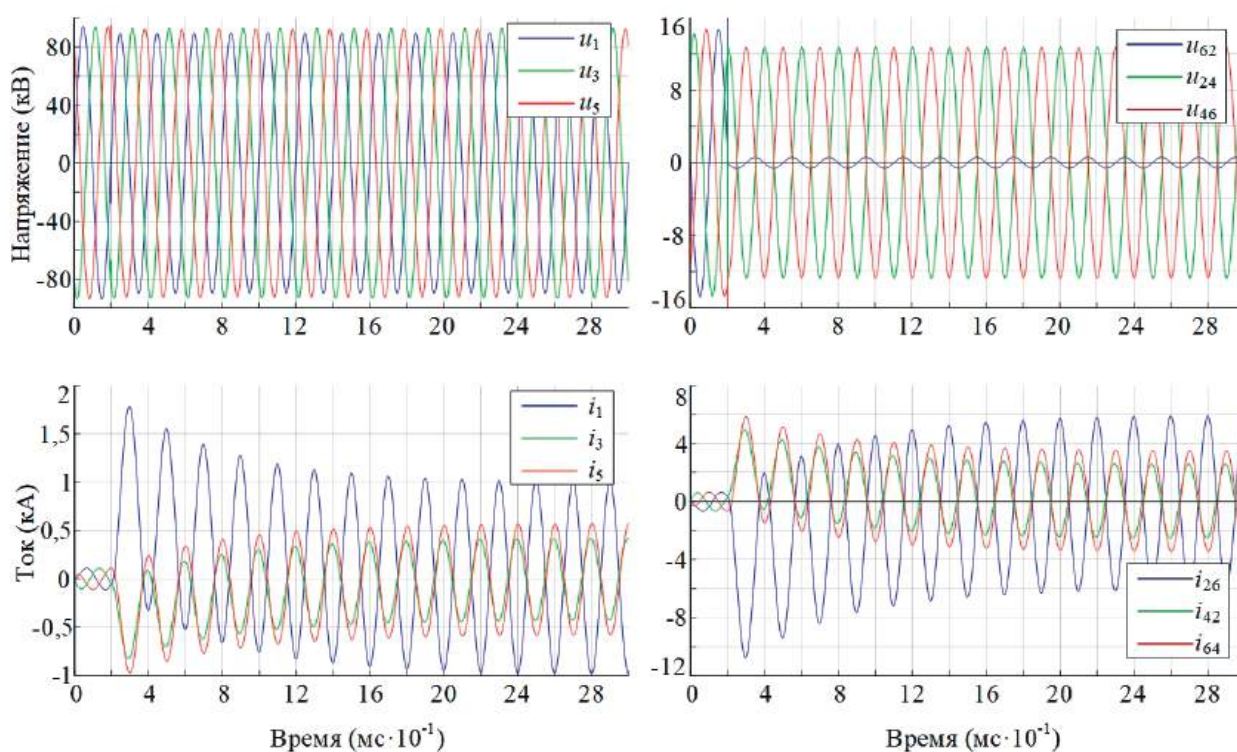


Рисунок 4. Графики изменения токов и напряжений обмоток, полученные в результате имитационного моделирования внешнего двухфазного короткого замыкания на стороне низкого напряжения

Figure 4. Simulation waveforms of primary and secondary winding currents and voltages with external two-phase fault

Как видно из рисунка 4, после междуфазного замыкания линейных проводов на стороне низкого напряжения напряжение u_{62} вторичной обмотки СТ снизилось. Наличие конечного сопротивления линейных проводов и шунта обуславливает ненулевое значение этого напряжения. Как видно из графика изменения токов, разность фаз и разность амплитуд токов i_{42} и i_{64} практически отсутствует, что объясняется наличием сопротивления шунта и сопротивления линейных проводов.

На рисунке 5 показаны графики изменения токов и напряжений СТ, полученные в результате имитационного моделирования работы СТ при питании его

первичных обмоток несимметричным напряжением.

Как видно из рисунка 5, при питании СТ несимметричным напряжением в нулевом проводе возникает уравнивающий ток i_N . Токи вторичных и первичных обмоток также становятся несимметричными.

Характер рассмотренных графиков изменения токов и напряжений в переходных и установившихся режимах работы СТ, полученных путём имитационного моделирования, не противоречит существующей теории, что свидетельствует о корректности разработанной математической модели.

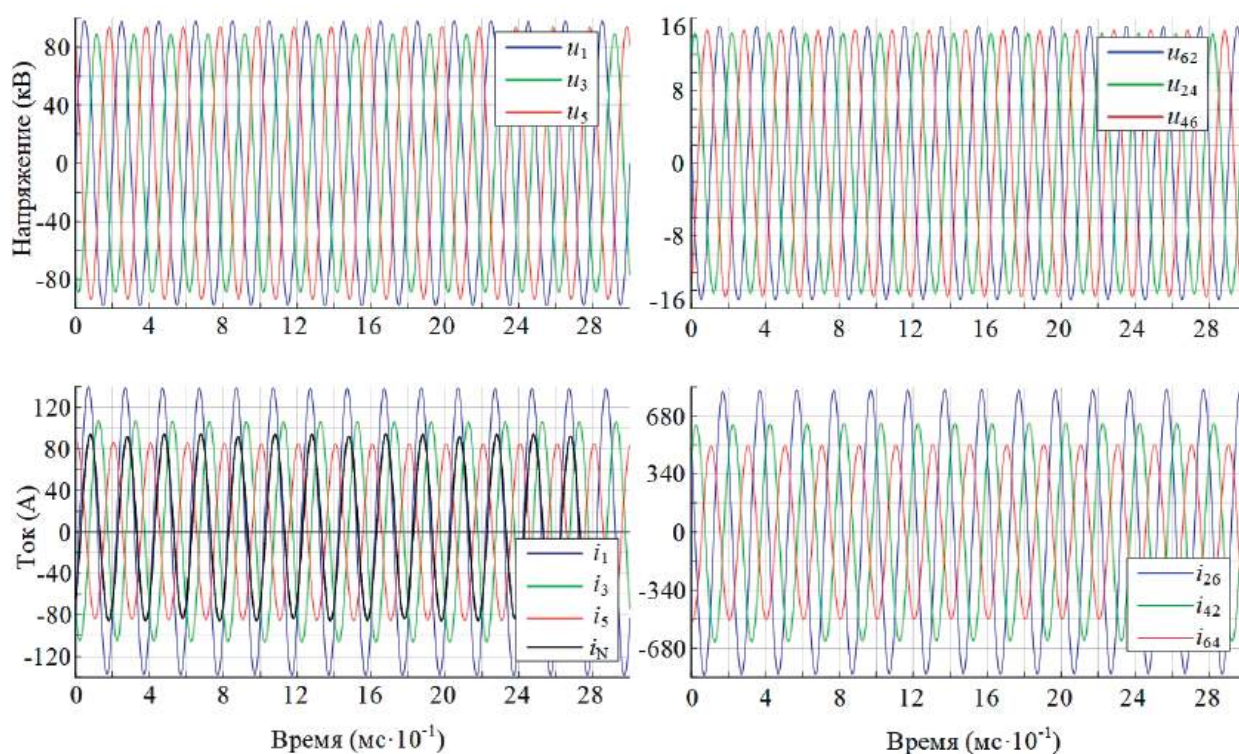


Рисунок 5. Моделирование работы трансформатора при несимметричном питающем напряжении

Figure 5. Simulation waveforms of primary and secondary winding currents and voltages with unbalanced supply voltage

Выводы

1. Разработана математическая модель трёхфазного двухобмоточного силового трансформатора с группой соединения обмоток $Y0/\Delta-11$ в неподвижной двухфазной системе координат, отличающаяся от существующих тем, что одним из выходных параметров является напряжение вторичной обмотки.

2. На основе разработанной математической модели синтезирована структур-

ная схема СТ, с помощью которой получена математическая имитационная модель в ПК Matlab/Simulink. В результате имитационного моделирования различных режимов СТ получены графики изменения токов и напряжений СТ. Анализ полученных графиков показывает соответствие выходных данных модели паспортным данным на СТ, что подтверждает корректность разработанной математической модели.

Список источников

1. Саушев А.В. Морфологический анализ категории «электротехническая система» // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 1 (29). С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201. EDN: TKJNDF.

2. Глазырин А.С., Попов С.С., Попов Е.И., Копырин В.А., Хамитов Р.Н., Филипас А.А., Тимошкин В.В., Беляускене Е.А., Кулеш Ю.О., Боловин Е.В., Ковалев В.З., Денеко М.В.

Разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 9. С. 203–219. DOI: 10.1879/9/24131830/2024/9/4826. EEDN: XEMXQK.

3. Сушков В.В., Горюнов В.Н., Ревякин Е.Е. Повышение эффективности электротехнической системы буровой установки с системой накопления электроэнергии // Омский научный

вестник. 2025. № 1 (193). С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2025-193-50-57>.

4. Кавалеров Б.В., Кошелев В.В. Математическое моделирование динамики электрических машин в фазных осях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 31. С. 72–90. EDN: AGQDNP.

5. Серебряков А.С., Осокин В.Л. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов при соединении обмоток по схеме Y/Y-0 и Y/Y0-0 // Вестник НГИЭИ. 2017. № 3 (70). С. 50–57. EDN: YHPSZZ.

6. Новаш И.В. Математические модели для исследования коммутационных режимов силовых трансформаторов // Наука и техника. 2002. № 6. С. 73–78.

7. Пустоветов М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 4. С. 97–100. EDN: PUTXMF.

8. Пустоветов М.Ю. Универсальная математическая модель трехфазного трансформатора с единым магнитопроводом // Электротехника. 2015. № 2. С. 57–61. EDN: TGT MJJ.

9. Bulucea C.A., Nicola D.A., Mastorakis N.E., Bulucea C.A. Three-Phase Power Transformer Modelling in AC/DC Traction Substations // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 292. Art. 01006. DOI: 10.1051/mateconf/201929201006.

10. Кузин Ю.Р., Калинин А.В., Грмак Д.С. Метод коррекции следящего привода с использованием токового трансформатора в местной обратной связи // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 6 (179). С. 142–158. EDN: WLXBSJ.

11. Кралин А.А., Алтуни Б.Ю. Моделирование трансформаторов преобразовательных агрегатов в Simulink // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2 (29). С. 45. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362. EDN: SZBJAL.

12. Аносов В.Н., Кавешников В.М., Орел Е.О. Математическое описание источника питания для бесконтактного подвода энергии как элемента системы управления // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2018. № 4 (41). С. 44–51. DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-44-51. EDN: UOBKJM.

13. Аносов В.Н., Кавешников В.М., Орел Е.О. Структурное и имитационное моделирование источника питания как элемента системы управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки.

2022. № 9. С. 448–453. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-448-453. EDN: AZUKNX.

14. Копылов И.П. Электрические машины: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.

15. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12–24.

References

1. Saushev A.V. Morfologicheskii analiz kategorii «elektrotekhnicheskaya sistema» [Morphological Analysis of Category Electrotechnical System]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova — Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2015, No. 1 (29), pp. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201. EDN: TKJNDF. [in Russian].

2. Glazyrin A.S., Popov S.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Belyauskene E.A., Kulesh Yu.O., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Deneko M.V. Razrabotka nablyudatelya s operativnym monitoringom uglovoi skorosti rotora i momenta soprotivleniya na valu pogruzhnogo asinkhronnogo dvigatelya [Design of an Observer with Real Time Monitoring Speed and Load Torque for Submersible Induction Motors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of The Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, Vol. 335, No. 9, pp. 203–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826. EDN: XEMXQK. [in Russian].

3. Sushkov V.V., Goryunov V.N., Revyakin E.E. Povyshenie effektivnosti elektrotekhnicheskoi sistemy burovoy ustanovki s sistemoi nakopleniya elektroenergii [Advancing Efficiency of a Drilling Rig Electrical System with a Battery Energy Storage System]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2025, No. 1 (193), pp. 50–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-50-57. [in Russian].

4. Kavalero B.V., Koshelev V.V. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki elektricheskikh mashin v faznykh osyakh [Mathematical Modelling of Dynamics of Electrical Machines In-Phase Axes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya — PNRPU Bulletin. Electrical Engineering, Information Technology, Control*

Systems, 2019, No. 31, pp. 72–90. EDN: AGQDNP. [in Russian].

5. Serebryakov A.S., Osokin V.L. Nesimmetrichnaya nagruzka trekhfaznykh transformatorov pri soedinenii obmotok po skheme Y/Y-0 i Y/Y0-0 [Unbalanced Load of Three-Phase Transformers at Connection of Windings according to the Scheme Y/Y-0 and Y/Y0-0]. *Vestnik NGIEI — Bulletin NGIEI*, 2017, No. 3 (70), pp. 50–57. EDN: YHPSZZ. [in Russian].

6. Novash I.V. Matematicheskie modeli dlya issledovaniya kommutatsionnykh rezhimov silovykh transformatorov [Mathematical Models for the study of Switching Modes of Power Transformers]. *Nauka i tekhnika — Science and Technique*, 2002, No. 6, pp. 73–78. [in Russian].

7. Pustovetov M.Yu. Matematicheskaya model' trekhfaznogo transformatora [Mathematical Model of a Three-Phase Transformer]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, Vol. 321, No. 4, pp. 97–100. EDN: PUTXMF. [in Russian].

8. Pustovetov M.Yu. Universal'naya matematicheskaya model' trekhfaznogo transformatora s edinyim magnitoprovodom [A Universal Mathematical Model of a Three-Phase Transformer with a Single Magnetic Core]. *Elektrotehnika — Russian Electrical Engineering*, 2015, No. 2, pp. 57–61. EDN: TGTMMJ. [in Russian].

9. Bulucea C.A., Nicola D.A., Mastorakis N.E., Bulucea C.A. Three-Phase Power Transformer Modelling in AC/DC Traction Substations. *MATEC Web of Conferences*, 2019, Vol. 292, Art. 01006. DOI: 10.1051/mateconf/201929201006.

10. Kuzin Yu.R., Kalinin A.V., Grimak D.S. Metod korrektsii sledyashchego privoda s ispol'zovaniem tokovogo transformatora v mestnoi obratnoi svyazi [Compensation of the Servomechanism Using Minor Feedback Loop with Current Transformer]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2016, No. 6 (179), pp. 142–158. EDN: WLXBSJ. [in Russian].

11. Kralin A.A., Altunin B.Yu. Modelirovanie transformatorov preobrazovatel'nykh agregatov v Simulink [Simulation of the Converter Devices Transformer in Simulink]. *Inzhenernyi vestnik Dona — Engineering Journal of Don*, 2014, No. 2 (29), pp. 45. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2362. EDN: SZBJAL. [in Russian].

12. Anosov V.N., Kaveshnikov V.M., Orel E.O. Matematicheskoe opisanie istochnika pitaniya dlya beskontaktnogo podvoda energii kak elementa sistemy upravleniya [Mathematical Description of a Power Supply Source for Contactless Energy Supply as a Control System Element]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii — Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2018, No. 4 (41), pp. 44–51. DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-44-51. EDN: UOBKJM. [in Russian].

13. Anosov V.N., Kaveshnikov V.M., Orel E.O. Strukturnoe i imitatsionnoe modelirovanie istochnika pitaniya kak elementa sistemy upravleniya [Structural Simulation Modeling of Power Supply as a Control System Element]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki — Izvestiya Tula State University*, 2022, No. 9, pp. 448–453. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-448-453. EDN: AZUKNX. [in Russian].

14. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny: ucheb. dlya vuzov* [Electric Machines: Textbook for Universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 360 p. [in Russian].

15. Novash I.V., Rumyantsev Yu.V. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki MatLab-Simulink s uchetom nasyshcheniya magnitoprovoida [Three-Phase Transformer Parameters Calculation Considering the Core Saturation for the Matlab-Simulink Transformer Model]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG — Power Engineering. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2015, No. 1, pp. 12–24. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 05.04.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2025; принята к публикации 30.04.2025.

The article was submitted 05.04.2025; approved after reviewing 24.04.2025; accepted for publication 30.04.2025.

Научная статья

УДК 621.313.32

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-21-30

РАСШИРЕНИЕ РЕАЛИЗУЕМОГО ДИАПАЗОНА МЕХАНИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

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

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

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

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

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

старший преподаватель кафедры «Электропривод,
мехатроника и электромеханика»,
Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

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

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

**Полина Дмитриевна Чулкова****Polina D. Chulkova**

магистрант,
Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

Актуальность

Современные тяговые электроприводы на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) требуют обеспечения широкого диапазона моментов и скоростей. Однако естественная характеристика СДПМ не соответствует параболической форме, характерной для тяговых систем, где необходим высокий момент на низких скоростях и его снижение на высоких. Традиционное управление с поддержанием нулевого тока по поперечной оси ($i_d = 0$) обеспечивает высокую энергоэффективность, но ограничивает максимальную скорость, что сужает рабочий диапазон привода.

Цель исследования

Разработка и анализ методов векторного управления СДПМ, позволяющих расширить скоростной диапазон без значительного ухудшения энергетических показателей. Особое внимание уделено оценке влияния тока размагничивания ($i_d < 0$) на потери в приводе и выбору оптимальных законов регулирования.

Методы исследования

В работе применено математическое моделирование на основе уравнений СДПМ с неявно выраженными полюсами, где токи по осям d и q выражены через параметры напряжения, сопротивления и угла θ между векторами напряжения и ЭДС. Произведен сравнительный анализ двух режимов управления, в частности, классический ($i_d = 0$), который максимизирует КПД, но ограничивает скорость, а также режим максимального момента, расширяющий скоростной диапазон за счет регулирования тока i_q и угла θ . Также произведен расчет механических и энергетических характеристик в относительных единицах для оценки влияния параметров двигателя на производительность и КПД.

Результаты

Показано, что предложенный метод управления не только расширяет диапазон скоростей, но и сохраняет высокие энергетические показатели привода. Режим максимального момента позволяет существенно расширить скоростной диапазон, но приводит к росту потерь при малых значениях относительной индуктивности обмотки ξ . Установлено, что при $\xi \rightarrow \infty$ (малом активном сопротивлении) КПД стремится к 100 %, а ток i_d становится постоянным, что минимизирует дополнительные потери. На основе анализа механических и энергетических характеристик предложены рекомендации по выбору оптимальных параметров управления, обеспечивающих баланс между диапазоном регулирования и энергоэффективностью.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании тяговых электроприводов для электромобилей, железнодорожного транспорта и промышленных механизмов, где требуется сочетание высокого пускового момента и широкого диапазона скоростей, а также систем, где критичны одновременно высокий момент и широкий диапазон скоростей. Таким образом, статья вносит вклад в развитие методов векторного управления СДПМ, предлагая эффективное решение для расширения рабочего диапазона двигателей без ухудшения их энергетических характеристик.

Ключевые слова

синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, векторное управление, диапазон моментов и скоростей ротора, угол между напряжением и ЭДС двигателя, электромагнитный КПД привода, механическая характеристика

Для цитирования: Воронин С. Г., Шабуров П. О., Кулёва Н. Ю., Клиначев Н. В., Чулкова П. Д. Расширение реализуемого диапазона механических координат электроприводов на основе синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 21-30. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-21-30>.

EXPANSION OF THE REALIZED RANGE OF MECHANICAL COORDINATES OF ELECTRIC DRIVES BASED ON SYNCHRONOUS MOTORS EXCITED BY PERMANENT MAGNETS

Relevance

Modern traction electric drives based on permanent magnet synchronous motors (PMSM) require a wide range of torques and speeds. However, the natural characteristic of the PMSM does not correspond to the parabolic shape typical of traction systems, where a high torque is required at low speeds and its reduction at high speeds. Traditional control with maintaining zero current along the transverse axis ($i_d = 0$) ensures high energy efficiency, but limits the maximum speed, which narrows the operating range of the drive.

Aim of research

Development and analysis of PMSM vector control methods that allow expanding the speed range without significant deterioration in energy performance. Particular attention is paid to assessing the effect of demagnetization current ($i_d < 0$) on drive losses and selecting optimal control laws.

Research methods

The paper uses mathematical modeling based on the equations of the PMSM with implicitly expressed poles, where the currents along the d and q axes are expressed through the parameters of voltage, resistance, and angle θ between the voltage and EMF vectors. A comparative analysis of two control modes is performed, in particular, the classic ($i_d = 0$), which maximizes efficiency but limits speed, and the maximum torque mode, which expands the speed range by regulating the current i_q and angle θ . The mechanical and energy characteristics are also calculated in relative units to assess the impact of engine parameters on performance and efficiency.

Results

It is shown that the proposed control method not only expands the speed range, but also maintains high energy performance of the drive. The maximum torque mode allows to significantly expand the speed range, but leads to an increase in losses at low values of the relative winding inductance ξ . It is established that at $\xi \rightarrow \infty$ (low active resistance) the efficiency tends to 100 %, and the current i_d becomes constant, which minimizes additional losses. Based on the analysis of mechanical and energy characteristics, recommendations are proposed for selecting optimal control parameters that provide a balance between the control range and energy efficiency.

The results of the work can be used in the design of traction electric drives for electric vehicles, rail transport and industrial mechanisms, where a combination of high starting torque and a wide speed range is required, as well as systems where both high torque and a wide speed range are critical. Thus, the article contributes to the development of vector control methods for PMSM, offering an effective solution for expanding the operating range of motors without deteriorating their energy characteristics.

Keywords

synchronous motor with permanent magnet excitation, vector control, torque and rotor speed range, angle between voltage and EMF of the motor, electromagnetic efficiency of the drive, mechanical characteristic

For citation: Voronin S. G., Shaburov P. O., Kuleva N. Yu., Klinachev N. V., Chulkova P. D. Rasshireniye realizuyemogo diapazona mekhanicheskikh koordinat elektroprivodov na osnove sinkhronnykh dvigateley s возбуждением от postoyannykh magnitov [Expansion of the Realized Range of Mechanical Coordinates of Electric Drives Based on Synchronous Motors Excited by Permanent Magnets]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 21–30 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-21-30>.

Постановка задачи исследования

При разработке тягового электропривода транспортных средств на основе синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) часто возникает проблема обеспечения заданного диапазона моментов и скоростей. Действительно, если обратиться к типовой механической характеристике тягового привода с обеспечением постоянной мощности, которая носит вид параболы с большим значением момента на низких скоростях и малым его значением на высоких скоростях вращения, то станет понятно, что естественная характеристика СДПМ без дополнительных средств управления здесь не подходит, так как одновременное обеспечение больших пусковых моментов и высоких скоростей холостого хода потребует неоправданного повышения установленной мощности двигателя. Чтобы избежать этого и приблизить вид механической характеристики привода на основе СДПМ к желаемому виду, используют различные мероприятия алгоритмического и схемного характера. Многие из них достаточно хорошо описаны в [1–6]. В частности, при векторном управлении для расширения рабочего диапазона привода используют так называемый режим размагничивания основного потока магнитов. Для этого устанавливают отрицательное значение тока i_d по поперечной оси ротора [7–9], хотя для уменьшения потерь в номинальном режиме работы привода стремятся поддерживать $i_d = 0$. Очевидно, чем больше будет ток размагничивания, тем больше будут электриче-

ские потери в приводе. В настоящей статье предпринята попытка оценить дополнительные потери, обусловленные необходимостью расширения рабочего диапазона привода за счёт увеличения модуля тока размагничивания и выработать рекомендации по выбору законов его регулирования.

Математическое описание электропривода с векторным управлением

Для описания электропривода в режиме векторного управления воспользуемся классическими уравнениями синхронных машин с неявно выраженными полюсами [10]. Токи по осям d и q могут быть записаны уравнениями:

$$I_d = \frac{U \cdot (x \cos \theta - r \sin \theta) - E \cdot x}{r^2 + x^2};$$

$$I_q = \frac{U \cdot (r \cos \theta + x \sin \theta) - E \cdot r}{r^2 + x^2},$$

где I_d, I_q — токи по осям d и q ;

U — амплитуда фазного напряжения;

r — активное сопротивление фазной обмотки;

θ — угол между векторами напряжения и ЭДС;

$E = \omega \cdot k_e$ — амплитуда ЭДС фазной обмотки;

k_e — коэффициент связи амплитуды фазной ЭДС со скоростью вращения ротора;

$x = \omega L_p$ — индуктивное сопротивление фазной обмотки;

p — число пар полюсов ротора;

L — индуктивность фазной обмотки;

Электромагнитный момент двигателя определяется выражением:

$$M = I_q \cdot k_m,$$

где $k_m = 1,5 \cdot k_e$.

Электромагнитный КПД определяется отношением электромагнитной мощности P_3 к потребляемой P_{Π} :

$$\eta_3 = \frac{P_3}{P_{\Pi}}.$$

Перейдём от размерных значений переменных к относительным, приняв в качестве базовых единиц: базовый ток $I_6 = U/r$, базовый момент $\omega_0 = U/k_e$, базовая скорость $M_6 = I_6 \cdot k_m$, базовая мощность $P_6 = M_6 \cdot \omega_0$.

В результате получим выражения для токов и мощностей в относительных единицах. Токи запишутся выражениями:

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

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

где $v = \omega/\omega_0$ — относительная скорость вращения ротора;

$\xi = pL\omega_0/r$ — относительная индуктивность обмотки.

Электромагнитная и потребляемая мощности соответственно:

$$P_3 = i_q v; \quad (2)$$

$$P_{\Pi} = i_q \cos \theta - i_d \sin \theta. \quad (3)$$

Относительный момент будет равен относительному току $\mu = i_q$, а КПД запишется выражением:

$$\eta = \frac{i_q v}{i_q \cos \theta - i_d \sin \theta}. \quad (4)$$

Расчет механических характеристик и энергетических показателей привода

Приведённые уравнения позволяют рассчитать механические характеристики привода и оценить электромагнитный КПД двигателя по соотношению (4) в любой рабочей точке.

Сначала рассмотрим традиционный для векторного управления режим при $i_d = 0$, обеспечивающий максимальный КПД привода [11]. Для этого в уравнении (1, а) примем ток в левой части равным нулю и решим следующее уравнение:

$$\xi v \cos \theta - \sin \theta - v^2 \xi = 0. \quad (5)$$

Найдём значение угла θ , соответствующего нулевому току i_d при номинальном фазном напряжении ($u = 1$).

При известном значении θ , u , ξ и заданном значении относительной скорости (v) по выражению (1, b) мы можем определить относительный момент двигателя (μ), что позволит построить механическую характеристику привода при сохранении нулевого тока по поперечной оси.

На рисунке 1 представлены механические характеристики привода при номинальном напряжении.

При известных θ , v и μ с учётом того, что $i_d = 0$ по выражению (4) рассчитаем КПД привода. Результаты расчёта для различных значений v и ξ представлены на рисунке 2.

Как следует из рисунков 1 и 2, механическая и энергетическая характеристики при $i_d = 0$ для малых значений ξ приблизительно соответствуют аналогичным характеристикам привода с классическим коллекторным двигателем. Чем меньше ξ , тем ближе это соответствие. При увеличении ξ механическая характеристика приближается к параболе, но скорость двигателя не может превысить значения $v = 1$, а КПД увеличивается, также приближаясь к единице.

Для того чтобы расширить рабочий диапазон привода, найдём значение угла θ , обеспечивающее максимальный момент двигателя при заданной скорости и номинальном напряжении. Для этого воспользуемся выражением для угла θ , соответствующего максималь-

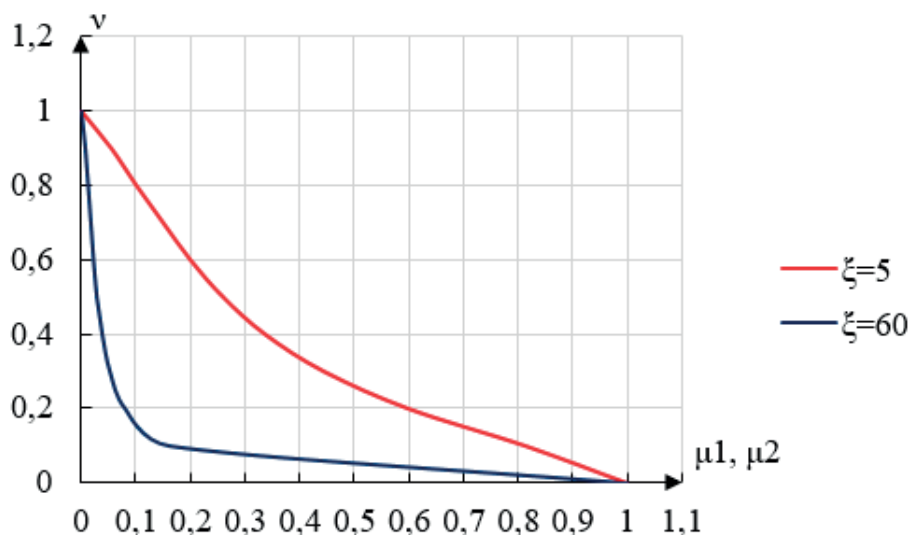


Рисунок 1. Механические характеристики привода при условии, что $i_d = 0$

Figure 1. Mechanical characteristics of the drive, provided that $i_d = 0$

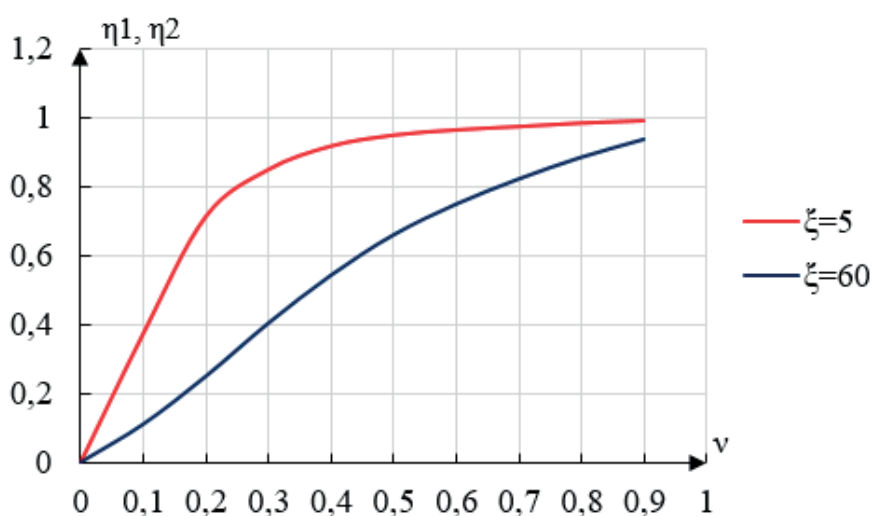


Рисунок 2. Энергетические показатели привода при условии, что $i_d = 0$

Figure 2. Energy performance of the drive provided that $i_d = 0$

ному моменту двигателя при известной скорости [10]:

$$\theta = \arctg(\xi v). \quad (6)$$

По известной скорости и рассчитанному по выражению (6) значению угла мы можем по выражению (1, b) определить относительное значение тока i_q , равное относительному значению макси-

мального момента и по выражению (1, a) — относительное значение тока i_d . Результаты расчёта для различных значений относительной индуктивности обмотки ξ представлены в таблице 1.

Далее по выражению (4) мы можем рассчитать значение КПД. Результаты расчётов также представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта параметров и координат привода при управлении из условия обеспечения максимального момента

Table 1. Results of calculating the parameters and coordinates of the drive when controlling from the condition of ensuring maximum torque

ξ	v	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
5	θ_1	0	0,464	0,785	0,983	1,107	1,190	1,249	1,292	1,326
	i_{d1}	0	-0,040	-0,100	-0,138	-0,160	-0,172	-0,180	-0,185	-0,188
	i_{q1}	1	0,814	0,607	0,462	0,367	0,302	0,256	0,222	0,195
	η_1	0	0,109	0,243	0,373	0,478	0,555	0,611	0,651	0,680
60	θ_2	0	1,406	1,488	1,515	1,529	1,537	1,543	1,547	1,550
	i_{d2}	0	-0,016	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017
	i_{q2}	1	0,162	0,082	0,055	0,041	0,033	0,027	0,023	0,020
	η_2	0	0,380	0,702	0,834	0,893	0,924	0,941	0,952	0,959
ξ	v	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	
5	θ_1	1,352	1,373	1,391	1,406	1,418	1,429	1,438	1,446	
	i_{d1}	-0,191	-0,192	-0,194	-0,195	-0,195	-0,196	-0,197	-0,197	
	i_{q1}	0,175	0,158	0,144	0,132	0,122	0,113	0,106	0,099	
	η_1	0,702	0,718	0,731	0,741	0,749	0,756	0,761	0,766	
60	θ_2	1,552	1,554	1,556	1,557	1,558	1,559	1,560	1,560	
	i_{d2}	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	-0,017	
	i_{q2}	0,018	0,016	0,015	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010	
	η_2	0,964	0,968	0,970	0,972	0,974	0,975	0,976	0,977	

Таким образом, получены механические характеристики привода при регулировании угла θ из условия получения максимальной скорости при имеющемся моменте (рисунок 3) и зависимости для КПД от скорости привода при регулировании его путём изменения тока i_d , что эквивалентно изменению угла θ (рисунок 4). При этом предполагается, что регуляторы тока не входят в насыщение.

Анализ результатов расчёта

Анализируя кривые на рисунке 3, можно отметить, что при регулировании приводом из условия обеспечения максимального момента при заданной скорости механические характеристики для любых ξ приближаются к параболической форме (чем больше ξ , тем ближе это соответствие). Скорость холостого хода

привода также увеличивается, т.е. характеристики в большей мере соответствуют требуемым характеристикам тягового привода транспортных средств с расширенным диапазоном скоростей. Однако чем меньше ξ , тем больше сказываются потери в активном сопротивлении обмотки от тока размагничивания, и мы можем существенно потерять в КПД (рисунок 4), так как даже при большой скорости КПД остаётся относительно низким (рисунок 4, кривая 1). При ξ , стремящемся к бесконечности, по мере увеличения скорости КПД стремится к 1 (рисунок 4, кривая 2).

Рассмотрим предельный случай, принимая активное сопротивление обмотки, стремящимся к 0 ($\xi \rightarrow \infty$). Очевидно, что в этом случае максимальный момент получим при $\theta = \pi/2$. С учётом этого

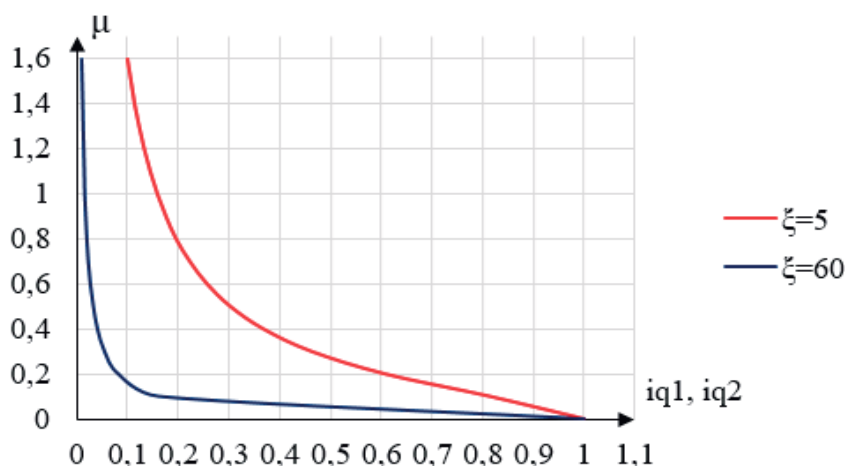


Рисунок 3. Механические характеристики привода при управлении с обеспечением максимального момента при заданной скорости

Figure 3. Mechanical characteristics of the drive when controlling to ensure maximum torque at a given speed

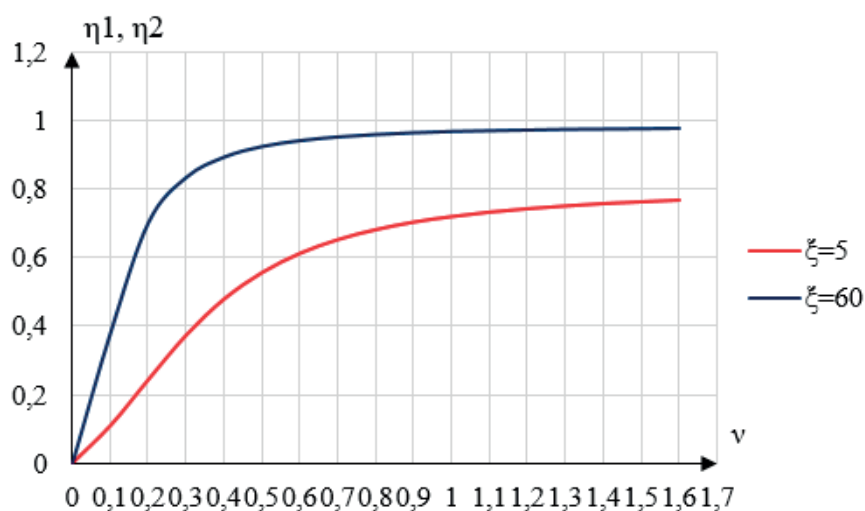


Рисунок 4. Энергетические характеристики привода при управлении с обеспечением максимального момента при заданной скорости

Figure 4. Energy characteristics of the drive when controlling to ensure maximum torque at a given speed

выражения для значений токов при номинальном напряжении ($u = 1$) запишутся в виде:

$$I_d = -\frac{E}{p\omega L} = \frac{K_e}{p\omega L}; i_d = -\frac{1}{\xi}; \quad (7, a)$$

$$I_d = \frac{E}{p\omega L}; i_q = \frac{1}{\xi v}. \quad (7, b)$$

Таким образом, ток i_d в случае пренебрежения активным сопротивлением обмотки можно принять постоянным. Его величина зависит от параметров магнитной цепи двигателя. Это подтверждается результатами расчёта для больших

ξ , приведёнными в таблице 1 (строки 6 и 14). Более того, уравнения (7, а) показывают, что максимальный момент двигателя развивается, когда падение напряжения на индуктивности фазы статорной обмотки оказывается равным ЭДС вращения.

Выводы

1. При управлении электроприводом в интервале от нуля до скорости, при которой привод может обеспечить заданный момент без выхода регуляторов тока в зону насыщения, целесообразно осуществлять его регулирование при $i_d = 0$. Это обеспечивает максимальный электромагнитный КПД привода.

2. С целью расширения рабочего диапазона скоростей, если двигатель не обеспечивает требуемого момента при $i_d = 0$, целесообразно осуществлять регулирование приводом из условия обеспечения максимума момента, поддерживая ток i_d постоянным в соответствии с выражением (7, а).

3. В том случае, если из-за ограничения по температурным режимам обмотки или из-за насыщения магнитной цепи машины мы не можем поддерживать значение тока i_d , рассчитанное по выражению (7, а), можно установить его меньшее значение. Однако при этом возможно некоторое снижение рабочего диапазона скорости в интервале выше скорости идеального холостого хода.

Список источников

1. Бербиренков И.А., Лохнин В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе электромобиля // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 4. С. 148-150. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3713/1/bulletin_tpu-2011-318-4-32.pdf.
2. Громышева А.Д., Овчинников И.Е., Егоров А.В. Управление скоростью и моментом вентильного двигателя в приводе транспортного средства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 3 (73). С. 43-52. EDN: NRAJUZ.
3. Рефки А., Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Микропроцессорная система прямого управления моментом электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 6. С. 62-66. EDN: OOHCSJD.
4. Сизякин А., Румянцев М. Управление вентильными электродвигателями на базе системы iMotion компании International Rectifier // Силовая электроника. 2012. № 2. С. 38-43.
5. Campbell-Kelly M., Croarken M., Flood R.G. (eds.). The History of Mathematical Tables from Sumer to Spreadsheets. Oxford: Oxford University Press, 2003. 373 p.
6. Пат. 2790625 РФ, МПК Н 02 Р 6/08, Н 02 Р 25/18. Способ и устройство для расширения скоростного диапазона и обеспечения живуче-

сти трёхфазного вентильного двигателя / П.О. Шабуров, С.Г. Воронин, Н.Ю. Кулёва, Р.А. Закиров, М.В. Федулов, И.В. Сунгуров, А.В. Харлов. № 2022129611; Заявлено 15.11.2022; Опубл. 28.02.2023. Бюл. 7.

7. Поздеев А.С., Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А. Современные типы синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе и способы управления ими // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: матер. Всеросс. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием. 2015. Т. 1. С. 188-192. EDN: YPFUCX.

8. Векторное управление двигателем // Инженерные решения. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector> (дата обращения: 10.04.2025).

9. Синхронный двигатель с постоянными магнитами // Инженерные решения. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm> (дата обращения: 10.04.2025).

10. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Электромеханика». М.: Высшая школа, 1988. 479 с. ISBN 5-06-001312-X.

11. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). URL: <https://prived>.

news/files/kniga_www_3.pdf (дата обращения: 10.04.2025).

References

1. Berbirenkov I.A., Lokhnin V.V. Tyagovye dvigateli na postoyannykh magnitakh v elektroprivode elektromobilya [Permanent Magnet Traction Motors in the Electric Drive of an Electric Vehicle]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2011, Vol. 318, No. 4, pp. 148-150. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3713/1/bulletin_tpu-2011-318-4-32.pdf. [in Russian].
2. Gromysheva A.D., Ovchinnikov I.E., Egorov A.V. Upravlenie skorost'yu i momentom ventil'nogo dvigatelya v privode transportnogo sredstva [Speed and Torque Control of Gate Motor in Vehicle Drive Gear]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik SPbGU ITMO — Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, No. 3 (73), pp. 43-52. EDN: NRAJUZ. [in Russian].
3. Refki A., Karakulov A.S., Dement'ev Yu.N., Kladiev S.N. Mikroprotssornaya sistema pryamogo upravleniya momentom elektroprivodov na baze sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Microprocessor System for Direct Control of Electric Drive Torque Based on a Synchronous Motor with Permanent Magnets]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika — Russian Electromechanics*, 2011, No. 6, pp. 62-66. EDN: OOHCD. [in Russian].
4. Sizyakin A., Rumyantsev M. Upravlenie ventil'nymi elektrodvigatelyami na baze sistemy iMotion kompanii International Rectifier [Control of Valve Electric Motors Based on the iMotion System by International Rectifier]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2012, No. 2, pp. 38-43. [in Russian].
5. Campbell-Kelly M., Croarken M., Flood R.G. (eds.). *The History of Mathematical Tables from Sumer to Spreadsheets*. Oxford, Oxford University Press, 2003. 373 p.
6. Shaburov P.O., Voronin S.G., Kuleva N.Yu., Zakirov R.A., Fedulov M.V., Sungurov I.V., Kharlov A.V. *Sposob i ustroystvo dlya rasshireniya skorostnogo diapazona i obespecheniya zhivuchesti trekhfaznogo ventil'nogo dvigatelya* [Method and Device for Expanding the Speed Range and Ensuring the Survivability of a Three-Phase Brushless Motor]. Patent RF, No. 2790625, 2023. [in Russian].
7. Pozdeev A.S., Kazakbaev V.M., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A. Sovremennyye tipy sinkhronnykh dvigatelei peremennogo toka s postoyannymi magnitami na rotore i sposoby upravleniya imi [Modern Types of Synchronous AC Motors with Permanent Magnets on the Rotor and Methods of Controlling Them]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Energo- i resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyayemye istochniki energii»*. [Materials of All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists with International Participation «Energy and Resource Saving. Energy Supply. Alternative and Renewable Energy Sources»]. 2015, Vol. 1, pp. 188-192. EDN: YPFUCX. [in Russian].
8. Vektornoe upravlenie dvigatelem [Vector Motor Control]. *Inzhenernye resheniya* [Engineering Solutions]. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector> (accessed 10.04.2025). [in Russian].
9. Sinkhronnyi dvigatel' s postoyannymi magnitami [Synchronous motor with Permanent Magnets]. *Inzhenernye resheniya* [Engineering Solutions]. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm> (accessed 10.04.2025). [in Russian].
10. Yuferov F.M. *Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroystv: uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spets. «Elektromekhanika»* [Electric Machines of Automatic Devices: Textbook for University Students Studying at the Specialty «Electromechanics»]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 479 p. ISBN 5-06-001312-X. [in Russian].
11. Kalachev Yu. N. Vektornoe regulirovanie (zametki praktika) [Vector Control (Notes of a Practitioner)]. URL: https://privod.news/files/kniga_www_3.pdf (accessed 10.04.2025). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 07.05.2025; принята к публикации 14.05.2025.

The article was submitted 05.05.2025; approved after reviewing 07.05.2025; accepted for publication 14.05.2025.

Научная статья

УДК 621.452.32

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-31-40

АНАЛИЗ СХЕМ РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ЕМКОСТНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ С ОДНИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ДВЕ СВЕЧИ

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

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

**Зульфья Газинуровна Габидуллина****Zulfiya G. Gabidullina**

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

Актуальность

Для малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД) в составе турбокомпрессорных стартеров, вспомогательных силовых установок и двигателей летательных аппаратов специального назначения с облегченными условиями запуска могут применяться емкостные системы зажигания с частичным резервированием, т.е. с одним преобразователем на две свечи. Такие системы зажигания обладают существенно меньшими массой и габаритами при допустимом уровне надежности по сравнению с классическими двухканальными системами. Известно достаточно много схмотехнических решений для систем зажигания с одним преобразователем на две свечи, отличающихся способом соединения двух полупроводниковых свечей и особенностями разрядных процессов в нормальном и аварийном режимах работы.

Представляет практический интерес выявление и анализ закономерностей разрядных процессов в таких системах зажигания для обоснования применимости в составе газотурбинных двигателей различного назначения.

Цель исследования

Сравнительная оценка показателей эффективности различных вариантов схем построения емкостных систем зажигания с одним преобразователем на две свечи для обоснования возможности их использования в составе малоразмерных ГТД различного назначения.

Методы исследования

Исследования проводились методом сравнительного анализа закономерностей разрядных процессов в емкостных системах зажигания

Ключевые слова

емкостная система
зажигания,
свеча зажигания,
емкость накопительного
конденсатора

с одним преобразователем на две свечи в нормальном и аварийном режимах работы на основе известных положений электротехники.

Результаты

Выявлены закономерности разрядных процессов колебательного и апериодического типов в различных вариантах схем емкостных систем зажигания с одним преобразователем на две свечи при параллельном и последовательном соединении свечей, дана сравнительная оценка показателей их эффективности. Представлены рекомендации по использованию таких систем зажигания.

Для цитирования: Гизатуллин Ф. А., Габидуллина З. Г. Анализ схем разрядных цепей емкостных систем зажигания с одним преобразователем на две свечи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 31-40. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-31-40>.

Original article

ANALYSIS OF DISCHARGE CIRCUIT SCHEMES OF CAPACITIVE IGNITION SYSTEMS WITH ONE CONVERTER FOR TWO PLUGS

Relevance

Capacitive ignition systems with partial redundancy, i.e. with one converter for two plugs, can be used for small-size gas turbine engines (GTE) as part of turbocharger starters, auxiliary power units and special-purpose aircraft engines with light startup conditions. Such ignition systems have considerably less weight and dimensions at an acceptable level of reliability in comparison with classical two-channel systems. There are quite a lot of circuit solutions for ignition systems with one converter for two plugs, differing in the way of connection of two semiconductor plugs and features of discharge processes in normal and emergency modes of operation.

It is of practical interest to identify and analyze the regularities of discharge processes in such ignition systems to substantiate their applicability in gas turbine engines for various purposes.

Aim of research

Comparative evaluation of efficiency indicators of different variants of schemes of capacitive ignition systems with one converter for two plugs to substantiate the possibility of their use in small-size GTE of various purposes.

Research methods

The researches were carried out by the method of comparative analysis of regularities of discharge processes in capacitive ignition systems with one converter for two plugs in normal and emergency modes of operation on the basis of known provisions of electrical engineering.

Results

Regularities of discharge processes of oscillating and aperiodic types in different variants of schemes of capacitive ignition systems with one converter for two plugs at parallel and series connection of plugs are revealed, comparative evaluation of their efficiency indicators is given. Recommendations for the use of such ignition systems are presented.

Keywords

capacitive ignition system,
spark plug, storage
capacitor capacity

For citation: Gizatullin F. A., Gabidullina Z. G. Analiz skhem razryadnykh tsepey yemkostnykh sistem zazhiganiya s odnim preobrazovatelem na dve svechi [Analysis of Discharge Circuit Schemes of Capacitive Ignition Systems with One Converter for Two Plugs]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 31-40 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-31-40>.

Введение

Емкостные системы зажигания для газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного и наземного применения выполняются, как правило, по схеме общего резервирования с одним резервным каналом, находящимся в нагруженном состоянии. Каждый канал включает в себя преобразователь для зарядки емкостных накопителей, зарядную и разрядную цепи со свечами зажигания [1–3]. Такие системы зажигания обладают высокими показателями надежности, но имеют значительные массу и габариты. Каналы работают независимо друг от друга, они связаны только по цепи электропитания. Известны более эффективные схемы двухканальных систем зажигания, в которых отказ свечи одного из каналов компенсируется увеличением энергетического потенциала другой свечи [3, 4]. Алгоритмы расчета надежности двухканальных систем зажигания в нормальном и аварийном режимах работы рассмотрены в [5].

Для ряда вспомогательных малоразмерных ГТД, работающих преимущественно в комфортных условиях наземного запуска, например, для турбокомпрессорных стартеров, газотурбинных двигателей в составе вспомогательных силовых установок, целесообразно применение систем зажигания с частичным резервированием, которые выполняются с одним преобразователем, обеспечивающим работу двух свечей [2]. Системы зажигания с частичным резервированием имеют несколько сниженные показатели надежности по сравнению с двухканальными системами, но обладают существенно меньшими массой и габаритами. Математическая модель для расчета надежности одной из разновидностей систем зажигания с одним преобразователем на две свечи в нормальном и аварийном режимах работы приведена в

[6]. Эти системы по схемам построения разрядных цепей делятся на два основных типа: с параллельным и последовательным соединением полупроводниковых свечей [2].

Постановка задачи и решение

В статье приводится анализ эффективности различных схем разрядных цепей систем зажигания с частичным резервированием с учетом новых разработок для возможного использования в составе разрабатываемых в настоящее время комбинированных систем зажигания с искровыми и СВЧ-разрядами.

Следует отметить, что схемы с последовательными свечами сложнее по сравнению со схемами с параллельными свечами с точки зрения организации разрядных процессов, особенно в аварийных режимах работы при отказе одной из свечей, но обладают повышенной энергетической эффективностью, т.е. в свечах суммарная энергия искровых разрядов выше, чем при параллельном их соединении. Объяснение этому факту состоит в том, что при последовательном соединении свечей разрядный ток через свечи превышает ток через каждую свечу в случае их параллельного соединения по причине того, что активное сопротивление искровых разрядов существенно меньше эквивалентного активного сопротивления всей разрядной цепи [2].

Рассмотрим некоторые возможные варианты систем зажигания с частичным резервированием с разными схемами включения свечей.

На рисунке 1 приведена схема системы зажигания с параллельным включением свечей и одним накопительным конденсатором [2]. Эта система относится к классу высоковольтных или комбинированных, т.к. содержит активизаторы, предназначенные для повышения надежности искрообразования в свечах.

В аварийном режиме при отказе одной из свечей вторая свеча сохраняет работоспособность, при чем в исправной свече выделяется вся энергия накопительного конденсатора, что частично компенсирует отказ одной свечи.

Общим недостатком систем зажигания с параллельными свечами и одним накопительным конденсатором является неравномерное распределение энергии искровых разрядов в свечах. Это связано с тем, что вследствие даже незначительных различий в характеристиках однотипных серийных полупроводниковых свечей пробой одной из них всегда происходит с опережением или отставанием по отношению к другой свече.

Возможные схемотехнические решения, обеспечивающие равномерное распределение энергии одного накопительного конденсатора при параллельном соединении свечей, приведены в [7, 8]. В этих схемах равномерное распределение энергии накопительного конденсатора достигается на основе использования дополнительных высоковольтных диодов в цепях свечей, при чем компенсация

отказа одной из свечей происходит за счет применения дополнительного разрядника, включающегося последовательно с основным разрядником в аварийном режиме. Одна из подобных схем показана на рисунке 2. Нечетные полу волны разрядного тока, имеющего колебательный характер, замыкаются через свечу F_1 , четные полу волны — через вторую свечу F_2 .

Импульсный трансформатор в этой схеме (рисунок 2) необходим для поддержания основного разрядника FV_1 в пробитом состоянии в интервале времени, когда полу волны тока протекают, минуя основной разрядник. Дополнительный разрядник FV_2 предназначен для обеспечения большей энергетической эффективности и надежности работы одной из свечей в аварийном режиме при отказе другой свечи.

Равномерное распределение энергии по свечам практически гарантировано при использовании двух разрядных цепей, каждая из которых имеет накопительный конденсатор. Подобным образом организована схемотехника в рабо-

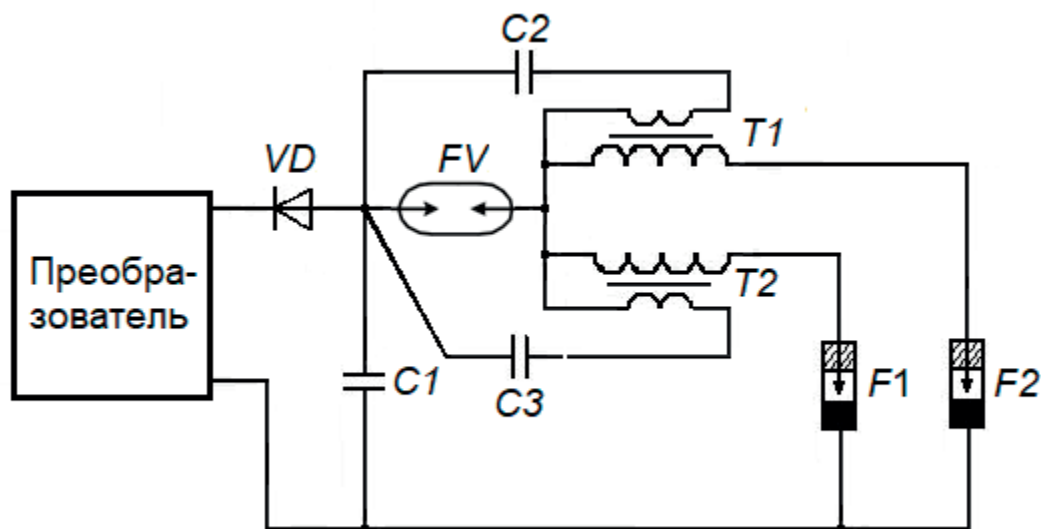


Рисунок 1. Принципиальная схема системы зажигания с параллельными свечами и одним накопительным конденсатором

Figure 1. Schematic diagram of the ignition system with parallel spark plugs and one storage capacitor

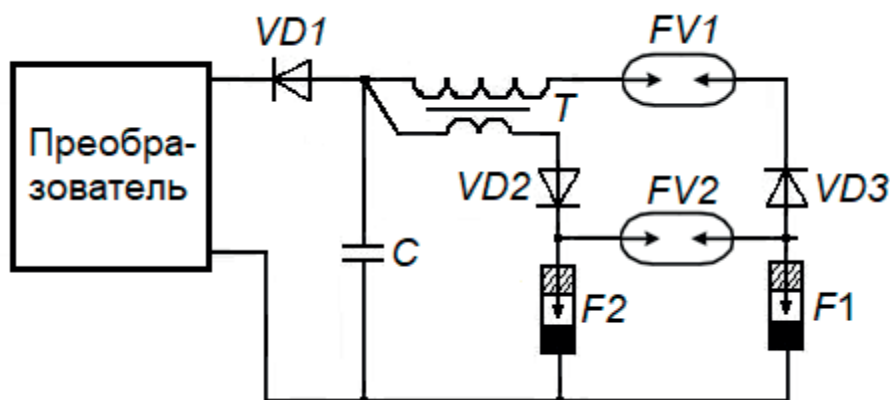


Рисунок 2. Принципиальная схема системы зажигания с дополнительными диодами и разрядником

Figure 2. Schematic diagram of the ignition system with additional diodes and a spark gap

тах [1, 2] применительно к двухканальной системе зажигания. Общим недостатком этих схем является отсутствие компенсации отказа одной из свечей. Более эффективными с точки зрения повышения надежности работы в аварийных режимах при отказе одной из свечей являются схемотехнические решения, описанные в [9–11]. Одна из возможных схем показана на рисунке 3.

Отличительной особенностью этих схем является наличие элемента, подключенного между общими точками соединения накопительных конденсаторов и выпрямителей. Такими элементами являются катушки индуктивности [9, 11] или дополнительный разрядник [10]. При наличии разрядника накопительный конденсатор цепи отказавшей свечи будет заряжаться до суммы пробивных напря-

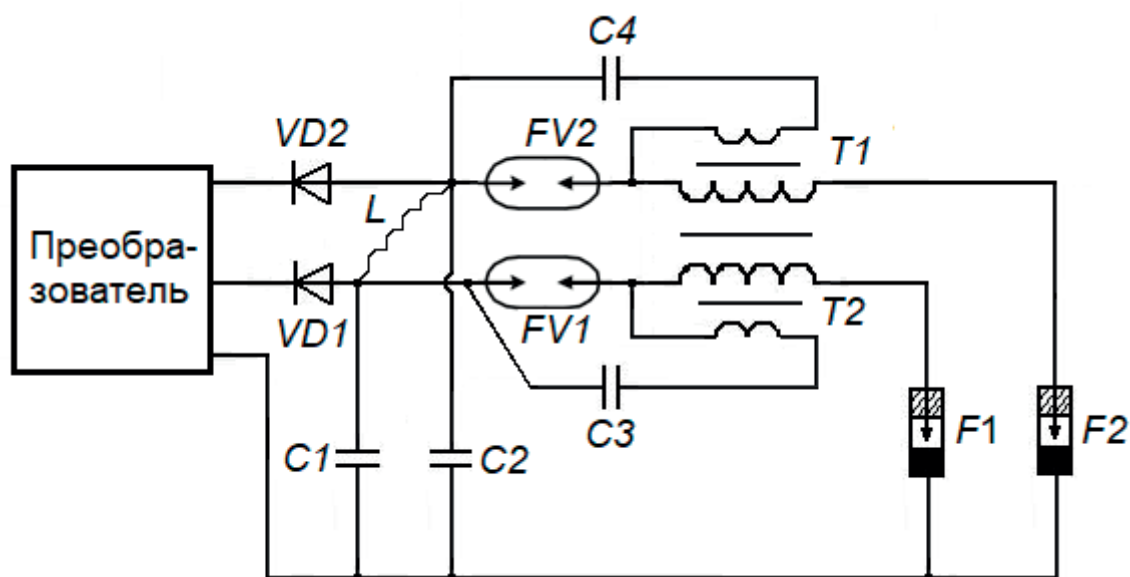


Рисунок 3. Принципиальная схема системы зажигания с параллельными свечами и двумя накопительными конденсаторами

Figure 3. Schematic diagram of the ignition system with parallel spark plugs and two storage capacitors

жений основного и дополнительного разрядников, что приведет к увеличению энергии искровых разрядов в исправной свече.

При необходимости синхронизации разрядных процессов в двух свечах возможно использование импульсного трансформатора с равными числами витков, каждая обмотка которого подключается в разрядные цепи последовательно со свечами [12].

Особую группу занимают системы зажигания с параллельными разрядными цепями, в свечах которых образуются однополярные разряды [2, 16]. Одна из возможных схем таких систем зажигания показана на рисунке 4. Особенностью схемы является то, что благодаря диодам VD_2 и VD_3 разряд в свечах является однополярным, апериодическим. Известно, что системы зажигания апериодического разряда обладают большей энергетической эффективностью и воспламеняющей способностью по сравнению с системами зажигания колебательного разряда. Важной особенностью схемы на рисунке 4 является также то, что в ней сочетаются преимущества системы зажигания апериодического разряда и

системы с активизаторами, однако в отличие от последних высоковольтные импульсы на вторичной обмотке каждого импульсного трансформатора T_1 и T_2 образуются без дополнительных конденсаторов за счет броска обратного тока в цепи диодов VD_2 и VD_3 после пробоя разрядника FV .

Рассмотрим особенности схем систем зажигания с одним преобразователем на две свечи в случае последовательного соединения свечей [2].

Один из возможных вариантов схем таких систем зажигания представлен на рисунке 5 [2]. В этой схеме дроссель $T3$ предназначен для обеспечения бесперебойной работы одной из свечей при обрыве в цепи второй свечи. Например, при отказе свечи F_1 ток разряда накопительного конденсатора замыкается через разрядник, одну из обмоток дросселя, «массу», исправную свечу и вторичную обмотку активизатора, соответствующего исправной свече. К дросселю, состоящему из двух полуобмоток, предъявляются противоречивые требования. Для уменьшения шунтирующего действия дросселя в нормальном режиме работы при исправных свечах его сопро-

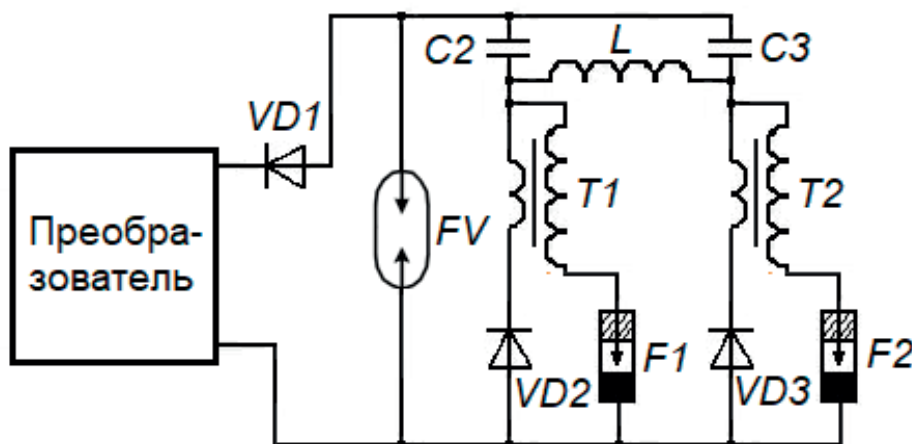


Рисунок 4. Принципиальная схема системы зажигания с однополярными разрядными импульсами

Figure 4. Schematic diagram of the ignition system with unipolar discharge pulses

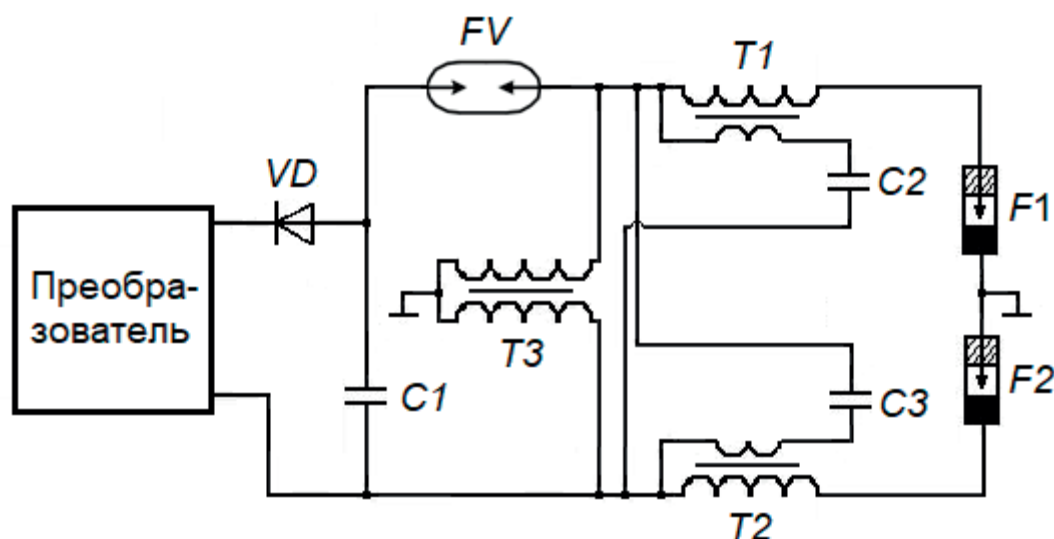


Рисунок 5. Принципиальная схема системы зажигания с последовательными свечами и дросселем

Figure 5. Schematic diagram of the ignition system with sequential spark plugs and a throttle

тивление должно быть большим, с другой стороны, для предотвращения значительного уменьшения разрядного тока через одну из свечей при обрыве в цепи другой свечи сопротивление дросселя должно быть минимальным.

Роль дросселя в подобных схемах могут выполнять два последовательно соединенных разрядника, точка соединения которых подключена к «массе» [2]. В этом случае при работе обеих свечей утечка тока через последовательно соединенные разрядники практически исключается, при чем при обрыве в цепи одной из свечей в исправной свече выделяется значительно большая энергия, т.к. накопительный конденсатор будет заряжаться до напряжения пробоя двух разрядников — основного и одного из дополнительных.

Общим недостатком упомянутых схем с последовательными свечами является недостаточно эффективная работа активизаторов, т.к. конденсаторы активизаторов заряжаются и разряжаются после

пробоя основного разрядника. Более эффективными являются варианты систем зажигания с последовательными свечами с другой схемой включения активизаторов, которые работают более надежно, т.к. конденсаторы в их составе заряжаются до момента пробоя основного разрядника, обеспечивая образование высоковольтных импульсов на вторичных обмотках импульсных трансформаторов после пробоя разрядника [2, 14–16].

Одна из подобных эффективных схем систем зажигания проведена на рисунке 6 [2]. В аналогичных по принципу работы схемах, описанных в [14, 15], роль полуобмоток дросселя выполняют последовательно соединенные разрядники, общая точка соединения которых подключена к «массе».

На основе описанных схем с последовательными свечами выполняется ряд систем зажигания малоразмерных ГТД различного назначения.

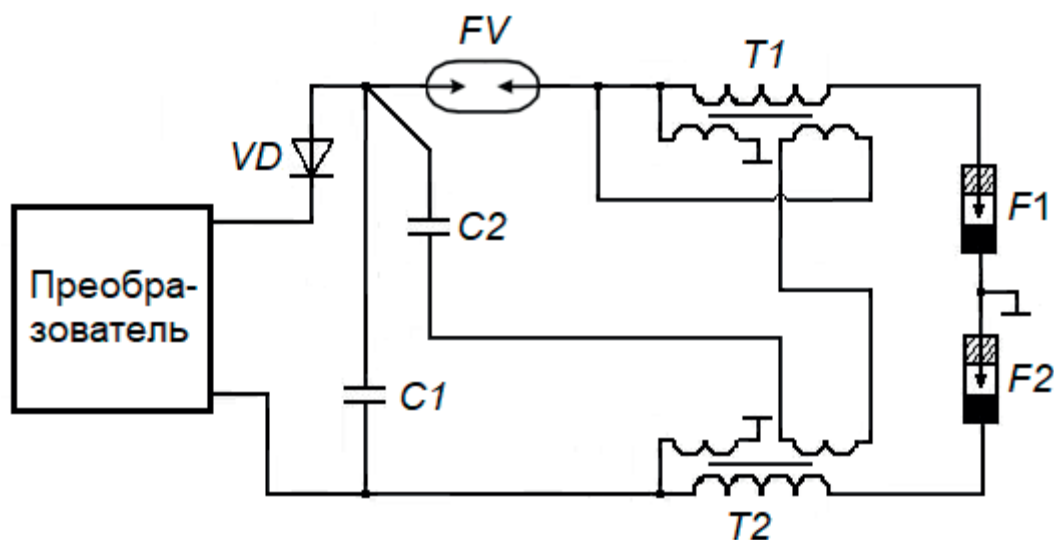


Рисунок 6. Принципиальная схема системы зажигания с последовательными свечами и полуобмотками дросселя на сердечниках импульсных трансформаторов

Figure 6. Schematic diagram of the ignition system with series spark plugs and choke half-windings on the cores of pulse transformers

Выводы

В результате проведенного анализа схем построения емкостных систем зажигания с одним преобразователем на две свечи можно сформулировать следующие выводы и рекомендации.

1. В условиях постоянства потребляемой мощности системы зажигания с последовательными свечами обладают большей энергетической эффективностью по сравнению с системами с параллельными разрядными цепями.

2. Общим недостатком систем зажигания с параллельными разрядными цепями и одним накопительным конденсатором является неравномерное распределение энергии конденсатора по свечам.

3. При наличии одного накопительного конденсатора в системе с параллельными разрядными цепями равномерное распределение энергии по свечам может быть достигнуто при включении в цепи свечей встречно-параллельных диодов с импульсным трансформатором, предназначенным для поддержания раз-

рядника в проводящем состоянии в интервалы времени, когда разрядный ток замыкается через одну из свечей, минуя разрядник.

4. С точки зрения равномерности распределения энергии разрядов по свечам более предпочтительными из систем зажигания с параллельными свечами являются различные варианты схем с двумя накопительными конденсаторами.

5. В системах зажигания с параллельными разрядными цепями в аварийном режиме при отказе одной из свечей вторая свеча сохраняет работоспособность; для компенсации отказа свечи общие точки соединения накопительных конденсаторов и выпрямителей могут соединяться через катушку индуктивности или дополнительный разрядник.

6. В системах зажигания с последовательными свечами при отказе одной из свечей вторая свеча сохраняет работоспособность за счет включения специального блока, состоящего из дросселя с двумя обмотками или двух дополнительных разрядников, что усложняет схему и

ухудшает массогабаритные характеристики.

7. Синхронизация разрядных процессов в системах зажигания с параллельными разрядными цепями может быть достигнута за счет использования импульсного трансформатора с равными числами витков при включении каждой обмотки последовательно с соответствующей свечой.

Список источников

1. Ноздрин Б.М., Поляк Х.А. Низковольтный агрегат системы зажигания емкостного разряда СКНА-22-2А. М.: Машиностроение, 1968. 48 с.
2. Гизатуллин Ф.А. Емкостные системы зажигания. Уфа: УГАТУ, 2002. 249 с. ISBN 5-86911-376-8.
3. Гизатуллин Ф.А., Заико А.И., Петунин В.И., Габидуллина З.Г. Способы повышения эффективности двухканальных систем зажигания газотурбинных двигателей // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 10-1(112). С. 12-17. DOI: 10.23670/IRJ.2021.112.10.002. EDN: EAXXGM.
4. Пат. на полезную модель 211567 РФ, МПК F 02 P 3/06. Двухканальное емкостное устройство зажигания / Ф.А. Гизатуллин, З.Г. Габидуллина, В.А. Коновалова. 2022105526, Заявлено 02.03.2022; Оpubл. 14.06.2022. Бюл. 17.
5. Гизатуллин Ф.А., Юшкова О.А., Шаймухаметова А.Г. Алгоритмы расчета надежности емкостной системы зажигания авиационного двигателя в разных условиях эксплуатации // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 5. С. 388-391. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-5-388-391. EDN: OLFOJR.
6. Гизатуллин Ф.А., Юшкова О.А. Оценка надежности емкостных систем зажигания с частичным резервированием в нормальном и аварийном режимах работы // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103, № 10. С. 795-799. DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-10-795-799. EDN: BNXPPI.
7. Пат. на полезную модель 36863 РФ, МПК F 02 P 3/06. Емкостная система зажигания с одним преобразователем на две свечи / Ф.А. Гизатуллин, К.В. Зиновьев. 2003115868/20, Заявлено 02.06.2003; Оpubл. 27.03.2004. Бюл. 9.
8. Пат. на полезную модель 124327 РФ, МПК F 02 P 3/06, F 02 P 3/04. Емкостная система

8. Выбор параллельного или последовательного способа включения свечей в разрядных цепях целесообразно проводить на основе совместного решения задач обеспечения максимальной энергетической эффективности и надежности в нормальных режимах работы систем зажигания и аварийных режимах при внезапных отказах одной из свечей.

зажигания с одним преобразователем на две свечи / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов, Т.М. Ищейкина. 2012130806/07, Заявлено 18.07.2012; Оpubл. 20.01.2013. Бюл. 2.

9. Пат. на полезную модель 155935 РФ, МПК F 02 P 1/00. Емкостная система зажигания с одним преобразователем на две свечи / Ф.А. Гизатуллин, А.Г. Каримова, Р.М. Салихов, Р.Р. Аглетдинов. 2015101628/07, Заявлено 20.01.2015; Оpubл. 20.10.2015. Бюл. 29.

10. Пат. на полезную модель 129160 РФ, МПК F 02 P 3/06, F 02 P 15/02. Емкостная система зажигания с одним преобразователем на две свечи / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов, Т.М. Ищейкина, Е.Ю. Покатаева, А.Ю. Барабанов. 2012157588/07, Заявлено 26.12.2012; Оpubл. 20.06.2013. Бюл. 17.

11. Пат. на полезную модель 218798 РФ, МПК F 02 P 3/06, F 02 P 15/02. Емкостное устройство зажигания с одним преобразователем на две свечи / Ф.А. Гизатуллин, З.Г. Габидуллина. 2023108037, Заявлено 31.03.2023; Оpubл. 14.06.2023. Бюл. 17.

12. Пат. на полезную модель 75700 РФ, МПК F 02 P 3/06. Емкостная система зажигания / Д.Р. Газизов, Ф.А. Гизатуллин. 2008109481/22, Заявлено 12.03.2008. Оpubл. 20.08.2008. Бюл. 23.

13. Пат. на полезную модель 219302 РФ, МПК F 02 P 3/06, F 02 P 15/02. Емкостная система зажигания с параллельными разрядными цепями / Ф.А. Гизатуллин, О.А. Юшкова. 2023111975, Заявлено 10.05.2023; Оpubл. 11.07.2023. Бюл. 20.

14. Пат. на полезную модель 24246 РФ, МПК F 02 P 3/06. Емкостная система зажигания с одним преобразователем на две свечи / Ф.А. Гизатуллин, Е.А. Галкина, А.В. Абросов. 2002100416/20, Заявлено 08.01.2002; Оpubл. 27.07.2002. Бюл. 21.

15. Пат. на полезную модель 76396 РФ, МПК F 02 P 3/06. Емкостная система зажигания с частичным резервированием / Ф.А. Гизатул-

лин, А.Н. Князев. 2008114883/22, Заявлено 15.04.2008; Оpubл. 20.09.2008. Бюл. 26.

16. Пат. на полезную модель 219137 РФ, МПК F 02 P 3/08. Емкостное устройство зажигания с последовательными свечами / Ф.А. Гизатуллин, Р.М. Салихов. 2023108030, Заявлено 31.03.2023; Оpubл. 29.06.2023. Бюл. 19.

References

1. Nozdryn B.M., Polyak Kh.A. *Nizkovol'tnyi agregat sistemy zazhiganiya emkostnogo razryada SKNA-22-2A* [Low-Voltage Unit of the Capacitive Discharge Ignition System SKNA-22-2A]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 48 p. [in Russian].

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

3. Gizatullin F.A., Zaiko A.I., Petunin V.I., Gabidullina Z.G. Sposoby povysheniya effektivnosti dvukhkanal'nykh sistem zazhiganiya gazoturbinykh dvigatelei [Methods for Improving the Efficiency of Two-Stroke Ignition Systems of Gas Turbine Engines]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal — International Research Journal*, 2021, No. 10-1(112), pp. 12-17. DOI: 10.23670/IRJ.2021.112.10.002. EDN: EAXXGM. [in Russian].

4. Gizatullin F.A., Gabidullina Z.G., Konovalova V.A. *Dvukhkanal'noe emkostnoe ustroystvo zazhiganiya* [Two-Channel Capacitive Ignition Device]. Patent RF, No. 211567, 2022. [in Russian].

5. Gizatullin F.A., Yushkova O.A., Shaimukhametova A.G. Algoritmy rascheta nadezhnosti emkostnoi sistemy zazhiganiya aviatsionnogo dvigatelya v raznykh usloviyakh ekspluatatsii [Algorithms for Calculating the Reliability of an Aircraft Engine Capacitive Ignition System for Different Operating Conditions]. *Vestnik mashinostroeniya — Bulletin of Mechanical Engineering*, 2023, Vol. 102, No. 5, pp. 388-391. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-5-388-391. EDN: OLFOJR.

6. Gizatullin F.A., Yushkova O.A. Otsenka nadezhnosti emkostnykh sistem zazhiganiya s chastichnym rezervirovaniem v normal'nom i avariinom rezhimakh raboty [Reliability Assessment of Capacitive Ignition Systems with Partial Redundancy in Normal and Emergency Operating Modes]. *Vestnik mashinostroeniya — Bulletin of Mechanical Engineering*, 2024, Vol. 103, No. 10,

pp. 795-799. DOI: 10.36652/0042-4633-2024-103-10-795-799. EDN: BNXPPI. [in Russian].

7. Gizatullin F.A., Zinov'ev K.V. *Emkostnaya sistema zazhiganiya s odnim preobrazovatelem na dve svechi* [Capacitive Ignition System with One Converter per Two Plugs]. Patent RF, No. 36863, 2004. [in Russian].

8. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Ishcheikina T.M. *Emkostnaya sistema zazhiganiya s odnim preobrazovatelem na dve svechi* [Capacitive Ignition System with One Converter per Two Plugs]. Patent RF, No. 124327, 2013. [in Russian].

9. Gizatullin F.A., Karimova A.G., Salikhov R.M., Agletdinov R.R. *Emkostnaya sistema zazhiganiya s odnim preobrazovatelem na dve svechi* [Capacitive Ignition System with One Converter per Two Plugs]. Patent RF, No. 155935, 2015. [in Russian].

10. Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Ishcheikina T.M., Pokataeva E.Yu., Barabanov A.Yu. *Emkostnaya sistema zazhiganiya s odnim preobrazovatelem na dve svechi* [Capacitive Ignition System with One Converter per Two Plugs]. Patent RF, No. 129160, 2013. [in Russian].

11. Gizatullin F.A., Gabidullina Z.G. *Emkostnoe ustroystvo zazhiganiya s odnim preobrazovatelem na dve svechi* [Capacitive Ignition Device with One Converter for Two Plugs]. Patent RF, No. 218798, 2023. [in Russian].

12. Gazizov D.R., Gizatullin F.A. *Emkostnaya sistema zazhiganiya* [Capacitive Ignition System]. Patent RF, No. 75700, 2008. [in Russian].

13. Gizatullin F.A., Yushkova O.A. *Emkostnaya sistema zazhiganiya s parallel'nymi razryadnymi tsepyami* [Capacitive Ignition System with Parallel Discharge Circuits]. Patent RF, No. 219302, 2023. [in Russian].

14. Gizatullin F.A., Galkina E.A., Abrosov A.V. *Emkostnaya sistema zazhiganiya s odnim preobrazovatelem na dve svechi* [Capacitive Ignition System with One Converter per Two Plugs]. Patent RF, No. 24246, 2002. [in Russian].

15. Gizatullin F.A., Knyazev A.N. *Emkostnaya sistema zazhiganiya s chastichnym rezervirovaniem* [Capacitive Ignition System with Partial Redundancy]. Patent RF, No. 76396, 2008. [in Russian].

16. Gizatullin F.A., Salikhov R.M. *Emkostnoe ustroystvo zazhiganiya s posledovatel'nymi svechami* [Capacitive Ignition Device with Sequential Spark Plugs]. Patent RF, No. 219137, 2023. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 23.04.2025; принята к публикации 30.04.2025.

The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 23.04.2025; accepted for publication 30.04.2025.

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-41-52

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА «SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS» ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ ВСКРЫТИЯ БАКА

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

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

**Андрей Максимович Третьяков****Andrey M. Tretiakov**

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

**Алексей Витальевич Шалимов****Aleksey V. Shalimov**

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

Актуальность

Современное состояние электрооборудования показывает высокую степень износа, вложение капитальных затрат на приобретение нового является невыполнимым, поэтому актуализация своевременной диагностики силовых трансформаторов для определения текущего состояния и дефектов, устранение которых позволит увеличить срок службы трансформаторов, является актуальным. Для проведения исследования в рамках статьи рассмотрен метод «Sweep Frequency Response Analysis» (SFRA). Результаты диагностики методом SFRA позволяют получить заключение о принятии решения о проведении или об отсутствии комплексного диагностического обследования, что приведет к сокращению расходов на ремонтные мероприятия.

Цель исследования

Целью работы является определение опасных деформаций в обмотках для принятия решения о необходимости проведения расширенных испытаний и измерений.

Ключевые слова

износ, частотный метод, силовой трансформатор, деформация обмоток, срок службы

Методы исследования

Для достижения поставленной цели был применен метод анализа частотных характеристик.

Результаты

Применение данного метода и снятие частотных характеристик на данный момент не является обязательным при заводских или приёмосдаточных испытаниях, капитальных ремонтах и после прохождения токов короткого замыкания через обмотки трансформатора. При этом нормативная документация по измерению частотных характеристик отражает лишь теоретическое описание. Для распространения и повышения эффективности применения данного метода необходимо снимать частотные характеристики заводских испытаний с приложением характеристики к заводской документации трансформатора с учетом особенностей типа, мощностей и класса напряжений, а также составить чёткую и последовательную инструкцию по обработке и нормированию полученных результатов.

Для цитирования: Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В. Применение частотного метода «Sweep Frequency Response Analysis» для выявления деформации обмоток силовых трансформаторов без вскрытия бака // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 41-52. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-41-52>.

Original article

APPLICATION OF SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS METHOD FOR DETECTING WINDING DEFORMATION OF POWER TRANSFORMERS WITHOUT OPENING THE TANK

Relevance

The current state of electrical equipment shows a high degree of wear and tear. The investment of capital expenditures for purchase of new one is unfeasible. Therefore, actualization of timely diagnostics of power transformers to determine the current state and defects, the elimination of which will increase the service life of transformers is relevant. To carry out such a study, the Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) method is considered within the framework of the article. The results of diagnostics by SFRA method allow to get the conclusion about decision making in carrying out or absence of complex diagnostic examination that will lead to reduction of expenses for repair measures.

Aim of research

The purpose of the work is to determine the dangerous deformations in windings to decide on the need for extended testing and measurements.

Research methods

To achieve the set goal the method of frequency characteristics analysis was applied.

Results

The use of this method and the frequency response measurement is currently not mandatory for factory or acceptance tests, overhauls and after short-circuit currents have passed through the transformer windings. At the same time, the normative documentation on frequency response measurement reflects only a theoretical description. For distribution and increase of efficiency of application of the given method it is necessary to take frequency

Keywords

wear, frequency method, power transformer, winding deformation, service life

characteristics of factory tests with application of characteristics to factory documentation of the transformer taking into account features of type, capacities and class of voltages, also to make the instruction on processing and normalization of the received results.

For citation: Kondrashova Yu. N., Tretiakov A. M., Shalimov A. V. *Primeneniye chastotnogo metoda «Sweep Frequency Response Analysis» dlya vyyavleniya deformatsii obmotok silovyykh transformatorov bez vskrytiya baka* [Application of Sweep Frequency Response Analysis Method for Detecting Winding Deformation of Power Transformers without Opening the Tank]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 41-52 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-41-52>.

Введение

Большинство динамических воздействий на обмотки трансформатора обусловлено электродинамическими силами токов коротких замыканий при внешних коротких замыканиях (КЗ), ошибочными действиями персонала (не отключено заземление выводов трансформатора при постановке под напряжение, что вызывает близкие КЗ), реже — повреждениями, полученными при неправильной транспортировке.

Деформация обмоток в свою очередь приводит к уменьшению изоляционных промежутков между слоями обмотки, распрессовке и созданию неблагоприятных условий работы обмоток. В таких условиях может усилиться разрядная активность, нагрев и износ изоляции, что в свою очередь влечёт более серьёзные последствия.

Главная задача диагноста — выявить опасные в дальнейшей эксплуатации дефекты, чтобы эксплуатирующая организация могла своевременно принять соответствующие меры по выводу и ремонту оборудования.

На сегодняшний день, в утверждённый нормативной документацией перечень электрических измерений входят следующие методы:

1. определение коэффициента трансформации — проверка правильности числа витков в обмотках;
2. определение полярности и группы соединения обмоток — контроль пра-

вильности соединения однофазных трансформаторов в трёхфазной сборке;

3. измерение сопротивления обмоток постоянному току — выявление неисправностей в проводах обмоток, паяных и контактных соединениях обмоток и переключающих устройств;

4. измерение тока и потерь холостого хода — выявление витковых замыканий обмоток и замыканий магнитопровода;

5. определение параметров изоляции — оценка состояния главной изоляции по сопротивлению изоляции, ёмкости и тангенсу угла диэлектрических потерь;

6. определение сопротивления короткого замыкания обмоток — выявление возможных деформаций обмоток с повреждением изоляции;

7. контроль состояния переключающих устройств — дефектов в переключающих устройствах выявляются чаще всего косвенно по результатам вышеперечисленных измерений [1].

Стандартный перечень измерений позволяет выявить дефекты в обмотках, но только в том случае, когда происходит нарушение изоляции элементов активной части и замыкания. При этом срочное проведение ремонтных воздействий требуется однозначно в кратчайшие сроки. В случае же, если таких значительных нарушений не происходит, перечисленные методы оказываются нечувствительны и не отражают фактического состояния трансформатора.

Результаты диагностики методом SFRA могут послужить основанием к проведению или непроведению комплексного диагностического обследования стандартными методами для получения более детальной информации. А необходимость вскрытия бака после аварийных воздействий будет выявляться заблаговременно, до развития дефектов в очевидно выявляемую стадию. По этой причине развитие методов анализа частотных характеристик становится актуальным.

Материалы и методы

Диагностика методом SFRA

Частотный метод SFRA заключается в анализе частотного отклика при прохождении сигнала плавающей частоты через обмотку трансформатора. В качестве результата измерения фиксируется зависимость коэффициента затухания сигнала в обмотке от частоты приложенного напряжения. Диапазон частот, выдаваемых генератором для проведения замера, ограничивается значениями от 2 Гц до 20 МГц [2].

В общем виде схема замещения обмотки трансформатора представляет собой активное сопротивление, индуктивность (сама обмотка) и ёмкости (относительно других обмоток, корпуса и магнитопровода). При воздействии высокочастотного сигнала проявляется влияние паразитных ёмкостей между витками обмоток и ёмкостей каждого витка относительно корпуса и магнитопровода (рисунок 1), а также индивидуальных индуктивных параметров витков. Вследствие неоднородностей в изоляции, проводнике и мельчайших различиях в расстоянии между витками частотный отклик для каждого трансформатора получается индивидуальным, как отпечатки пальцев.

По причине динамических воздействий в обмотках могут происходить деформации: потеря радиальной устойчивости (рисунок 2, *a, b*), полегание проводников (рисунок 2, *c*), осевое смещение (рисунок 2, *d*), скручивание (рисунок 2, *e*), повреждения из-за распрессовки и взаимного осевого смещения обмоток (рисунок 2, *f*).

Любые смещения проводников в обмотках вызывают изменения в индуктивном и ёмкостном взаимодействиях элементов активной части трансформатора и, как следствие, изменение частотного отклика (таблица 1). Метод SFRA направлен на фиксацию характеристик исправного трансформатора и проведение сравнительного анализа с его характеристикой в возможном состоянии деформации.

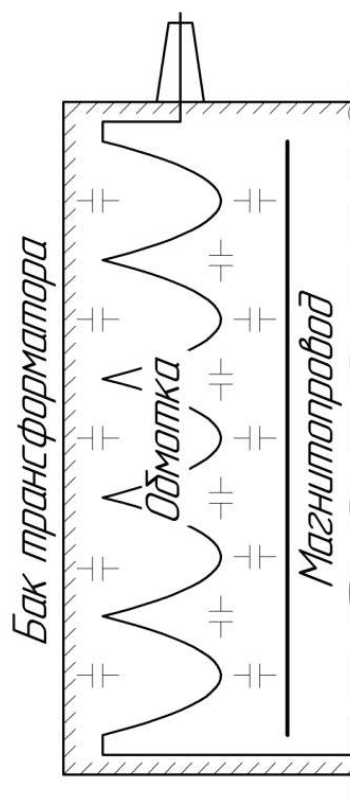


Рисунок 1. Схема паразитных ёмкостей трансформаторной обмотки

Figure 1. Schematic of transformer winding parasitic capacitances

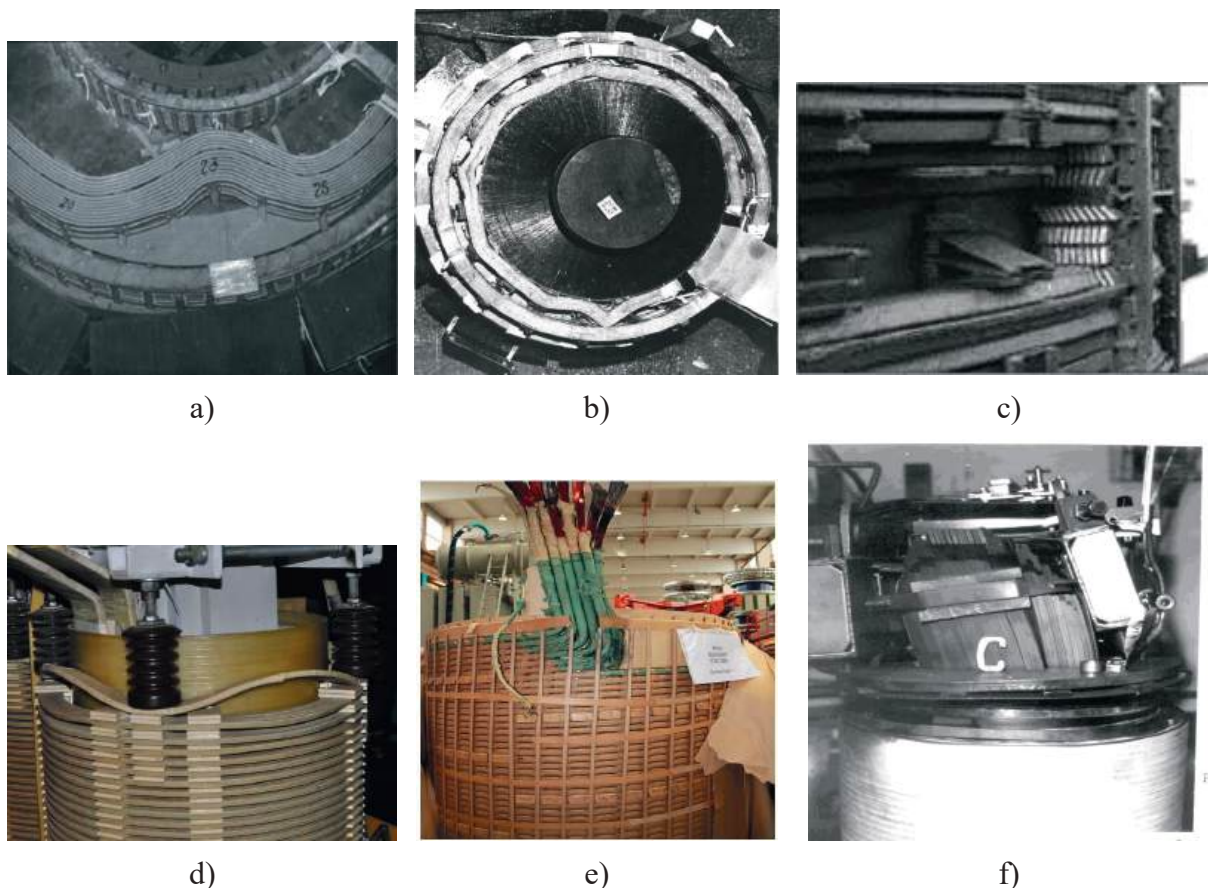


Рисунок 2. Виды деформаций в обмотках: потеря радиальной устойчивости в форме «волна» [3] (a), потеря радиальной устойчивости в форме «звезда» [4] (b), полегание проводников [5] (c), осевое смещение (d), скручивание [5] (e), повреждения из-за распрессовки и взаимного осевого смещения обмоток [4] (f)

Figure 2. Types of deformations in windings: loss of radial stability in the form of a «wave» [3] (a), loss of radial stability in the form of a «star» [4] (b), lying of conductors [5] (c), axial displacement (d), twisting [5] (e), damage due to compression and mutual axial displacement of windings [4] (f)

Помимо визуальной оценки характера деформаций проводится математический расчёт величины этих деформаций.

Результаты

Анализ частотной характеристики

Используемые на данный момент методики анализа частотных характеристик основываются на корреляционном анализе. В частности, наиболее актуальный метод расчёта описан в стандарте электроэнергетической промышленности Китайской Народной Республики DL/T 911-2016 [6].

Расчёт дисперсии:

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2. \quad (1)$$

Расчёт ковариации:

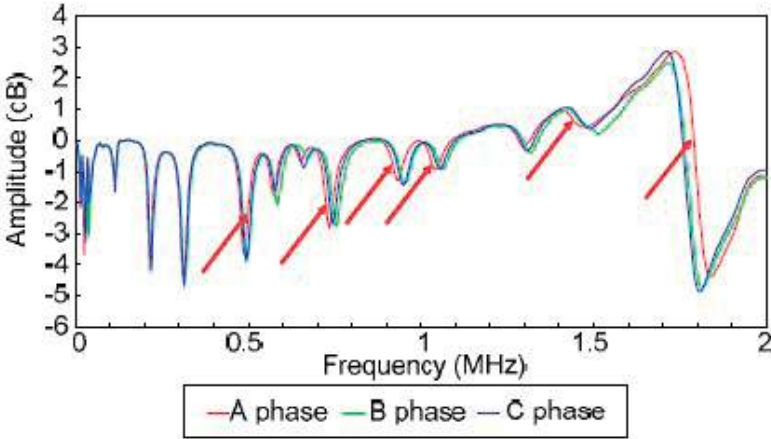
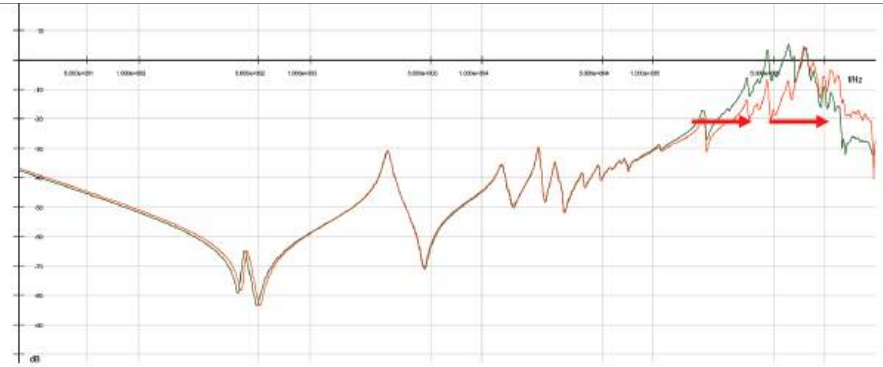
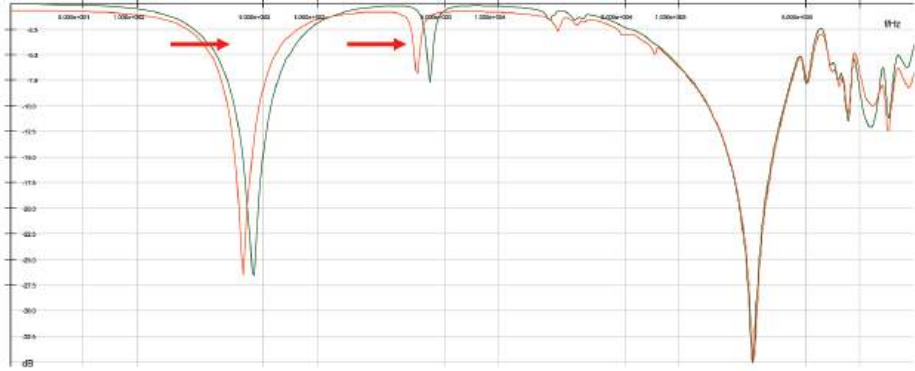
$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\left(X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right) \times \left(Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right) \right]. \quad (2)$$

Расчёт коэффициента корреляции:

$$R_{x,y} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{D[X]D[Y]}}. \quad (3)$$

Расчёт относительного коэффициента (relative factors):

Таблица 1. Некоторые виды дефектов с общей картиной частотного отклика [5]**Table 1.** Some types of defects with a common frequency response pattern [5]

Вид дефекта	Приблизительная картина частотного отклика
Полегание проводников	
Потеря радиальной устойчивости	
Скручивание	

$$RF_{xy} = \begin{cases} 10, \text{при } (1 - R_{xy}) < 10^{-10} \\ -\lg(1 - R_{xy}) \end{cases}. \quad (4)$$

Расчёт проводится в трёх частотных диапазонах (будет рассмотрено далее): LF — низкие частоты от 1 кГц до 100 кГц, MF — средние частоты от 100 кГц до 600 кГц, HF — высокие

частоты от 600 кГц до 1 МГц. Соответственно величина деформации нормируется на основании коэффициентов, полученных для этих зон. В таблице 2 приведены нормы определения степени деформации обмоток.

В зависимости от располагаемых данных сравнительный анализ может прово-

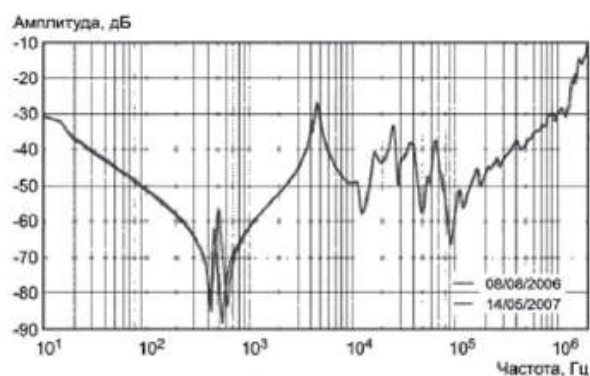
даться относительно следующих характеристик: исходной характеристики, снятой на этом же трансформаторе ранее; характеристики исправного трансформатора той же серии; однотипного трансформатора; характеристик трёх фаз обмотки самого диагностируемого трансформатора. Прибегая к использованию тех или иных данных, следует учи-

тывать, что в соответствии со списком естественные расхождения характеристик будут возрастать, а точность диагностики уменьшаться (рисунок 3). В случае применения характеристик разных трансформаторов это связано с мельчайшими конструктивными различиями в сборке. При сравнении обмоток между собой нужно учитывать, что усло-

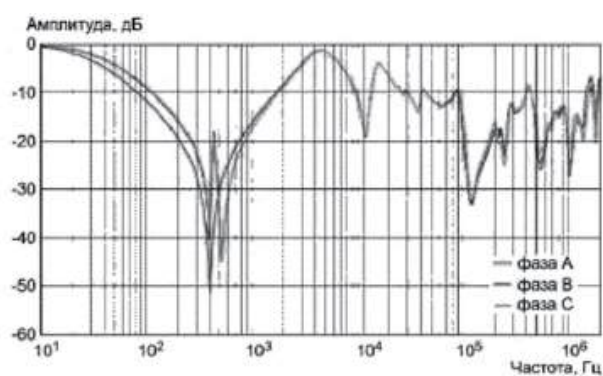
Таблица 2. Критерии оценки степени деформации обмоток

Table 2. Criteria for assessing the degree of winding deformation

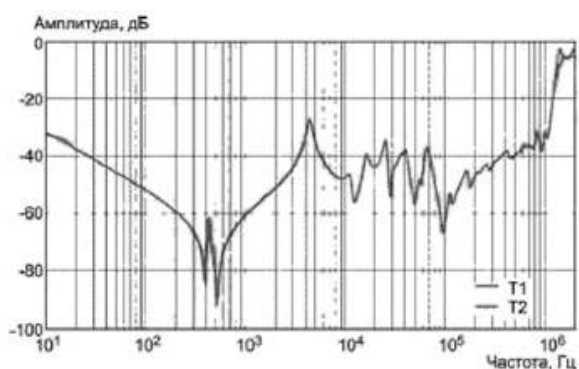
Коэффициенты R (relative factors)	Степень деформации обмотки
$RLF < 0.6$	Сильная деформация
$1.0 > RLF \geq 0.6$ или $RMF < 0.6$	Явная деформация
$2.0 > RLF \geq 1.0$ или $0.6 \leq RMF < 1.0$	Легкая деформация
$RLF \geq 2.0$, $RMF \geq 1.0$ и $RHF \geq 0.6$	Нормальное состояние



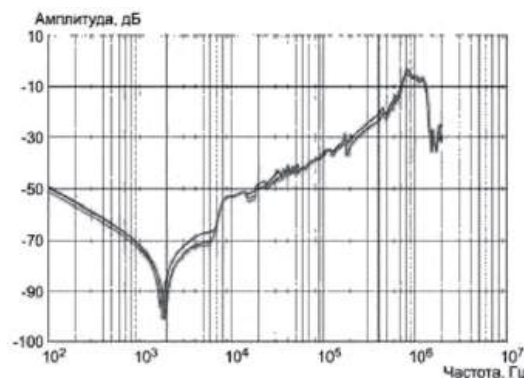
a)



b)



c)



d)

Рисунок 3. Сравнение частотных характеристик [7]: сравнение с исходным измерением (a), сравнение фаз одной обмотки (b), сравнение с трансформатором той же серии (c), сравнение с однотипным трансформатором (d)

Figure 3. Frequency response comparison: comparison with the original measurement (a), comparison of the phases of one winding (b), comparison with a transformer of the same series (c), comparison with a similar transformer (d)

вия работы и взаимодействия средней (фаза В) и крайних (фазы А, С) различны, и это будет сказываться на форме частотного отклика.

Частотная характеристика трансформатора разделяется на четыре зоны влияния элементов активной части. Эти зоны влияния приведены на рисунке 4: магнитопровод (А), взаимодействие между обмотками (В), конструкция обмоток (С), измерительная схема и провода, включая заземляющие проводники (D). Границы этих зон являются приближительными, так как в зависимости от типа, мощности, уровня напряжения трансформатора общие виды характеристик могут различаться.

Область А (рисунок 4), где преобладает влияние магнитопровода, в общем виде может быть представлена как V-образный график с экстремумом в районе двух третей своего диапазона. Для него характерна пологая форма и небольшое количество перегибов в районе нижнего экстремума.

Область В показывает взаимодействие между обмотками. Для этой зоны характерны размашистые колебания с общей

тенденцией на уменьшение значений к концу диапазона. Здесь всё ещё присутствует влияние магнитопровода, что объясняет величину размаха.

На рисунке 3 показан частотный отклик, снятый по «открытой» схеме — все выводы обмоток разомкнуты. Для исключения влияния магнитопровода применяются схемы с замыканием коротко неизмеряемой обмотки более низкого уровня напряжения [5–8]. В случае изменения по таким схемам размах колебаний в области В значительно уменьшится (таблица 3), но тенденция на спад сохранится.

Следует отметить, что разграничение частотной характеристики на зоны по ГОСТ Р 59239-2020 [7] и по стандарту DL/T 911-2016 [6] различны. Это обусловлено тем, что ГОСТ описывает зоны влияния элементов активной части трансформатора в целом, а в стандарте выделены зоны анализа состояния обмотки в частности.

В области С (рисунок 3) отражается влияние конструкции самих обмоток. Этой зоне характерны колебания со зна-

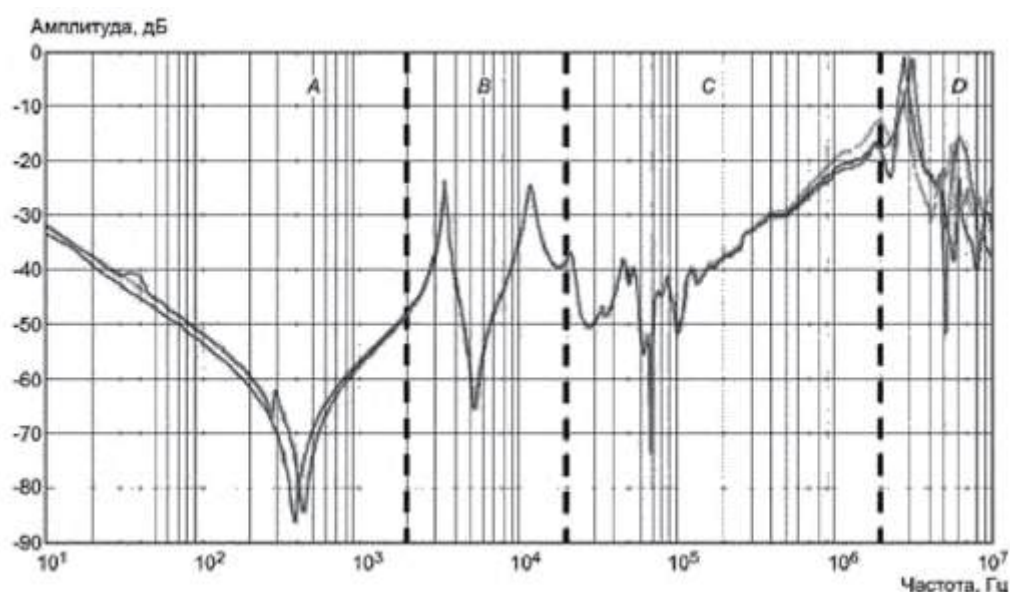
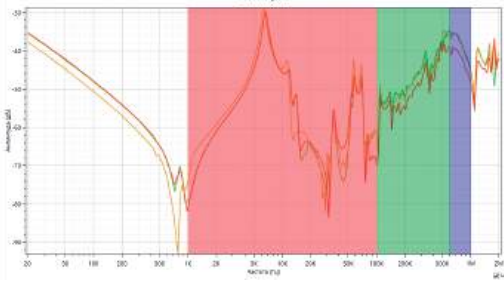
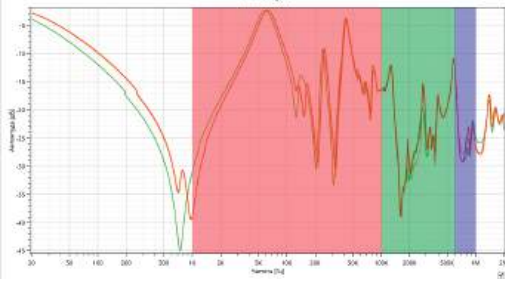
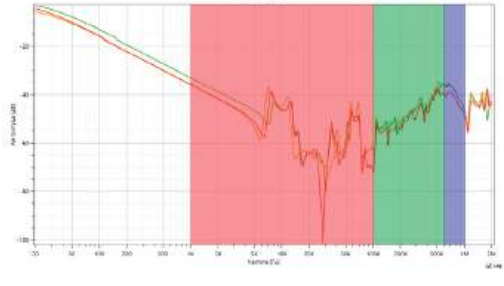
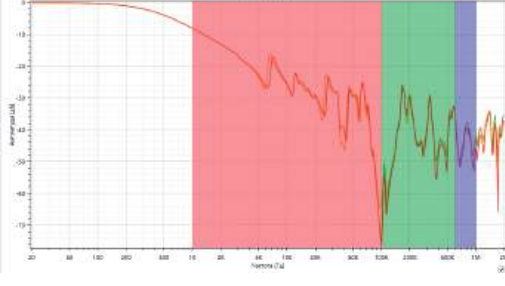


Рисунок 4. Частотная характеристика силового трансформатора [4]

Figure 4. Frequency response of a power transformer [4]

Таблица 3. Частотные характеристики, снятые по разным схемам измерений**Table 3.** Frequency characteristics taken by different measurement schemes

Схема изменения	Измеряемая обмотка	
	ВН	НН1
«Открытая»: измерительные выводы прибора подключены к противоположным выводам одной обмотки, при этом выводы остальных обмоток разомкнуты		
Закорочена НН2: измерительные выводы прибора подключены к противоположным выводам одной обмотки, при этом выводы обмоток НН закорочены между собой		

чительно меньшим размахом, тенденция изменяется на увеличение.

Область D графика (свыше 2 МГц) (рисунок 3) является неинформативной и не подлежит анализу, так как большее влияние здесь оказывает внешняя схема изменения: контактные соединения, соединительные проводники и т.д. Эта часть характеристики не повторяется от изменения к изменению.

Как можно заметить, по рисункам из таблицы 2 при измерениях с закороченными обмотками характеристики начинаются с продолжительного монотонно

убывающего участка. Следует предположить, что этот участок описывает чёткие границы влияния магнитопровода на частотный отклик, и оценку состояния обмоток можно проводить на основании анализа последующих диапазонов.

Однако разграничение графика частотного отклика обмоток трансформатора в имеющейся литературе ведётся безотносительно к индивидуальным характеристикам трансформаторов. В ГОСТ Р 59239-2020 описано, что границы частот могут меняться в зависимости от уровня напряжения и способа

намотки обмоток трансформаторов, однако эта информация также имеет обобщённый характер [7].

Также необходимо отметить, что в различной литературе сами границы рассматриваемых диапазонов могут отличаться. Как сказано ранее, в стандарте [6] в отличие от ГОСТ [7] зона анализа обмоток делится на 3 диапазона (низких, средних и высоких частот) и имеет отличающуюся левую границу. Согласно [9] при определении границ частотных характеристик учитывается не только мощность, но и назначение обмотки (обмотка высокого или низкого напряжения, регулировочная обмотка). Значения приводятся в таблице 4 [9].

Такие разногласия являются результатом несогласованных обобщений при составлении методик анализа результатов измерений в связи с отсутствием возможности учёта индивидуальных характеристик.

Для повышения эффективности анализа частотных характеристик требуется

индивидуальное уточнение диапазонов влияния элементов активной части на частотный отклик. Первым шагом для этого является точное определение зоны влияния магнитопровода, что на текущий момент представляется возможным благодаря проведению измерений по различным схемам, как сказано ранее. Однако выделение остальных диапазонов на данный момент затруднено в связи с недостаточностью опыта в данном направлении диагностики силовых трансформаторов и требует проведения исследований на большой выборке оборудования с учётом типа, мощности, напряжения и общего технического состояния.

Решение поставленной проблемы позволит проводить более обоснованный и подробный анализ частотного отклика трансформаторов, что в свою очередь повысит результативность и востребованность SFRA метода диагностики.

Таблица 4. Границы частотных характеристик обмоток согласно [9]

Table 4. Boundaries of winding frequency characteristics according to [9]

Назначение обмотки	Границы частотных характеристик, кГц			
	Для обмоток до 30 МВА		Для обмоток свыше 100 МВА	
	от	до	от	до
Обмотки высокого напряжения	10	1000	10	200
Обмотки низкого напряжения	50	1500	10	1000
Регулировочные обмотки	100	1500	100	1000

Выводы

Для того, чтобы применение данного метода стало целесообразным и эффективным, снятие частотных характеристик следует сделать обязательным при заводских или приёмо-сдаточных испытаниях, капитальных ремонтах и после прохождения токов короткого замыкания через обмотки трансформатора.

На данный момент в нормативной документации по измерению частотных характеристик (ГОСТ Р 59239-2020) отражено только общее теоретическое описание метода и некоторые нюансы, влияющие на проведение анализа.

Для распространения и повышения эффективности применения данного

метода требуется выполнение следующих задач:

— обобщение мирового опыта в изучении и применении данного метода в частности и частотных характеристик в целом;

— внесение снятия частотных характеристик в перечень заводских испытаний с приложением характеристики к заводской документации трансформатора в формате, установленном государственным стандартом;

Список источников

1. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования: нормативное производственно-практическое издание / АО «Фирма ОРГРЭС» / Под ред. Ф.Л. Когана. — М., 1999. 494 с. ISBN 5-900835-11-X.

2. Александров Н.М., Галиев И.Т., Мажурин Р.В. [и др.] Диагностика механического состояния обмоток силовых трансформаторов методом анализа частотного отклика (SFRA) // Электро-энергетика глазами молодежи — 2017: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 02–06 октября 2017 года. Т. 1. Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. С. 269-272. EDN ZIYWYX.

3. Александров Н.М. Диагностические модели деформации обмоток силовых трансформаторов. Уравнения электродинамических сил // Релейная защита и автоматизация. 2020. № 1(38). С. 32-35. EDN MVXDAI.

4. Дробышевский С.А. Дефекты механической части трансформаторов. Анализ частотных характеристик (SFRA) // Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования: матер. Пятнадцатой ежегодн. конф. компании «DIMRUS». Пермь, 2018.

5. Дробышевский С.А. Анализ частотных характеристик (SFRA). Примеры применения // Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования: матер. Пятнадцатой ежегодн. конф. компании «DIMRUS». Пермь, 2018.

6. DL/T 911-2016. Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers. Issue date: 05.02.2016, Implementation date: 01.07.2016.

7. ГОСТ Р 59239-2020 (МЭК 60076-18:2012) Трансформаторы силовые и реакторы. Метод измерения частотных характеристик. М.: Стандартинформ, 2021. 49 с.

— разработка методических указаний, содержащих четкие и последовательные инструкции по проведению измерений и дальнейшему анализу частотных характеристик трансформатора с учетом его типа и номинальных параметров.

Вместе с тем необходимо определить инструкции по однозначной интерпретации полученных результатов и их нормированию.

8. Анализатор частотных характеристик «FreDA»: руководство по эксплуатации. ООО «Димрус», Пермь, 14-16 февраля 2018.

9. CIGRE WG A2.26. Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA). CIGRE Brochure 342, 2008. ISBN 978-2-85873-030-8.

References

1. *Sbornik metodicheskikh posobii po kontrolyu sostoyaniya elektrooborudovaniya: normativnoe proizvodstvenno-prakticheskoe izdanie, AO «Firma ORGRES»* [Collection of Methodical Manuals on the Control of Electrical Equipment Condition: Normative Industrial-Practical Edition, JSC «Firma ORGRES»]. Edited by F.L. Kogan. Moscow, 1999. 494 p. ISBN 5-900835-11-X. [in Russian].

2. Aleksandrov N.M., Galiev I.T., Mazhurin R.V. [i dr.] *Diagnostika mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovykh transformatorov metodom analiza chastotnogo otklika (SFRA)* [Diagnostics of mechanical condition of power transformer windings by frequency response analysis (SFRA)]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi — 2017»*, Samara, 02–06 oktyabrya 2017 goda. T. 1. [Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference «Electric Power Engineering through the Eyes of Youth — 2017», Samara, October 02-06, 2017. Vol. 1]. Samara, Samara State Technical University, 2017, pp. 269-272. EDN ZIYWYX. [in Russian].

3. Aleksandrov N.M. *Diagnosticheskie modeli deformatsii obmotok silovykh transformatorov. Uravneniya elektrodinamicheskikh sil* [Diagnostic Models of Power Transformers Winding Deformation. Equations of Electrodynamics Forces]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya — Relay Protection and Automation*, 2020, No. 1(38), pp. 32-35. EDN MVXDAI. [in Russian].

4. Drobyshevskii S.A. Defekty mekhanicheskoi chasti transformatorov. Analiz chastotnykh kharakteristik (SFRA) [Defects of the Mechanical Part of Transformers. Frequency Characteristic Analysis (SFRA)]. *Materialy pyatnadtsatoi ezhegodnoi konferentsii kompanii «DIMRUS» «Metody i sredstva kontrolya izolyatsii vysokovol'nogo oborudovaniya»* [Materials of the Fifteenth Annual Conference of the Company «DIMRUS» «Methods and Means of the Insulation Control of the High-Voltage Equipment»]. Perm', 2018. [in Russian].

5. Drobyshevskii S.A. Analiz chastotnykh kharakteristik (SFRA). Primery primeneniya [Frequency Response Analysis (SFRA). Examples of application]. *Materialy pyatnadtsatoi ezhegodnoi konferentsii kompanii «DIMRUS» «Metody i sredstva kontrolya izolyatsii vysokovol'nogo oborudovaniya»* [Materials of the Fifteenth Annual Conference of the Company «DIMRUS» «Methods and Means of the Insulation Control of the High-Voltage Equipment»]. Perm', 2018. [in Russian].

6. DL/T 911-2016. *Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers*. Issue date: 05.02.2016, Implementation date: 01.07.2016.

7. GOST R 59239-2020 (MEK 60076-18:2012). *Transformatory silovye i reaktory. Metod izmereniya chastotnykh kharakteristik* [IEC 60076-18:2012, Power Transformers. Part 18: Measurement of Frequency Response. MOD]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 49 p. [in Russian].

8. *Analizator chastotnykh kharakteristik «FreDA»: rukovodstvo po ekspluatatsii* [Frequency Characteristics Analyzer «FreDA». Operation Manual]. ООО «Dimrus», Perm', 14-16 fevralya 2018. [in Russian].

9. CIGRE WG A2.26. *Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)*. CIGRE Brochure 342, 2008. ISBN 978-2-85873-030-8.

Статья поступила в редакцию 13.03.2025; одобрена после рецензирования 23.04.2025; принята к публикации 30.04.2025.

The article was submitted 13.03.2025; approved after reviewing 23.04.2025; accepted for publication 30.04.2025.

Научная статья

УДК 621.365

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-53-62

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Пётр Игоревич Васильев****Petr I. Vasiliev**

старший преподаватель кафедры

«Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

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

магистрант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

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

ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Александр Дмитриевич Павлов****Alexander D. Pavlov**

студент кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Актуальность

На сегодняшний день на территории России, особенно в условиях Крайнего Севера, существует множество нефтяных месторождений, имеющих низкий потенциал для разработки ввиду малых запасов нефти и сложных условий её подготовки, что делает освоение таких месторождений экономически нецелесообразным. Нагрев нефти является неотъемлемым процессом промышленной подготовки, существующие системы нагрева в ряде случаев имеют недостатки, такие как высокая стоимость монтажа и эксплуатации, пожароопасность и низкий КПД.

Ключевые слова

индукционный нагрев, трубчатые печи, первичная подготовка нефти, низкодебитные месторождения

Цель исследования

Обосновать перспективность использования индукционного нагрева нефти по сравнению с трубчатыми печами, оценивая такие аспекты, как надежность, безопасность и эффективность.

Методы исследования

Компьютерное моделирование в программном обеспечении Comsol, проведение сравнительного анализа применяемых технологий по обогреву нефти низкодебитных месторождений в условиях Крайнего Севера на основе статистического и аналитического исследования достоверных научных источников, представленных в качестве методических пособий и научных публикаций, для выявления зависимостей между различными способами нагрева и характеристиками нефти.

Результаты

Установлено, что системы индукционного обогрева могут быть широко использованы при подготовке и транспорте высоковязких нефтей. На этом принципе могут быть сделаны внутрискважинные нагреватели и парогенераторы, системы подогрева трубопроводов с высоковязкой продукцией. Имеется значительный потенциал использования индукционных систем для подогрева запорной арматуры на нефтеперерабатывающих предприятиях.

Для цитирования: Васильев П. И., Шумихин А. Ю., Афлятунов Р. Р., Павлов А. Д. Перспективы внедрения индукционных нагревательных систем в нефтегазовой промышленности // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 53-62. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-53-62>.

Original article

PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF INDUCTION HEATING SYSTEMS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Relevance

Today, in Russia, especially in the Far North, there are many oil fields with low potential for development, due to small oil reserves and difficult conditions for its preparation, which makes the development of such fields economically impractical. Oil heating is an integral process of field preparation, existing heating systems in some cases have disadvantages, such as: high cost of installation and operation, fire hazard and low efficiency.

Aim of research

To prove the prospects of using induction heating of oil in comparison with tubular furnaces, assessing such aspects as reliability, safety and efficiency.

Research methods

Computer modeling in Comsol software, conducting a comparative analysis of the applied technologies for heating oil from low-yield deposits in the Far North based on statistical and analytical research of reliable scientific sources presented as methodological manuals and scientific publications to identify the dependencies between different heating methods and oil characteristics.

Keywords

induction heating, tubular furnaces, primary oil treatment, low-yield deposits

Results

It has been established that induction heating systems can be widely used in the extraction, preparation and transportation of high-viscosity oils. Downhole heaters and steam generators, heating systems for pipelines with highly viscous products can be made on this principle. There is a significant potential for using induction systems for heating shut-off valves at oil refineries.

For citation: Vasiliev P. I., Shumikhin A. Yu., Aflyatunov R. R., Pavlov A. D. Perspektivy vnedreniya induktsionnykh nagrevatel'nykh sistem v neftegazovoy promyshlennosti [Prospects for the Introduction of Induction Heating Systems in the Oil and Gas Industry]. Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 53-62 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-53-62>.

Обогрев нефтепроводов

Для снижения вязкости нефти и уменьшения вероятности формирования парафиновых отложений (рисунок 1), влияющих на пропускную способность нефтепровода, а также загруженность электродвигателей магистральных насосных агрегатов, используют такие методы как: механический, химический, биологический и термический [1, 2].



Рисунок 1. Смолопарафиновые отложения

Figure 1. Tar-paraffin deposits

Методы обогрева нефтепроводов

На сегодняшний день наиболее распространёнными являются два основных метода нагрева высоковязкой нефти при её транспортировке по нефтепроводу:

— применение трубчатых печей;

— электротермические методы.

Принцип работы печи заключается в следующем: холодная нефть поступает в печь через входной трубопровод и направляется в коллектор теплообменной камеры. Затем нефть распределяется по нижним змеевиковым ветвям, которые размещены параллельно внутри теплообменного корпуса. Пройдя по этим змеевикам, нефть собирается в выходном коллекторе [3, 4]. Во время движения по змеевикам нефть нагревается за счет тепла, которое передают продукты сгорания топлива, сжигаемого в нескольких камерах сгорания.

Электротермический способ нагрева нефтепроводов основан на применении тепла, создаваемого либо электромагнитным полем, либо нагревом проводников при протекании тока.

В основе электротермического метода лежат следующие технологии:

— *греющие кабели и ленты регулируемой и нерегулируемой мощности.* Такие проводники обеспечивают адаптивный нагрев посредством изменения степени нагрева собственной поверхности в зависимости от температуры окружающей среды и параметров объекта;

— *индукционные системы различной частоты.* Этот метод является наиболее перспективным ввиду того, что нагрев производится прямо в целевой нагреваемой среде, что исключает необходимость

использования промежуточных теплоносителей [5, 6];

— *скин-система* — комбинированный метод нагрева, использующий как индукционный метод, так и резистивный. Этот метод предполагает закрепление ферромагнитных полых цилиндров вдоль всей наружной поверхности.

Применение трубчатых печей для нагрева нефтепроводов

Трубчатая печь представляет собой объект, сопряженный с высоким риском возникновения пожаров и взрывов, что связано с наличием открытого пламени в большинстве случаев и температурами, превышающими пороги самовоспламенения углеводородов. В случае выхода из строя змеевика и выброса продукта под давлением (рисунок 2) нарастают риски возникновения пожара или взрыва, что может привести к жертвам среди обслуживающего персонала, значительным материальным убыткам и затяжным простоям сопряженного оборудования [7].

Несмотря на основные преимущества, такие как высокая производительность и возможность быстрого нагрева углеводородов, традиционные трубчатые печи имеют серьезные недостатки, касающиеся их безопасности [4, 8].

Согласно статистике Ростехнадзора, 11 % всех аварий на объектах нефтегазовой отрасли происходят по причине выхода из строя трубчатых печей. Среди главных причин, приводящих к аварии, можно выделить:

1. образование пожаро- и взрывоопасного облака в результате нарушения герметичности близстоящих установок и его воспламенение в результате попадания на раскаленные металлоконструкции печи;
2. возникновение и воспламенение взрывоопасного облака в радиационной секции трубчатой печи в результате поступления топлива при погасании горелок;
3. ошибки обслуживающего персонала при проведении пусковых операций трубчатой печи;
4. нарушение герметичности трубчатых змеевиков по причине механических повреждений и попадание топлива внутрь камеры сгорания.

Электротермические методы нагрева нефтепроводов

Электротермические методы нагрева нефтепроводов включают в себя резистивный, резистивно-индукционный (осуществляемый скин-системами) и индукционный подходы.



Рисунок 2. Дефекты змеевиков печей, приводящие к взрыво- и пожароопасным авариям на технологических установках

Figure 2. Defects in furnace coils leading to explosive and fire-hazardous accidents at technological installations

Технология резистивного нагрева является наиболее распространенной и доступной среди всех электротепловых методов, в которой тепло генерируется благодаря сопротивлению проводника при протекании по нему электрического тока [4, 9].

Метод нагрева, сочетающий резистивные и индукционные технологии нагрева, реализуется через скин-системы. Эти системы состоят из проводника, изготовленного из материала, неподверженного влиянию магнитных полей, такого как медь или алюминий, который помещается внутрь ферромагнитной трубки. Толщина стенок трубки определяется с учетом частоты переменного тока [4, 6].

Сравнение трубчатых печей и электротермических методов нагрева нефтепроводов

Индукционный и резистивно-индукционный методы нагрева отличаются широким диапазоном мощностей и температур, что позволяет адаптировать оборудование под различные задачи. Они более эффективны и безопасны, чем трубчатые печи, которые требуют значительных производственных средств при отсутствии какой-либо мобильности [3, 8].

Трубчатые печи используют открытое пламя и оборудование под давлением, создавая риск механических повреждений и пожароопасности.

Электротермическое нагревание обеспечивает концентрированный и равномерный прогрев, снижая тепловые потери и повышая КПД. Хотя максимальная температура этих методов ниже, они предлагают стабильный и контролируемый процесс нагрева, выгодно отличаясь от трубчатых печей. Индукционный нагрев выделяется своими преимуществами и перспективностью [2, 10].

Методы нагрева нефти на промыслах

Электрические нагреватели, такие как трубчатые электронагреватели (ТЭН) и индукционные нагреватели с промежуточным теплоносителем, Предлагают и альтернативные методы нагрева нефти на промыслах. ТЭН, погруженные в жидкость, имеют низкий КПД, повышенную взрывопожароопасность и подвержены коррозии из-за прямого контакта с агрессивной средой, что может вызвать аварии. Индукционный нагрев, создавая тепло непосредственно в теплообменном трубопроводе, позволяет избежать этих недостатков, предлагая эффективные и безопасные решения для нагрева нефти [1, 2, 9].

1. Индукционный нагрев обеспечивает равномерный прогрев нефти и низкую тепловую инерцию, поскольку тепло образуется в корпусе реактора. Это способствует равномерному протеканию электрохимических реакций, предотвращая неблагоприятные явления, такие как спекание, сохраняя качество нефти. Для визуализации распределения тепла было выполнено компьютерное моделирование индукционного нагрева нефти в программе Comsol.

Как видно из результатов проведенного моделирования (рисунок 3), температура распределяется равномерно по всей длине участка трубопровода, что позволяет точно регулировать температуру нагреваемой среды и избежать локальных перегревов и прогаров данных участков, что повышает безопасность эксплуатации подобных установок.

2. Ввиду того, что нагрев нефти происходит за счёт выделения тепла в стенках аппарата отсутствует необходимость учитывать термическое сопротивление стенок, которое требуется принимать во внимание при косвенном нагреве. Данное решение дает

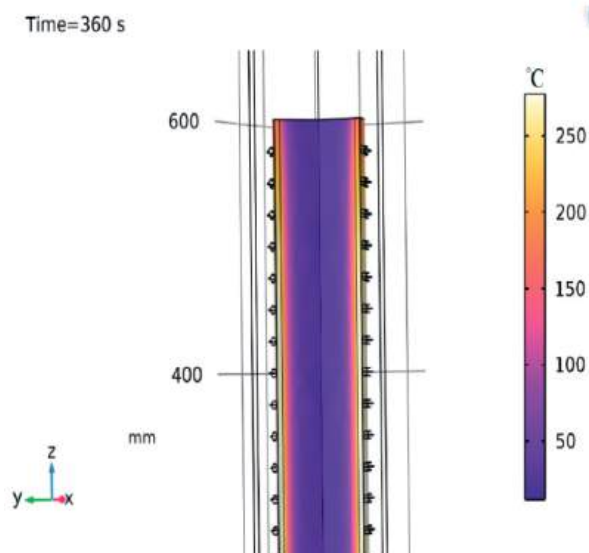


Рисунок 3. Распределение температуры на участке трубопровода при индукционном нагреве

Figure 3. Temperature distribution in the pipeline section during induction heating

возможность снизить температуру нагрева, а также увеличить КПД.

3. *Индукционный нагрев также позволяет регулировать температуру смеси с высокой точностью и широким диапазоне (от 50 °C до 500 °C), поэтому разброс параметров нагреваемой нефти остается незначительным, а ее качество стабильным.*

4. Индукторные катушки, щит распределения и управления обладают *взрывобезопасным исполнением*, а незначительное давление воздушной смеси под кожухом реакторной обмотки обеспечивает безопасность работы оборудования.

5. Благодаря тому, что в качестве элемента обогрева используются стенки аппарата, *обеспечивается возможность изменения интенсивности обогрева с помощью управления геометрической формой нагреваемого слоя.*

Во втором варианте установки индукционная система монтируется с определенными промежутками вдоль обогрева-

емого трубопровода, который уже имеет теплоизоляцию на всей длине [9, 10].

Исследование нагрева участка трубопровода посредством экспериментальной установки

Для обогрева длинных трубопроводов используются протяженные нагревательные системы.

Задачей расчета является вычисление индуктивности контура, при которой собственный период колебаний контура будет меньше периода коммутаций источника питания.

Индуктивность прямолинейного участка рассчитывается по формуле:

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot \omega^2 \cdot d \cdot \Phi}{4\pi}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная;

ω — количество витков;

d — диаметр соленоида. Общая емкость контурных емкостных элементов C_k должна рассчитываться с учетом резонансного режима работы колебательного контура:

$$C_k = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L_u}; \quad (2)$$

где L_u — индуктивность контура.

Согласно методике [11], число витков индуктора зависит от напряженности магнитного поля на поверхности индуктора и определяется по формуле:

$$w_1 = \frac{H_{01} \cdot h_1}{\sqrt{2} \cdot I_1}; \quad (3)$$

где $I_1 = \frac{P_{s\Sigma} \cdot 10^3}{U_1}$ — ток индуктора;

$P_{s\Sigma}$ — суммарная мощность системы индуктор-загрузка;

H_{01} — напряженность магнитного поля на поверхности индуктора;

h_1 — высота индуктора.

$$H_{01} = \frac{1}{k_{св}} \cdot \sqrt{\frac{P_{02} \cdot 10^6}{\rho_2 \cdot \mu_p \cdot f \cdot F_\phi}}, \quad (4)$$

где $k_{св}$ — коэффициент связи;

p_{02} — удельная поверхностная мощность в нагрузке;

ρ_2 — удельное электрическое сопротивление;

μ_r — относительная магнитная проницаемость;

F_ϕ — поправочная функция.

Расчетные значения экспериментальной установки, найденные по методике [11], представлены в таблице 1.

Для оценки равномерности распределения температуры участка трубопровода была разработана экспериментальная лабораторная установка (рисунок 4). Эксперимент проводился при частоте 15,4 кГц, питание осуществлялось от сети 220 В, потребляемый ток 2,05 А. Число витков составляет 150, индуктив-

ность контура — 0,104 мГн, добротность контура 1,41.

Экспериментально выявлено, что наиболее эффективным режимом работы для индукционных нагревательных систем, при котором КПД имеет максимальное значение по причине переключения транзисторов в нуле тока, является режим резонанса, при котором ток и напряжение совпадают по фазе, что видно из осциллограммы на рисунке 5.

Для того чтобы убедиться в эффективности работы системы были сняты термограммы во время работы установки (рисунок 6). Как видно из термограммы (рисунок 6), прогрев участка трубопровода происходит равномерно на всем его протяжении.

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения экспериментальной установки

Table 1. Calculated and experimental values of the experimental setup

Параметр	Расчет	Эксперимент
Ток, А	2,24	2,05
Количество витков, шт.	155	150
Индуктивность, Гн	0,112	0,104



Рисунок 4.
Экспериментальная установка для нагрева участка трубопровода

Figure 4. Experimental installation for heating a pipeline section

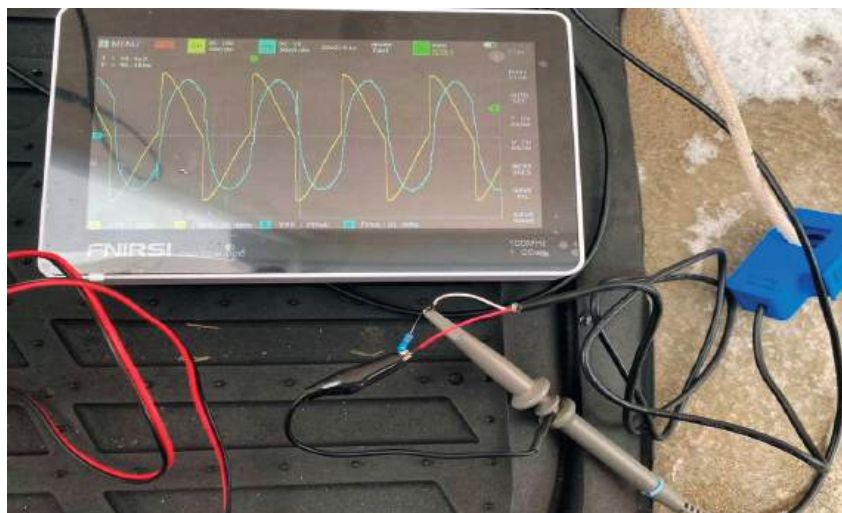


Рисунок 5. Показания осциллографа в режиме резонанса индукционной нагревательной системы

Figure 5. Oscilloscope readings in the resonance mode of the induction heating system

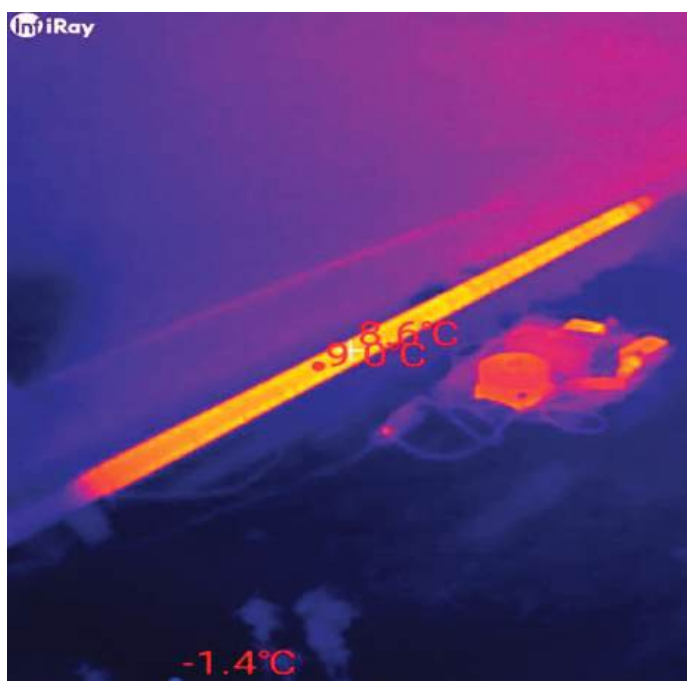


Рисунок 6. Термограмма участка трубопровода

Figure 6. Thermogram of the pipeline section

Выводы

На основании проведенного анализа традиционных методов обогрева нефти в различных технологических процессах можно сделать следующие выводы: используемые в настоящее время системы трубопроводов требуют значительных капитальных и эксплуатационных затрат на монтаж и обслуживание, обладая при этом низким КПД, их эксплуатация связана с пожароопасностью, невозможностью точного контроля температуры и ограниченными возможностями функционирования в неблагоприятных погодных условиях.

Электротермические методы, обладая всеми преимуществами традиционных методов, лишены их недостатков, что позволяет им демонстрировать: высокий КПД, быстрый и равномерный нагрев, гибкость в управлении процессом нагрева при отсутствии факторов взрыво- и пожароопасности.

В результате моделирования в программном пакете COMSOL и оценки равномерности прогрева при помощи экспериментальной индукционной нагревательной установки произведен анализ тепловых процессов и оценена температура на различных участках тру-

бопровода. В результате установлены следующие преимущества: равномерное распределение температуры по всей длине обогреваемого участка, что сводит к минимуму риск возникновения пере-

грева и спекания нефтепродуктов, а также высокая эффективность в управлении режимом обогрева, что позволяет точно настраивать параметры нагрева в зависимости от текущих условий.

Список источников

1. Конесев С.Г., Садиков М.Р., Хлюпин П.А. Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Всеросс. науч.- техн. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. С. 212-218.

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

3. Конесев С.Г. Установка высокочастотного обогрева трубопроводов // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: тез. докл. науч.-практ. конф. в рамках VI Конгресса нефтегазопромышленников России, 2005. С. 31-32.

4. 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.

5. 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>.

6. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Оценка эффективности теплового воздействия электротермических систем // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10, № 3. С. 92-95. EDN: UNNKXX.

7. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Экологичные нагревательные системы для объектов транспорта и хранения вязкой нефти // Безопасность жизнедеятельности, 2012. № 7. С. 43-47. EDN: PAOIJX.

8. Межгосударственный стандарт. Безопасность электротермического оборудования. Часть 1. Общие требования: ГОСТ IEC 60519-1-2011. М., 2011. 27 с.

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

10. Коннова Г.В. Оборудование транспорта и хранения нефти и газа: учеб. пособие для вузов.

Ростов н/Д.: Феникс, 2006. 128 с. ISBN 5-222-07871-X.

11. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергоатомиздат, 1988. 200 с.

References

1. Konesev S.G., Sadikov M.R., Khlyupin P.A. Analiz effektivnosti primeneniya nagrevatel'nykh sistem pri perekachke vyazkikh neftei [Analysis of the Effectiveness of Heating Systems for Pumping Viscous Oils]. *Sbornik nauchnykh trudov III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii»* [Collection of Scientific Papers of the III All-Russian Scientific and Technical Conference «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, USPTU Publ., 2011, pp. 212-218. [in Russian].

2. Basovskii V.F., Basko V.A., Brik N.A. *Ustroistva elektropitaniya elektronnoi apparatury* [Electronic Equipment Power Supply Devices]. Edited by V.F. Basovskiy. Kiev, Tekhnika Publ., 1980. 239 p. [in Russian].

3. Konesev S.G. Ustanovka vysokochastotnogo obogreva truboprovodov [Installation of High-Frequency Heating of Pipelines]. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefii, nefteproduktov i gaza» v ramkakh VI Kongressa neftegazopromyshlennikov Rossii* [Abstract of the Reports of the Scientific and Practical Conference «Problems and Methods of Ensuring the Reliability and Safety of Oil, Oil Products and Gas Transportation Systems» within the Framework of the VI Congress of Oil and Gas Industrialists of Russia]. 2005, pp. 31-32. [in Russian].

4. 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), pp. 75-82. EDN: UCUGOR. [in Russian].

5. *Pravila ustroistva elektroustanovok: vse deistvuyushchie razdely PUE-6 i PUE-7* [Electrical

Installation Rules: All Applicable 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].

6. 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].

7. Konesev S.G., Khlyupin P.A. Ekologichnye nagrevatel'nye sistemy dlya ob'ektov transporta i khraneniya vyazkoi nefiti [Eco-Friendly Heating Systems for Transportation and Storage Facilities of a Viscous Oil]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti — Safety of Life*, 2012, No. 7, pp. 43-47. EDN: PAOIJX. [in Russian].

8. *Mezhhgosudarstvennyi standart. Bezopasnost' elektrotermicheskogo oborudovaniya. Chast' 1.*

Obshchie trebovaniya: GOST IEC 60519-1-2011 [The Interstate Standard. Safety of Electrothermal Equipment. Part 1. General Requirements: GOST IEC 60519-1-2011]. Moscow, 2011. 27 p. [in Russian].

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

10. Konnova G.V. *Oborudovanie transporta i khraneniya nefiti i gaza: ucheb. posobie dlya vuzov* [Equipment for Oil and Gas Transportation and Storage: Textbook for Universities]. Rostov n/D., Feniks Publ., 2006. 128 p. ISBN 5-222-07871-X. [in Russian].

11. Kuvaldin A.B. *Induktsionnyi nagrev ferromagnitnoi stali* [Induction heating of Ferromagnetic Steel]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 200 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 13.03.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025; принята к публикации 30.04.2025.

The article was submitted 13.03.2025; approved after reviewing 27.03.2025; accepted for publication 30.04.2025.

Научная статья

УДК 621.317.311, 621.396.669

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-63-73

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОВЕРКИ СХЕМЫ КОНТРОЛЯ И ЗАЩИТЫ НАПРЯЖЕНИЯ

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

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

**Андрей Валерьевич Мухаметшин****Andrey V. Mukhametshin**

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

**Пётр Игоревич Васильев****Petr I. Vasiliev**

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

**Гульназ Ержановна Димукашева****Gulnaz E. Dimukasheva**

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

Актуальность

Российские компании, потеряв доступ к зарубежной технической поддержке, вынуждены самостоятельно разрабатывать алгоритмы проверки защит оборудования. В данной статье демонстрируется практический пример исследования и разработки алгоритма проверки защит (минимального и максимального напряжения) платы управления частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата. Этот пример показывает, как инженеры могут обеспечить безопасность эксплуатации оборудования при отсутствии заводской документации.

Ключевые слова

схема контроля, плата управления, защита, микросхема, компаратор, испытание

Цель исследования

Исследовать и разработать алгоритм проверки защиты минимального и максимального напряжений платы управления устройства автоматического регулирования на основе преобразовательно-трансформаторного оборудования для частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата зарубежного производства.

Методы исследования

Для работы схемы защиты минимального и максимального напряжений для секции шин проведен анализ для трех режимов работы: без нагрузки, с небольшой нагрузкой и с высокой нагрузкой. Описание каждого режима показывает, как компараторы реагируют на изменения напряжения в цепи токоограничивающих резисторов.

Результаты

Разработан алгоритм для проверки схемы контроля и защиты напряжения платы управления устройства автоматического регулирования, применяемого в частотно-регулируемом электроприводе насосных агрегатов с преобразовательно-трансформаторным оборудованием. Алгоритм анализирует логические уровни выходных сигналов компараторов, ответственных за разрешение пуска, останова и активацию защиты устройства. Предложенная методика позволяет оперативно диагностировать неисправности и обеспечивать стабильную работу критически важного оборудования, особенно в условиях ограниченной сервисной поддержки.

Для цитирования: Хазиева Р. Т., Мухаметшин А. В., Васильев П. И., Димукашева Г. Е. Разработка алгоритма проверки схемы контроля и защиты напряжения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 63-73. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-63-73>.

Original article

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR VERIFICATION OF VOLTAGE CONTROL AND PROTECTION CIRCUITS

Relevance

Russian companies, having lost access to foreign technical support, are forced to disassemble and develop algorithms for checking equipment protections on their own. This article demonstrates a practical example of research and development of an algorithm for checking protections (minimum and maximum voltage) of the control board of a variable frequency drive of a pump unit. This example shows how engineers can ensure safe operation of equipment in the absence of factory documentation.

Aim of research

To investigate and develop an algorithm for checking the minimum and maximum voltage protection of the control board of the automatic regulation device on the basis of converter-transformer equipment for the frequency-controlled electric drive of the pump unit of foreign production.

Research methods

For the operation of the minimum and maximum voltage protection circuit for the busbar section, analyses have been carried out for three modes of operation: no load, light load and high load. The description of each mode shows how the comparators react to voltage changes in the current limiting resistor circuit.

Keywords

control circuit, control board, protection, microcircuit, comparator, test

Results

An algorithm has been developed to test the voltage monitoring and protection circuit of the control board of the automatic regulation device used in the frequency-controlled electric drive of pump units with converter-transformer equipment. The algorithm analyses the logic levels of output signals of comparators responsible for the start, stop and protection activation of the device. The proposed methodology allows to promptly diagnose faults and ensure stable operation of critical equipment, especially under conditions of limited service support.

For citation: Khazieva R. T., Mukhametshin A. V., Vasiliev P. I., Dimukasheva G. Ye. Razrabotka algoritma proverki skhemy kontrolya i zashchity napryazheniya [Development of an Algorithm for Verification of Voltage Control and Protection Circuits]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 63-73 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-63-73>.

Введение

В связи с уходом с рынка многих зарубежных брендов российские компании столкнулись с проблемой технической и гарантийной поддержки эксплуатируемого оборудования. При проверке работы оборудования часто требуется иметь точные методические и заводские инструкции для правильного функционирования защит оборудования, но зачастую в современных реалиях инженерно-техническому персоналу приходится на месте исследовать схемотехническое решение, разбирать логику его работы и при необходимости разрабатывать алгоритм проверки защит, заложенный производителем. При этом нужно понимать, что это огромная работа, направленная, прежде всего, на обеспечение безопасности эксплуатации оборудования.

Основная задача данной статьи — показать на практическом примере возможность исследования и разработки алгоритма проверки защиты минимального и максимального напряжений платы управления устройства автоматического регулирования на основе преобразовательно-трансформаторного оборудования для частотно-регулируемого электропривода (ПЧТЭ) насосного агрегата зарубежного производства [1].

Материалы и методы

На рисунке 1 изображена часть платы зарубежного производителя, предоставленная для исследования компанией ООО НИЦ «Резонансные системы» [2].

Схема на рисунке 2 отвечает за контроль выходного сигнала минимального ($U_{\min}$) и максимального ($U_{\max}$) напряжений. По измеренным значениям напряжений $U_{\min}$ и $U_{\max}$ сигналы информируют контроллер TMS320LF2407APGEA о состоянии входного напряжения на секции шин. Контроль выходного напряжения выполнен на двух компараторах типа LM239D, которые физически размещены в одном корпусе, на схеме они имеют обозначение D20.1 и D20.2. Компаратор D20.1 формирует сигнал $U_{\min}$, а компаратор D20.2 формирует сигнал $U_{\max}$.

Питание компараторы D20.1 и D20.2 получают от конвертора DA24 типа DCP010512, который формирует два напряжения: вывод 6 плюс 12,7 В и вывод 7 минус 15,3 В относительно вывода 5, который в схеме имеет обозначение 0REF. Относительно вывода 0REF формируется опорное напряжение на микросхеме VD65 типа TL431, равное плюс 4,86 В, которое подается на входы компараторов D20.1, вывод 6 и D20.2, вывод 5, при чем — V_{out} (минус 15,3 В) соединён с землей питания схемы.

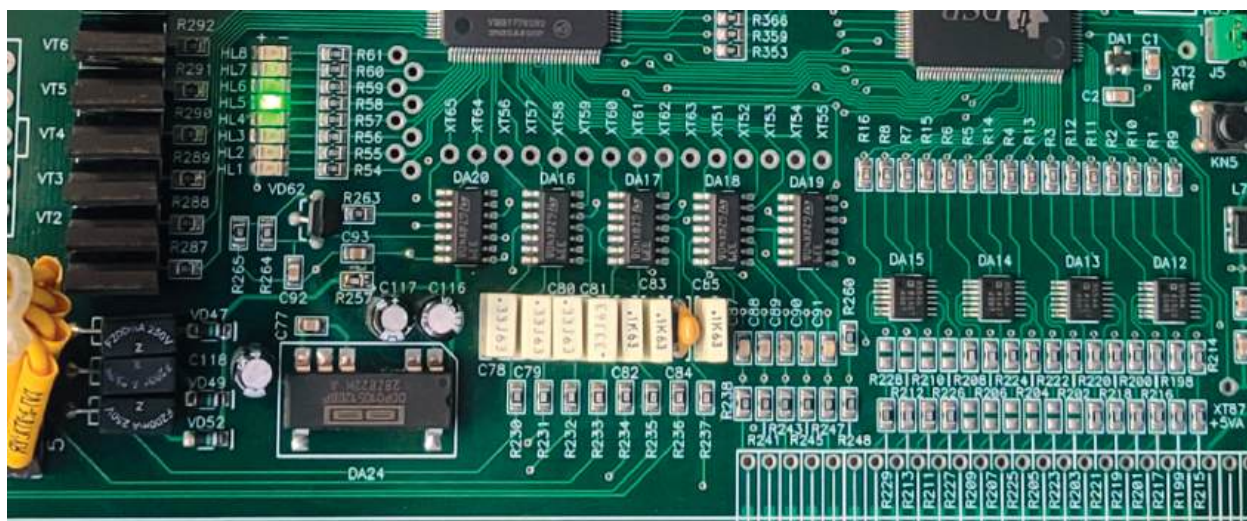
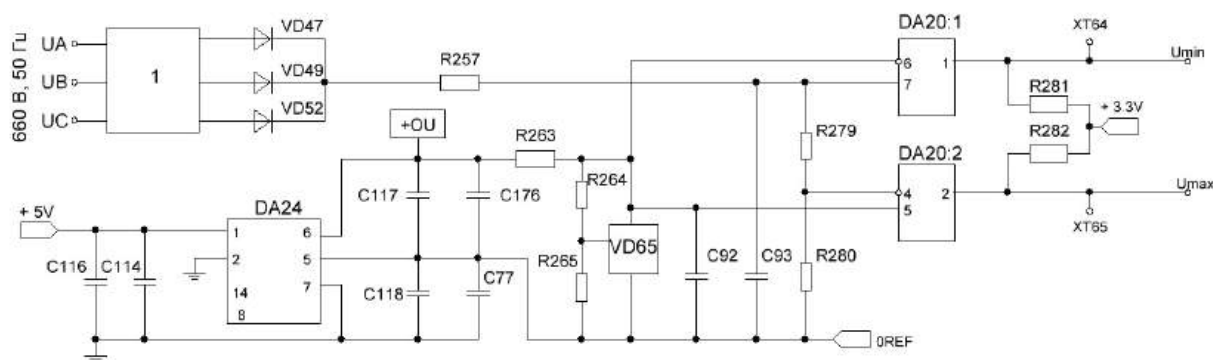


Рисунок 1. Плата управления и защиты

Figure 1. Control and protection board



1 — трехфазный трансформатор напряжения; 2 — VD47, VD49, VD52 — выпрямительные диоды; R257, R263, R264, R265, R281, R282 — токоограничивающие резисторы; DA24 — DC-DC конвертор типа DCP010212; VD65 — стабилизатор напряжения типа TL431; DA20:1, DA20:2 — компараторы типа LM239D

1 — three-phase voltage transformer; 2 — VD47, VD49, VD52 — rectifier diodes; R257, R263, R264, R265, R281, R282 — current-limiting resistors; DA24 — DC-DC converter type DCP010212; VD65 — voltage stabilizer type TL431; DA20:1, DA20:2 — comparators type LM239D

Рисунок 2. Схема защиты минимального и максимального напряжений

Figure 2. Minimum and maximum voltage protection scheme

Питание компараторы DA20.1 и DA20.2 получают с выхода конвертора DA24, +Vout, пин 6 и +Vout.

При анализе защит минимального и максимального режимов работы рассмотрим режимы работы устройства управления комплектного на основе автоном-

ных инверторов для частотно регулируемых электроприводов типа ПЧТЭ, которое представляет собой двухзвенный преобразователь, включенный по двухтрансформаторной схеме для управления асинхронным электродвигателем с номинальным напряжением 6/10 кВ.

Обобщенная структурная схема электропривода на базе ПЧТЭ представлена на рисунке 3.

Режимы работы:

— *режим работы № 1*: данный режим характеризуется отсутствием сетевого напряжения 6/10 кВ на входе входного трансформатора (вакуумный выключатель в закрытом распределительном устройстве находится в положении «отключен», а напряжение на выходе выходного трансформатора отсутствует);

— *режим работы № 2*: данный режим характеризуется наличием сетевого напряжения 6/10 кВ на входе входного трансформатора (вакуумный выключатель в закрытом распределительном устройстве находится в положении «включен», а напряжение на выходе выходного трансформатора 660 В);

— *режим работы № 3*: данный режим характеризуется наличием сетевого напряжения 6/10 кВ на входе входного трансформатора (вакуумный выключатель в закрытом распределительном устройстве находится в положении

«включен», а напряжение на выходе выходного трансформатора повышается до уставки срабатывания защиты) [3–5].

Режим работы № 1. После подачи питания в схему управления и защиты на источнике опорного напряжения формируется уровень (+) 4,86 В, на входах компараторов D20.1 и D20.2, пины 6 и 7 относительно 0REF. В цепи контроля напряжения R_{257} , R_{279} , R_{280} ток не протекает (на секции шин напряжение отсутствует), и на сигнальных входах компараторов (пины 4 и 7) установлен уровень 0REF.

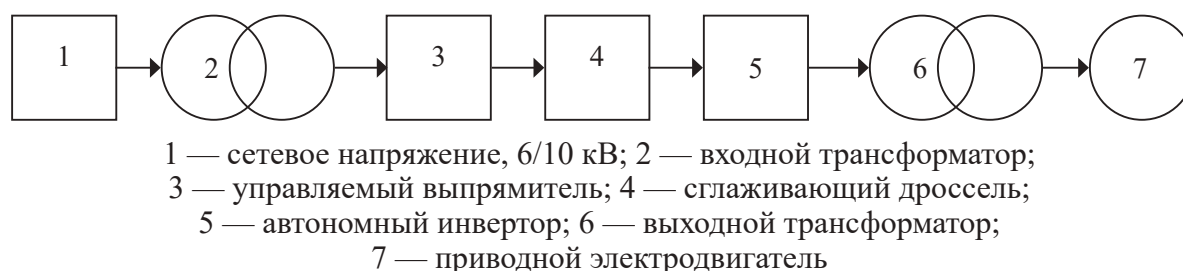
Логические уровни сигналов в состоянии № 1 представлены в таблице 1.

По результатам работы компараторов D20.1 и D20.2 в состоянии № 1 получаем:

— компаратор D20.1 имеет на своем выходе вывод «1» = логический «0»;

— компаратор D20.2 имеет на своем выходе вывод «2» = логическая «1».

Осциллограммы выходного состояния компараторов DA20:1 и DA20:2 в состоянии № 1 представлены на рисунке 4.



1 — network voltage, 6/10 kV; 2 — input transformer; 3 — controlled rectifier;
4 — smoothing choke; 5 — autonomous inverter; 6 — output transformer;
7 — drive electric motor

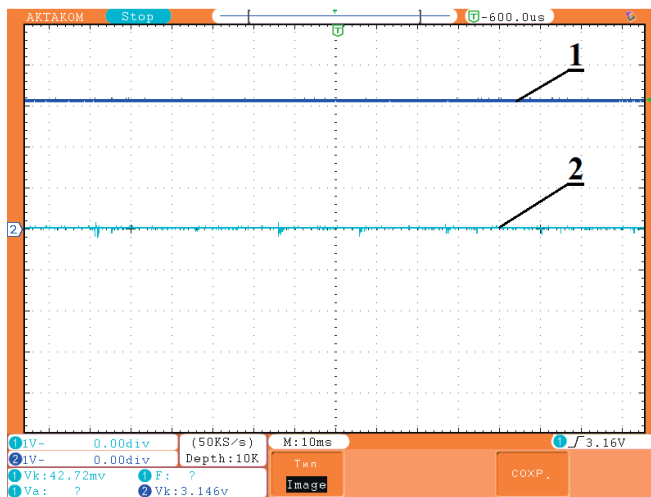
Рисунок 3. Структурная схема электропривода на базе ПЧТЭ

Figure 3. Structural diagram of an electric drive based on CETD

Таблица 1. Логические уровни сигналов в состоянии № 1

Table 1. Logic levels of signals in state No. 1

№	Наименование	Контрольный пин	Состояние, логический уровень
1	Компаратор DA20:1	XT840V — XT64	0
2	Компаратор DA20:2	XT840V — XT65	1



1 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:2;
2 — логический «0» на выходе компаратора DA20:1

1 — logical «1» at the output of the comparator DA20:2;
2 — logical «0» at the output of the comparator DA20:1

Рисунок 4. Осциллограмма выходных состояний компараторов DA20:1 и DA20:2. Состояние № 1

Figure 4. Oscillogram of output states of comparators DA20:1 and DA20:2. Condition No. 1

Режим работы № 2. Рассмотрим состояние № 2, при котором напряжение переменного тока 660 В, 50 Гц подано на секцию шин. В цепи токоограничивающих резисторов R_{257} , R_{279} , R_{280} начинает течь ток I , и достигнет в цепи 42 мкА:

$$I = \frac{U}{R_{257} + R_{279} + R_{280}} = \frac{8,4}{30 \cdot 10^3 + 120 \cdot 10^3 + 51 \cdot 10^3} = 42 \cdot 10^{-6} \text{ A.} \quad (1)$$

В узле токоограничивающих резисторов R_{257} - R_{279} сформируется уровень напряжения плюс 5 В, и компаратор D20.1 в свою очередь изменит свое состояние на выходе пина «1» равный логическому «0».

Результаты экспериментов проверки с помощью генератора сигналов специальной формы представлены в таблице 2.

Результаты:

- компаратор D20.1 имеет на своем выходе вывод «1» логическую 1;
- компаратор D20.2 имеет на своем выходе вывод «2» логическую 1.

Осциллограммы выходного состояния компараторов DA20:1 и DA20:2 в состоянии № 2 представлен на рисунке 5.

Режим работы № 3. Рассмотрим состояние № 3, при котором будем увеличивать напряжение в цепи контроля напряжения R_{257} , R_{279} , R_{280} , ток достигает значения 100 мкА, в узле R_{279} - R_{280} , сформируется напряжение плюс 5 В и компаратор D20.2 изменит свое состояние на выходе — вывод «2» равно 0 В. Мы достигли максимально допустимого напряжения $U_{\max}$, равного нулю:

$$I = \frac{U}{R_{257} + R_{279} + R_{280}} = \frac{20,1}{30 \cdot 10^3 + 120 \cdot 10^3 + 51 \cdot 10^3} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ A.} \quad (2)$$

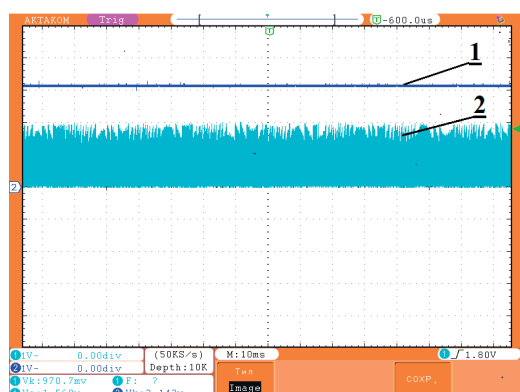
Согласно (2), при токе 100 мкА на входе компаратора D20.2 установится напряжение:

$$U = (R_{257} + R_{279} + R_{280}) \cdot I = 201 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 20,1 \text{ В.} \quad (3)$$

В паспорте производителя компонента типа LM239 установлено максимально допустимое напряжение на входе 36 В, а расчетное значение напряжение при токе 100 мкА установится 20,1 В, что соответствует правильной работе схемы [6–9].

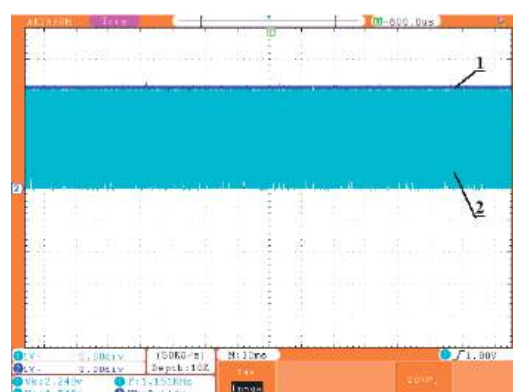
Таблица 2. Логические уровни сигналов в состоянии № 2**Table 2.** Logic levels of signals in state No. 2

№	Наименование	Контрольный пин	Зона работы DA от генератора сигнала		Логическое состояние
			начало	окончание	
1	Компаратор DA20:1	XT840V — XT64	5,7	6,1	1
2	Компаратор DA20:2	XT840V — XT65	—	—	0



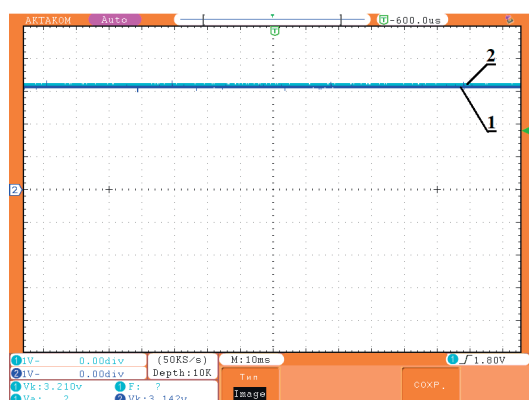
1 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:2; 2 — начало срабатки $U_{\min}$ на выходе компаратора DA20:1 при напряжении на генераторе 5,7 В

1 — logical «1» at the output of the comparator DA20:2;
2 — start of $U_{\min}$ operation at the output of the comparator DA20:1 at a voltage on the generator of 5.7 V



1 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:2; 2 — зона срабатки $U_{\min}$ на выходе компаратора DA20:1 при напряжении на генераторе 6,0 В

1 — logical «1» at the output of the comparator DA20:2; 2 — response zone $U_{\min}$ at the output of the comparator DA20:1 at a voltage on the generator of 6.0 V



1 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:2;
2 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:1, $U_{\min}$ при напряжении на генераторе 6,1 В

1 — logical «1» at the output of the comparator DA20:2;
2 — logical «1» at the output of the comparator DA20:1, $U_{\min}$ at a voltage on the generator of 6.1 V

Рисунок 5. Осциллограмма выходных состояния компараторов DA20:1 и DA20:2. Состояние № 2

Figure 5. Oscillogram of output states of comparators DA20:1 and DA20:2. Condition No. 2

Логические уровни сигналов в состоянии № 3 представлены в таблице 3.

Результаты:

— компаратор D20.1 имеет на своем выходе вывод «1» логическую 1;

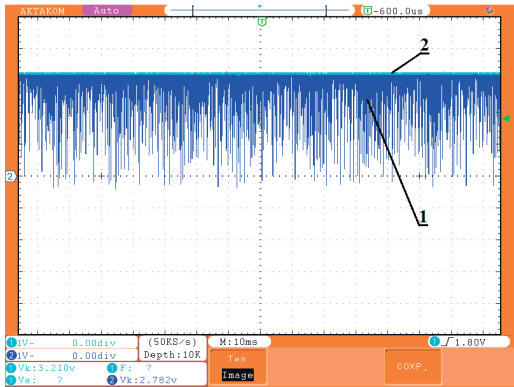
— компаратор D20.2 имеет на своем выходе вывод «2» логический 0.

Осциллограммы выходного состояния компараторов DA20:1 и DA20:2 в состоянии № 3 представлены на рисунке 6.

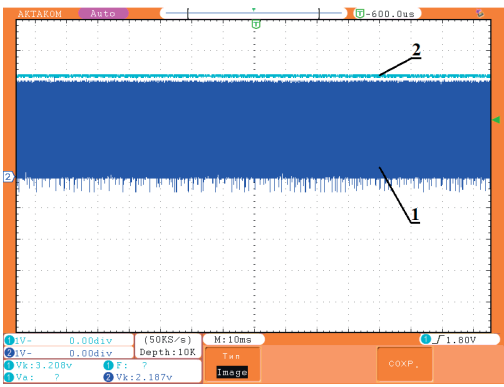
Таблица 3. Логические уровни сигналов в состоянии № 3

Table 3. Logic levels of signals in state No. 3

№	Наименование	Контрольный пин	Зона работы DA от генератора сигнала		Логическое состояние
			начало	окончание	
1	Компаратор DA20:1	XT840V — XT64	5,7	6,1	1
2	Компаратор DA20:2	XT840V — XT65	18,8	20,2	0



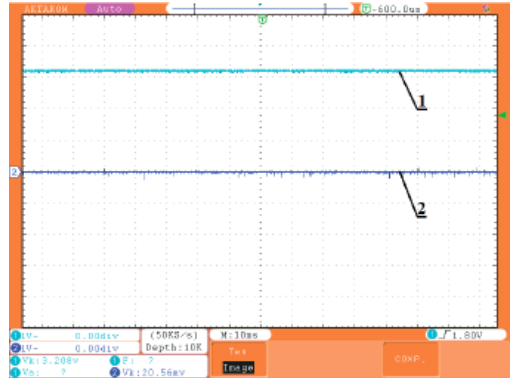
1 — начало срабатывания защиты на выходе компаратора DA20:2 при напряжении на генераторе 17,8 В;
2 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:1



1 — состояние на выходе компаратора DA20:2 при напряжении на генераторе 18,9 В;
2 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:1

1 — start of protection operation at the output of the DA20:2 comparator at a generator voltage of 17.8 V;
2 — logical «1» at the output of the DA20:1 comparator

1 — state at the output of the comparator DA20:2 at a generator voltage of 18.9 V;
2 — logical «1» at the output of the comparator DA20:1



1 — логическая «1» на выходе компаратора DA20:2;
2 — логический «0» на выходе компаратора DA20:1, U_{max} при напряжении на генераторе 20,2 В

1 — logical «1» at the output of the comparator DA20:2;
2 — logical «0» at the output of the comparator DA20:1, U_{max} at a voltage on the generator of 20.2 V

Рисунок 6. Осциллограмма выходных состояния компараторов DA20:1 и DA20:2. Состояние № 3

Figure 6. Oscillogram of output states of comparators DA20:1 and DA20:2. Condition No. 3

В данной статье на практическом примере рассмотрен процесс исследования и разработки алгоритма проверки защит минимального и максимального напряжений для платы управления частотно-регулируемого привода насосного агрегата (рисунок 7).

В ходе работы проанализированы схемотехнические решения, определены

ключевые узлы, отвечающие за контроль напряжения, и разработана методика тестирования защитных функций. Этот подход позволяет не только восстановить работоспособность оборудования, но и адаптировать его под текущие эксплуатационные требования без зависимости от оригинального производителя [10, 11].

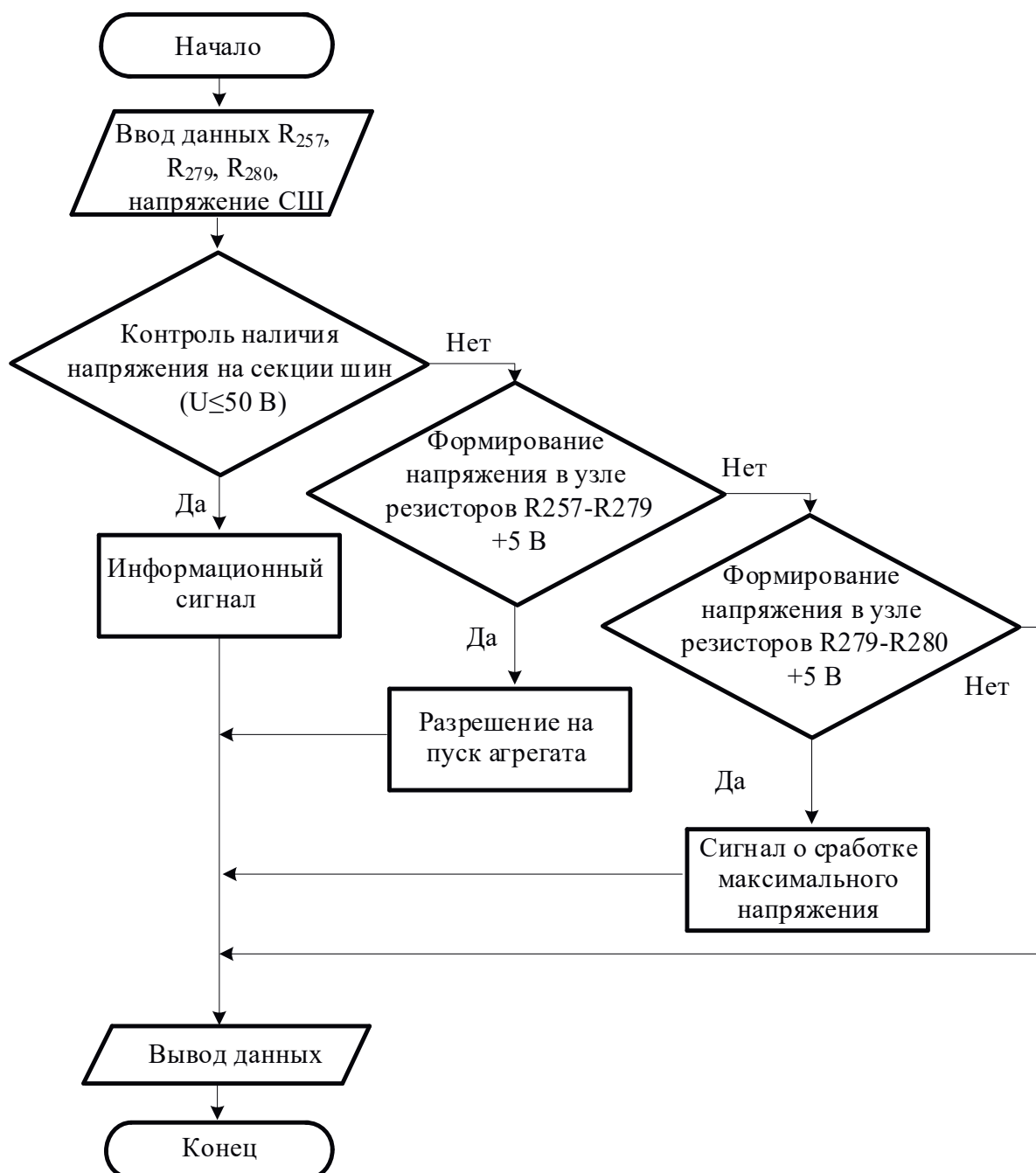


Рисунок 7. Алгоритм проверки защиты

Figure 7. Algorithm of protection verification

Выводы

Разработан алгоритм, позволяющий произвести проверку схемы контроля и защиты напряжения платы управления устройства автоматического регулирования на основе преобразовательно-трансформаторного оборудования для частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата. Данный алгоритм основывается на проверке логических уровней выходных сигналов компараторов для реализации разрешения пуска, останова и защиты устройства автоматического регулирования на основе преобразовательно-трансформаторного оборудова-

ования для частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата.

Предложенная методика является важным инструментом для обеспечения бесперебойной работы критически важного оборудования в условиях ограниченного доступа к сервисной поддержке и может быть применена для аналогичного оборудования, что существенно сокращает время диагностики и повышает надежность эксплуатации.

Дальнейшее развитие подобных подходов позволит снизить зависимость от зарубежных поставщиков и повысить уровень технологической самостоятельности российских предприятий.

Список источников

1. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Development and Research of the Current Measurement Scheme for Insulation Tests with High Voltage Industrial Frequency // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021. pp. 919-924. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446380. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9446380/authors#authors>.
2. Хазиева Р.Т., Музаметшин А.В. Разработка и исследование схемы измерения тока утечки при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 23(4). С. 145-155. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-4-145-155>.
3. Мартынов Б.А., Хазиева Р.Т., Музаметшин А.В. Защита схемы измерения тока резонансной испытательной установки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 2, т. 17, С.26-40. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-26-40. EDN: RAHWAV.
4. Хазиева Р.Т., Павлова З.Х., Сердюк А.А., Мухаметшин А.В. Разработка и исследование датчиков тока для защиты источника регулируемого напряжения резонансной испытательной установки // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1 (58). С. 76-83. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-76-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-76-83).
5. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Development and Research of the Current Measurement Circuit Protection of a Resonant Test Device // 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), IEEE, 16–18 March 2023. М.: Изд-во МЭИ, 2023. С. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086882.
6. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Investigation of Current Sensors for Protection of the Regulated Voltage Source of the Resonant Test Device // Proceedings of 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2023. 2023. P. 141-145. INSPEC Accession Number: 22962616. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086882.
7. Программа для ЭВМ 2023668257 РФ. Программа управления резонансной испытательной установкой / А.А. Сердюк, А.В. Мухаметшин, Б.А. Мартынов. 2023666749; Заявлено 10.08.2023; Оpubл. 24.08.2023. Бюл. 9.
8. Пат. 2662952 РФ, МПК G 01 R 31/14. Установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин, А.А. Конев, И.З. Гайнутдинов. 2017130067; Заявлено 24.08.2017; Оpubл. 31.07.2018. Бюл. 22.
9. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 49-55. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.
10. Пат. 156457 РФ, МПК G 01 R 31/14. Установка для испытания средств защиты / А.В. Мухаметшин, Е.В. Мухаметшин. 201524718, Заявлено 23.06.2015; Оpubл. 10.11.2015. Бюл. 31.
11. Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Горшенин А.И. Исследование и разработка схемы измерения

ния переменного тока при испытании изоляции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. № 4, Т. 16. С. 46-55. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-46-55. EDN: FPJDMS.

References

1. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Development and Research of the Current Measurement Scheme for Insulation Tests with High Voltage Industrial Frequency. *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2021, pp. 919-924. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446380. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9446380/authors#authors>.
2. Khazieva R.T., Muzametshin A.V. Razrabotka i issledovanie skhemy izmereniya toka utechki pri ispytanii izolyatsii povyshennym vypryamlyennym napryazheniem [Development and Research of the Circuit for Measuring the Leakage Current When Testing the Insulation with the Higher Rectified Voltage]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021. № 23(4). S. 145-155. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-4-145-155>. [in Russian].
3. Martynov B.A., Khazieva R.T., Muzametshin A.V. Zashchita skhemy izmereniya toka rezonansnoi ispytatel'noi ustanovki [Protection of the Current Measuring Circuit of a Resonance Testing Installation]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 2, Vol. 17, pp. 26-40. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-26-40. EDN: RAHWAV. [in Russian].
4. Khazieva R.T., Pavlova Z.Kh., Serdyuk A.A., Mukhametshin A.V. Razrabotka i issledovanie datchikov toka dlya zashchity istochnika reguliruemogo napryazheniya rezonansnoi ispytatel'noi ustanovki [Development and Research of Current Sensors to Protect the Supply of Adjustable Voltage of a Resonant Test Device]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2023, No. 1 (58), pp. 76-83. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-76-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-76-83). [in Russian].
5. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Development and Research of the Current Measurement Circuit Protection of a Resonant Test Device. *5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), IEEE*, 16–18 March 2023. Moscow, MEI Publ., 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086882.
6. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Investigation of Current Sensors for Protection of the Regulated Voltage Source of the Resonant Test Device. *Proceedings of 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2023*. 2023, pp. 141-145. INSPEC Accession Number: 22962616. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086882. [in Russian].
7. Serdyuk A.A., Mukhametshin A.V., Martynov B.A. Programma dlya EVM *Programma upravleniya rezonansnoi ispytatel'noi ustanovki* [Control Programme for the Resonant Test Rig]. Program for EVM, No. 2023668257, 2023. [in Russian].
8. Konesev S.G., Mukhametshin A.V., Konev A.A., Gainutdinov I.Z. *Ustanovka dlya ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem* [Installation for Testing the insulation of Electrical Equipment with Increased Voltage]. Patent RF, No. 2662952, 2018. [in Russian].
9. Konesev S.G., Khazieva R.T. Analiz stabilizatsionnykh svoystv induktivno-emkostnykh preobrazovatelei pri razlichnykh sposobakh podklyucheniya gibridnykh elektromagnitnykh elementov [Analysis of Stabilisation Properties of Inductive-Capacitive Converters at Different Ways of Connection of Hybrid Electromagnetic Elements]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2017, No. 1 (34), pp. 49-55. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55. [in Russian].
10. Mukhametshin A.V., Mukhametshin E.V. *Ustanovka dlya ispytaniya sredstv zashchity* [Protective Equipment Test Rig]. Patent RF, No. 156457, 2015. [in Russian].
11. Khazieva R.T., Mukhametshin A.V., Gorshenin A.I. Issledovanie i razrabotka skhemy izmereniya peremennogo toka pri ispytanii izolyatsii [Research and Development of the Accurate Measurement Scheme for Insulation Tests]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2020, No. 4, Vol. 16, pp. 46-55. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-4-46-55. EDN: FPJDMS. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2025; принята к публикации 30.04.2025.

The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 24.04.2025; accepted for publication 30.04.2025.

Научная статья

УДК 622.276

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-74-87

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ УСТАНОВОК ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ



Антон Николаевич Яшин

Anton N. Yashin

старший преподаватель кафедры

«Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия



Марат Ильгизович Хакимьянов

Marat I. Khakimyanov

доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Актуальность

Скважинная механизированная добыча является наиболее энергоемким из всех технологических процессов нефтедобычи. Это объясняется тем, что количество скважин велико, они рассредоточены на больших расстояниях, многие из них работают в неэффективных режимах со значительными непроизводительными потерями.

Электроприводы штанговых глубинных насосов работают в недогруженном режиме с циклически изменяющейся нагрузкой, что отрицательно влияет как на электрическую сеть, так и на сам двигатель.

Перспективным направлением является использование вентильных двигателей в приводах установок штанговых глубинных насосов (УШГН). Вентильные двигатели (ВД) обладают более высокими КПД и перегрузочной способностью, чем асинхронные. Это позволит увеличить коэффициент загрузки электродвигателей при меньшей установленной мощности. Однако широкое использование ВД сдерживается их высокой стоимостью, обусловленной использованием дорогостоящих материалов в конструкции ротора и достаточно сложной системой управления.

Сам процесс подбора и расчета вентильного двигателя для привода установки штангового глубинного насоса достаточно сложный и дорогой, в связи с чем в данной статье предложена методика проектирования электроприводов УШГН на базе ВД, отличающаяся возможностью имитации основных рабочих состояний, которая позволяет сократить время и затраты на выполнение расчетов и проектных работ

Ключевые слова

штанговый глубинный насос, вентильный двигатель, электропривод, математическая модель

при модернизации электроприводов УШГН с целью повышения эффективности.

Цель исследования

Усовершенствовать методику проектирования вентильных электроприводов установок штанговых глубинных насосов с учетом характеристик приводного механизма установок и конструктивных особенностей вентильных двигателей.

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 усовершенствованная методика проектирования электроприводов установок штанговых глубинных насосов на базе вентильных электродвигателей, которая учитывает характеристики приводного механизма установок и конструктивные особенности вентильных двигателей.

Для цитирования: Яшин А. Н., Хакимьянов М. И. Исследование эффективности применения вентильных двигателей в электроприводах установок штанговых глубинных насосов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 74–87. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-74-87>.

Original article

STUDY OF THE EFFICIENCY OF USING VALVE MOTORS IN ELECTRIC DRIVES OF SUCKER-ROD PUMPING UNITS

Relevance

Well mechanized production is the most energy-intensive of all oil production processes. This is explained by the fact that the number of wells is large, they are scattered over large distances, many of them operate in inefficient modes with significant unproductive losses.

Electric drives of sucker-rod deep-well pumps operate in an underloaded mode with a cyclically changing load, which negatively affects both the electrical network and the motor itself.

A promising direction is the use of valve motors in drives of sucker-rod deep-well pump units. Valve motors have higher efficiency and overload capacity than asynchronous ones. This will increase the load factor of electric motors with a lower installed capacity. However, the widespread use of valve motors is constrained by their high cost, due to the use of expensive materials in the rotor design and a fairly complex control system. The process of selecting and calculating a valve motor for driving a rod pump unit is quite complex and expensive, and therefore this article proposes a method for designing electric drives for rod pump units based on a valve motor, which is distinguished by the ability to simulate the main operating conditions, which allows reducing the time and costs of performing calculations and design work when upgrading electric drives for rod pump units in order to improve efficiency.

Aim of research

To improve the design methodology for valve electric drives of sucker rod deep-well pump units, taking into account the characteristics of the drive mechanism of the units and the design features of the valve motors.

Keywords

sucker rod pump, valve motor, electric drive, mathematical model

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

An improved methodology for designing electric drives for sucker rod pumps based on valve electric motors has been developed, which takes into account the characteristics of the drive mechanism of the units and the design features of the valve motors.

For citation: Yashin A. N., Khakimyanov M. I. Issledovaniye effektivnosti primeneniya ventil'nykh dvigateley v elektroprivodakh ustanovok shtangovykh glubinnyykh nasosov [Study of the Efficiency of Using Valve Motors in Electric Drives of Sucker-Rod Pumping Units]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 74–87 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-74-87>.

Скважинная механизированная добыча является наиболее энергоемким из всех технологических процессов нефтедобычи. Это объясняется тем, что количество скважин велико, они рассредоточены на больших расстояниях, многие из них работают в неэффективных режимах со значительными непроизводительными потерями [1].

Электроприводы штанговых глубинных насосов работают в недогруженном режиме с циклически изменяющейся нагрузкой, что отрицательно влияет как на электрическую сеть, так и на сам двигатель.

Перспективным направлением является использование в приводах установок штанговых глубинных насосов (УШГН). Вентильные двигатели (ВД) обладают более высокими КПД и перегрузочной способностью, чем асинхронные. Это позволит увеличить коэффициент загрузки электродвигателей при меньшей установленной мощности. Однако широкое использование ВД сдерживается их высокой стоимостью, обусловленной использованием дорогостоящих материалов в конструкции ротора и достаточно сложной системой управления [2].

Установки штанговых глубинных насосов применяются для эксплуатации малodeбитных скважин малых и средних

глубин. Существенным недостатком УШГН с асинхронным двигателем и клиноременной передачей является невысокий КПД системы «двигатель — клиноременная передача — редуктор», невысокая управляемость, перегрев при отклонении частоты вращения от номинального значения и риск преждевременного отказа.

Вентильный электропривод УШГН представляет собой привод без клиноременной передачи, состоящий из вентильного двигателя, ротор которого установлен на первичном валу редуктора, а статор механически прикреплен к его корпусу (рисунок 1). Однако такие ВД еще находятся на этапе опытной эксплуатации и не получили широкого распространения. Причинами этого является отсутствие доступных методик для подбора самого ВД к каждой конкретной скважине, а также алгоритмов управления ВД УШГН.

Вентильный электродвигатель не является независимым устройством, так как его работа невозможна без полупроводникового коммутатора и системы управления в отличие от асинхронных электродвигателей, которые могут функционировать как с преобразователем частоты, так и без него. Вентильные приводы представляют собой электромеханические преобразователи, сочетая



Рисунок 1. Вентильный двигатель для установки штангового глубинного насоса [3]

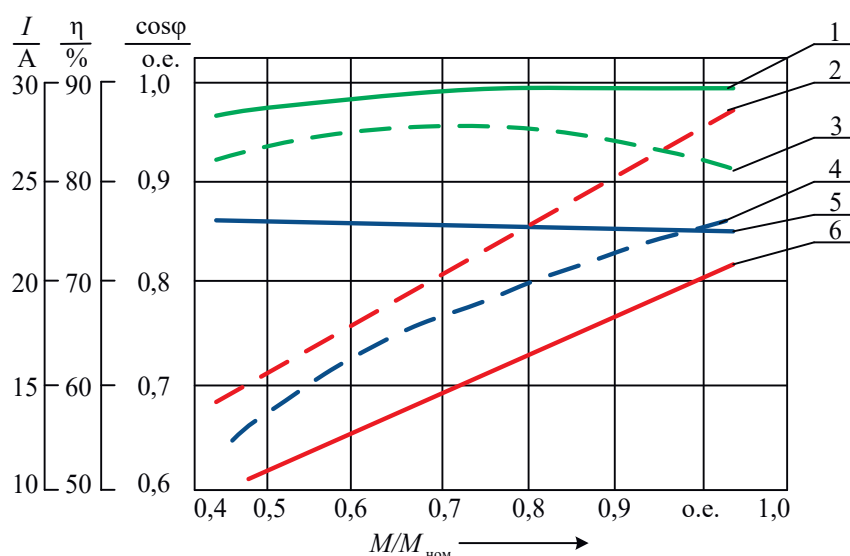
Figure 1. Valve motor for sucker rod pump installation [3]

характеристики как электрической машины, так и интегрированной системы регулируемого электропривода [4]. Как и любой электродвигатель, он преобра-

зует электрическую энергию, получаемую от питающей сети, в механическую энергию на выходе. Благодаря своей функции регулируемого электропривода вентильный электродвигатель позволяет эффективно управлять этим процессом в зависимости от специфики нагрузки: можно регулировать частоту вращения, крутящий момент и мощность, что значительно расширяет технологические возможности при использовании УШГН.

В ВД мощность не расходуется на передачу энергии ротору, и в отличие от асинхронных двигателей нет потерь в короткозамкнутой обмотке ротора. В связи с этим КПД ВД значительно выше, чем АД (рисунок 2), а значения рабочих токов холостого хода — значительно ниже.

К недостаткам вентильных двигателей можно отнести высокую стоимость двигателя, обусловленную использованием дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора и относи-



1 — КПД вентильного двигателя; 2 — рабочий ток АД; 3 — КПД асинхронного двигателя; 4 — коэффициент мощности АД; 5 — коэффициент мощности ВД; 6 — рабочий ток ВД

1 — efficiency of the valve motor; 2 — operating current of the asynchronous motor;
3 — efficiency of the asynchronous motor; 4 — power factor of the asynchronous motor;
5 — power factor of the valve motor; 6 — operating current of the valve motor

Рисунок 2. Рабочие характеристики двигателей

Figure 2. Engine performance characteristics

тельно сложные структуру двигателя и управление им [5].

Известны несколько методик расчета ВД для приводов различного назначения [6–8]. Однако привод УШГН имеет ряд конструктивных особенностей, которые существенно влияют на характер нагрузки, а сам ВД для УШГН имеет малую осевую длину и большой диаметр. В связи с этими факторами необходимо усовершенствовать методику проектирования вентильного привода для УШГН.

Предлагаемое решение представляет собой привод без клиноременной передачи для установок штанговых насосов, состоящий из вентильного двигателя, ротор которого соединен с первичным валом редуктора, а статор крепится к его корпусу (рисунок 3). Для повышения качества управления ВД в состав системы электропривода вводятся датчик положения кривошипа и датчик положения ротора ВД, что позволяет увеличить эффективность работы электропривода.

Предлагается рассмотреть возможный эффект при замене асинхронного двига-

теля на вентильный двигатель. В качестве исследуемого объекта берется УШГН, оборудованная асинхронным двигателем марки 5А225М6, технические параметры которого представлены в таблице 1.

При исключении клиноременной передачи, когда ВД устанавливается на редуктор станка-качалки, следует учитывать более высокую кратковременную перегрузочную способность. Руководствуясь техническими условиями, для вентильного двигателя кратность максимального момента допускается не менее пятикратной от длительно допустимого момента или номинального $M_{\text{ном.}}$.

Таким образом, при замене АД вентильный двигатель должен обеспечивать длительно допустимый момент $M = 180 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Расчет параметров вентильного двигателя проводится по методике, описанной в [9], при этом учитываются характеристики приводного механизма и конструктивные особенности ВД.

Диаметр расточки статора ВД [10]:

$$D_i = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{\text{ном.}}}{\pi \cdot a_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{\text{об.}} \cdot A \cdot l_{\delta} \cdot B_{\text{ном.}}}}, \quad (1)$$

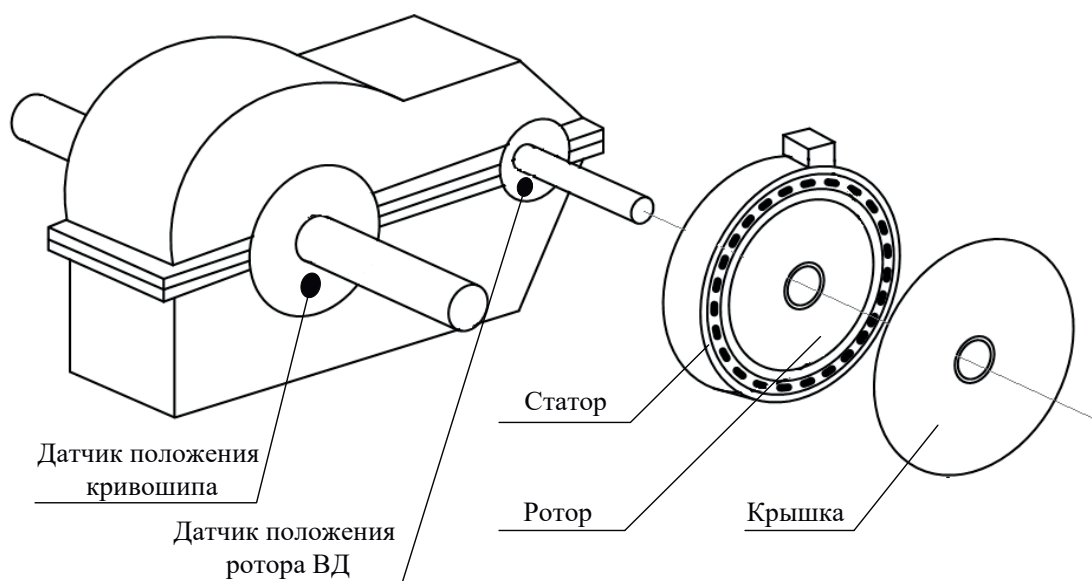


Рисунок 3. Вентильный двигатель для установки штангового глубинного насоса

Figure 3. Valve motor for sucker rod pump installation

Таблица 1. Паспортные данные АД марки 5А225М6**Table 1.** Passport data of asynchronous motor brand 5A225M6

Наименование и обозначение	Значение
Номинальная мощность $P_{\text{ном.}}$, кВт	37
Номинальное напряжение $U_{\text{ном.}}$, В	380
Номинальный ток $I_{\text{ном.}}$, А	73,1
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном.}}$, об/мин	980
Номинальный момент, Н·м	360
Кратность максимального момента $M_{\text{max}}/M_{\text{ном.}}$, о.е.	2,5
Коэффициент мощности $\cos \varphi$, о.е.	0,84
Коэффициент полезного действия η , о.е.	0,915

где $M_{\text{ном.}}$ — номинальный момент ЭД;

a_{δ} — коэффициент полюсного перекрытия;

k_B — коэффициент формы поля;

$k_{\text{об.}}$ — обмоточный коэффициент;

A — электромагнитная нагрузка;

l_{δ} — активная длина магнитопровода;

$B_{\delta\text{ном.}}$ — максимальная индукция магнитного поля в воздушном зазоре при номинальной нагрузке.

Электродвижущая сила фазы обмотки статора ВД описывается выражением [10]:

$$E_{1\phi} = 4 \cdot k_B \cdot k_{\text{об.}} \cdot w_1 \times \times \frac{p \cdot n_2}{60} \cdot B_{\delta 0} \cdot l_{\delta} \cdot \frac{a_{\delta} \cdot \pi \cdot D_{\text{н.2}}}{2 \cdot p}, \quad (2)$$

где w_1 — число последовательных витков в фазе обмотки;

p — число пар полюсов;

$B_{\delta 0}$ — магнитная индукция в воздушном зазоре в режиме ХХ;

$D_{\text{н.2}}$ — наружный диаметр ротора магнита.

Полезная мощность на валу вентильного двигателя [9]:

$$P_2 = \frac{\eta \cdot \cos \varphi \cdot m}{k_E} \cdot E_{1\phi} \cdot I_{1\phi}, \quad (3)$$

где k_E — отношение ЭДС обмотки статора к номинальному фазному напряжению;

m — количество фаз ЭД;

η — КПД ЭД;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности ЭД;

$I_{1\phi}$ — ток фазы статора ЭД.

Учитывая, что момент на валу ЭД прямо пропорционален мощности на валу, из выражений (2) и (3) следует, что данные параметры также пропорциональны току в обмотке статора, количеству витков в обмотке и индукции магнитного поля в воздушном зазоре.

На рисунке 4 показана энергетическая диаграмма вентильного двигателя.

Электрические потери в обмотке статора определяются по формуле [9]:

$$P_{\text{эл.}} = m \cdot I_{1\phi}^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где r_1 — активное сопротивление фазы обмотки статора;

Магнитные потери в зубцах статора описываются выражением [9]:

$$P_{z1} = 1,7 \cdot p_{1/50} \cdot B_{z1}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{z1} \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где $p_{1/50}$ — удельные потери для стали при $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц;

B_{z1} — индукция в сечении зубца;

m_{z1} — масса зубцов статора;

f — частота питающей сети.

Магнитные потери в ярме сердечника статора могут быть найдены выражением [9]:

$$P_{a1} = 1,3 \cdot p_{1/50} \cdot B_{a1}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{a1} \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где B_{a1} — индукция в ярме статора;

m_{a1} — масса ярма статора.

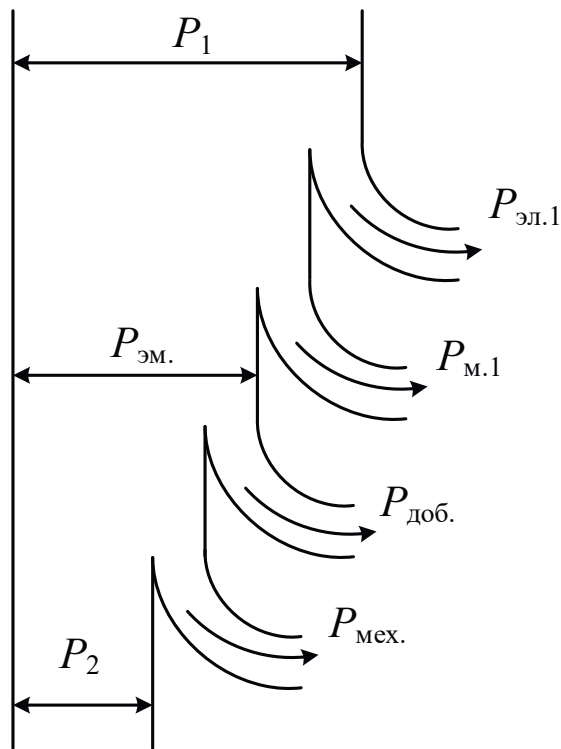


Рисунок 4. Энергетическая диаграмма вентильного двигателя

Figure 4. Energy diagram of a valve motor

Добавочные потери при нагрузке находятся по формуле [9]:

$$P_{\text{доб.}} = 0,005 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Потери в подшипниках описываются по формуле [9]:

$$P_{\text{трп.}} = k_m \cdot F_{\text{трп.}} \cdot \omega, \quad (8)$$

где k_m — коэффициент трения;

$F_{\text{трп.}}$ — нормальная сила реакции в подшипнике;

ω — частота вращения.

Потери на трение вращающихся частей о воздух могут быть определены выражением [9]:

$$P_{\text{трв.}} = C_{\text{трв.}} \cdot \pi \cdot D_{\text{н.2}} \cdot \omega^3 \cdot l_1, \quad (9)$$

где l_1 — длина поверхности трения;

$C_{\text{трв.}}$ — плотность среды.

Механические потери складываются из потерь в подшипниках и потерь на трение вращающихся частиц о воздух:

$$P_{\text{мех.}} = P_{\text{трп.}} + P_{\text{трв.}} \quad (10)$$

Полные потери в электрической машине определяются выражением:

$$\Sigma P = P_{\text{эл.}} + P_{\text{z1}} + P_{\text{a1}} + P_{\text{доб.}} + P_{\text{мех.}} \quad (11)$$

Коэффициент полезного действия электродвигателя может быть найден по формуле:

$$\eta_{\text{эд}} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{\text{ном.}}} \quad (12)$$

Чтобы выбрать IGBT-транзистор с подходящими параметрами, рассчитывается максимальный прямой ток, протекающий через силовые ключи, по формуле [11]:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_{\phi.} \quad (13)$$

Потери в преобразователе частоты могут быть определены выражением [11]:

$$P_{\text{пч}} = I_{\phi.} \cdot \left(2 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{CE}}}{\pi} + \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi} \cdot (t_{\text{вкл.}} + t_{\text{выкл.}}) \cdot f_{\text{к.}} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где U_d — напряжение на входе АИН ШИМ;

$f_{\text{к.}}$ — несущая частота ШИМ;

U_{CE} — падение напряжения на включенном IGBT-транзисторе;

$t_{\text{вкл.}}$ — время задержки включения IGBT-транзистора;

$t_{\text{выкл.}}$ — время задержки выключения IGBT-транзистора.

Потребляемая от преобразователя частоты активная мощность вычисляется по формуле:

$$P_1 = \frac{P_{\text{ном.}}}{\eta_{\text{эд}}} \quad (15)$$

КПД преобразователя частоты находится с использованием выражения:

$$\eta_{\text{пч}} = \frac{P_1}{P_1 + P_{\text{пч}}} \quad (16)$$

КПД электропривода может быть найдено по следующему выражению:

$$\eta = \eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{пч}} \quad (17)$$

Мощность, потребляемая электроприводом от сети, находится по формуле:

$$S = \frac{P_{\text{ном.}}}{\eta \cdot \cos \varphi}. \quad (18)$$

Рабочие характеристики вентильного двигателя, полученные по результатам проектирования, представлены на рисунке 5.

По результатам расчетов получается, что для поддержания заданного рабочего момента, с учетом характеристик приводного механизма, и обеспечения кратковременного пятикратного пускового момента мощность вентильного двигателя может быть на 40 % меньше, чем мощность асинхронного двигателя.

Предлагается проанализировать возможный эффект снижения мощности приводного электродвигателя при различном количестве пар полюсов (при разных скоростях вращения). На рисунке 6 представлены результаты расчетов.

Исходя из вышеизложенных данных, можно сделать вывод, что использование вентильных электродвигателей вместо асинхронных в приводах станков-качалок, которые оснащены преобразователями частоты для управления скоростью качаний, является целесообразным. Это должно привести к снижению потре-

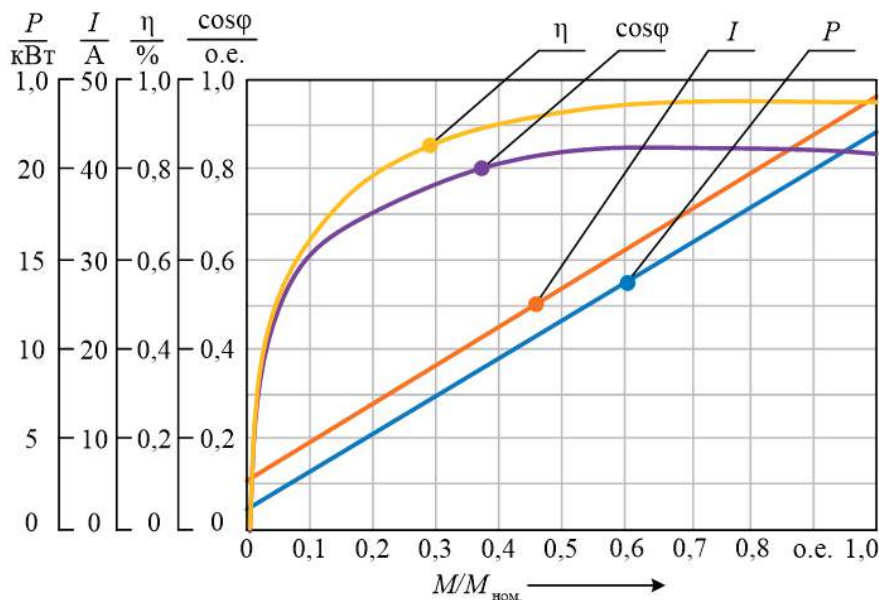


Рисунок 5. Рабочие характеристики вентильного двигателя

Figure 5. Operating characteristics of a valve motor

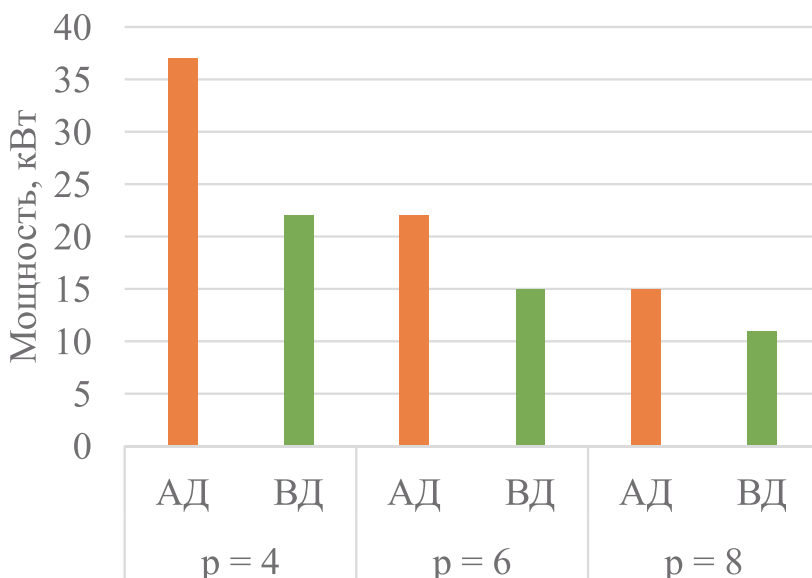


Рисунок 6. Мощности вентильного и асинхронного двигателей

Figure 6. Power of valve and asynchronous motors

ния электроэнергии электроприводом станка-качалки примерно на 20–40 %.

Предложенная выше методика проектирования электропривода УШГН на базе вентильного двигателя, блок-схема алгоритма которой представлена на рисунке 7, учитывает характеристики приводного механизма УШГН и конструктивные особенности ВД. Алгоритм реализован программным кодом в среде MatLab.

Для моделирования ВД во вращающейся ортогональной системе координат применяется математическое описание СДПМ в осях d, q [9]:

$$\begin{cases} i_d \cdot R + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \cdot \frac{d\theta}{dt} = U_d = U_m \cos(\gamma - \theta); \\ i_q \cdot R + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \cdot \frac{d\theta}{dt} = U_q = U_m \sin(\gamma - \theta); \\ \psi_d = L \cdot i_d + \psi_m; \\ \psi_q = L \cdot i_q; \\ M_{эл.} = \frac{M}{p} = (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) = \psi_m \cdot i_q, \end{cases} \quad (19)$$

где R — активное сопротивление одной фазы в эквивалентном представлении двигателя;

L — индуктивность одной фазы;

U_m — амплитудное значение напряжения одной;

i_d — ток по продольной оси;

ψ_d — потокосцепление по продольной оси;

i_q — ток по поперечной оси;

ψ_q — потокосцепление по поперечной оси;

ψ_m — потокосцепление постоянного магнита;

M — момент на валу ротора с учетом числа пар полюсов p двигателя;

p — число пар полюсов;

θ — угол поворота вала;

γ — начальная уставка датчика положения ротора.

Преобразуем систему уравнений (19) в следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \cdot (U_d - R \cdot i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q); \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} \cdot (U_q - R \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d - \omega \cdot \psi_m); \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_m \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c - \beta \cdot \omega). \end{cases} \quad (20)$$

На рисунке 8 представлена структурная схема вентильного двигателя, построенная на основании системы уравнений (20).

На рисунке 9 представлена компьютерная аналитическая модель вентильного двигателя, построенная в программном обеспечении MatLab Simulink.

Модель вентильного электропривода штангового глубинного насоса представлена на рисунке 10.

Представленная модель вентильного электропривода УШГН имеет особенность в том, что использует информацию с датчика положения ротора двигателя и датчика положения точки подвеса штанг, что позволяет улучшить параметры системы.

В результате моделирования ВД были получены осциллограммы переходных процессов угловой скорости вращения ротора и электромагнитного момента (рисунок 11).

Таким образом, использование моделей электропривода в программном обеспечении MatLab Simulink позволяет проверить правильность расчетов и может помочь в принятии множества проектных решений, которые помогут избежать осложнений при эксплуатации данного оборудования.

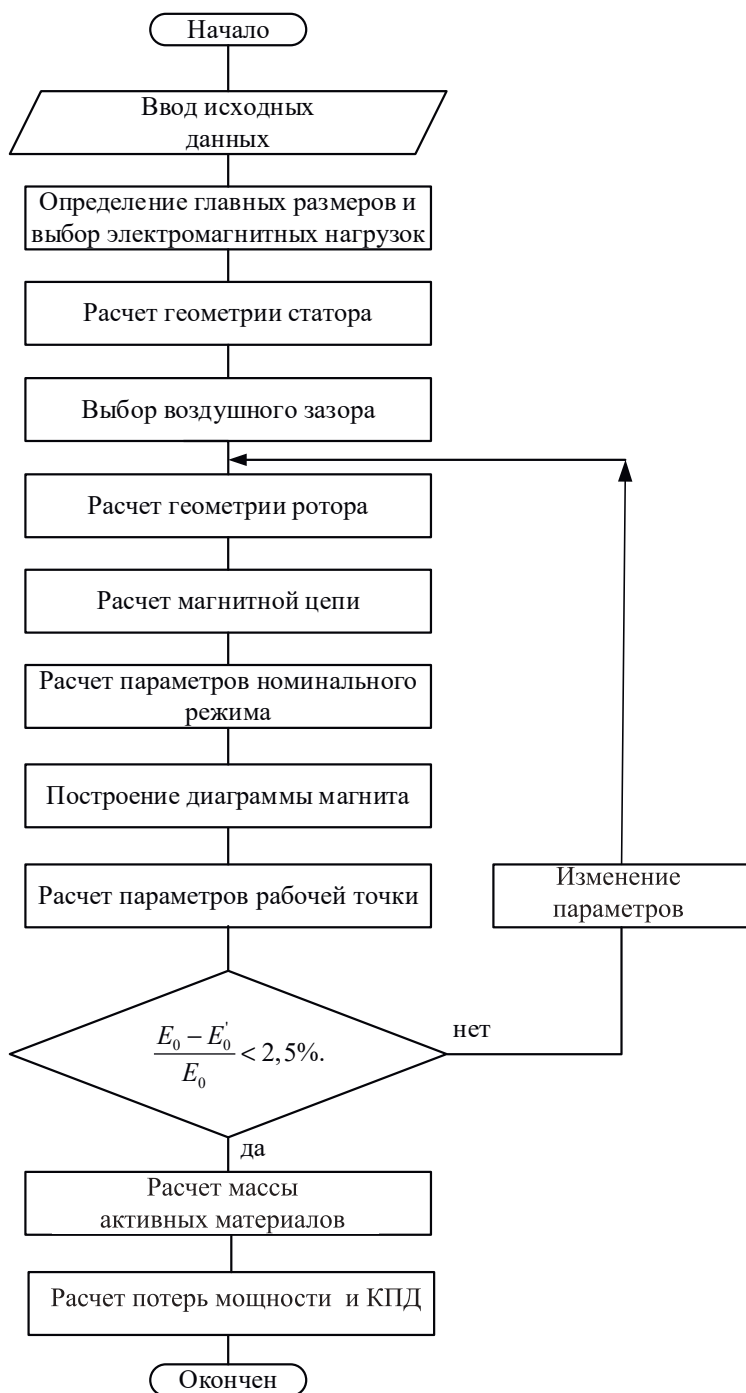


Рисунок 7. Блок-схема алгоритма проектирования электроприводов установок штанговых глубинных насосов на базе вентильного электропривода

Figure 7. Block diagram of the algorithm for designing electric drives of the sucker rod pump installation based on a valve electric drive

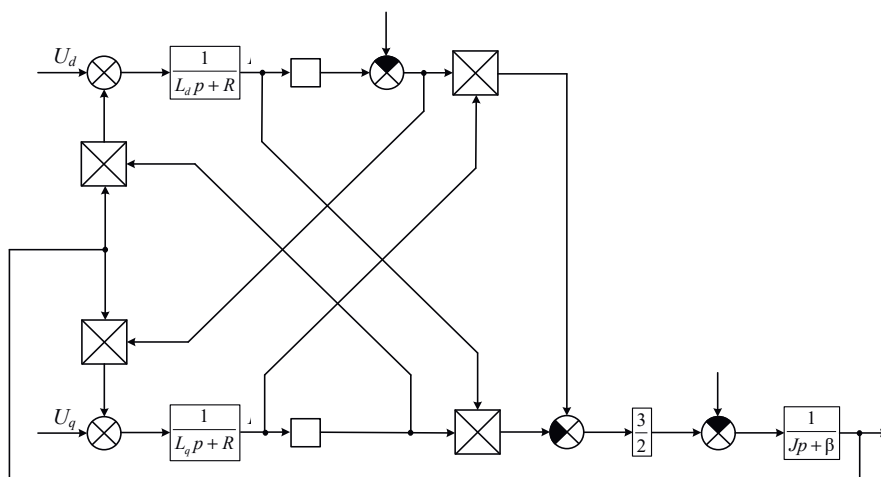


Рисунок 8. Структурная схема вентильного двигателя

Figure 8. Structural diagram of a valve motor

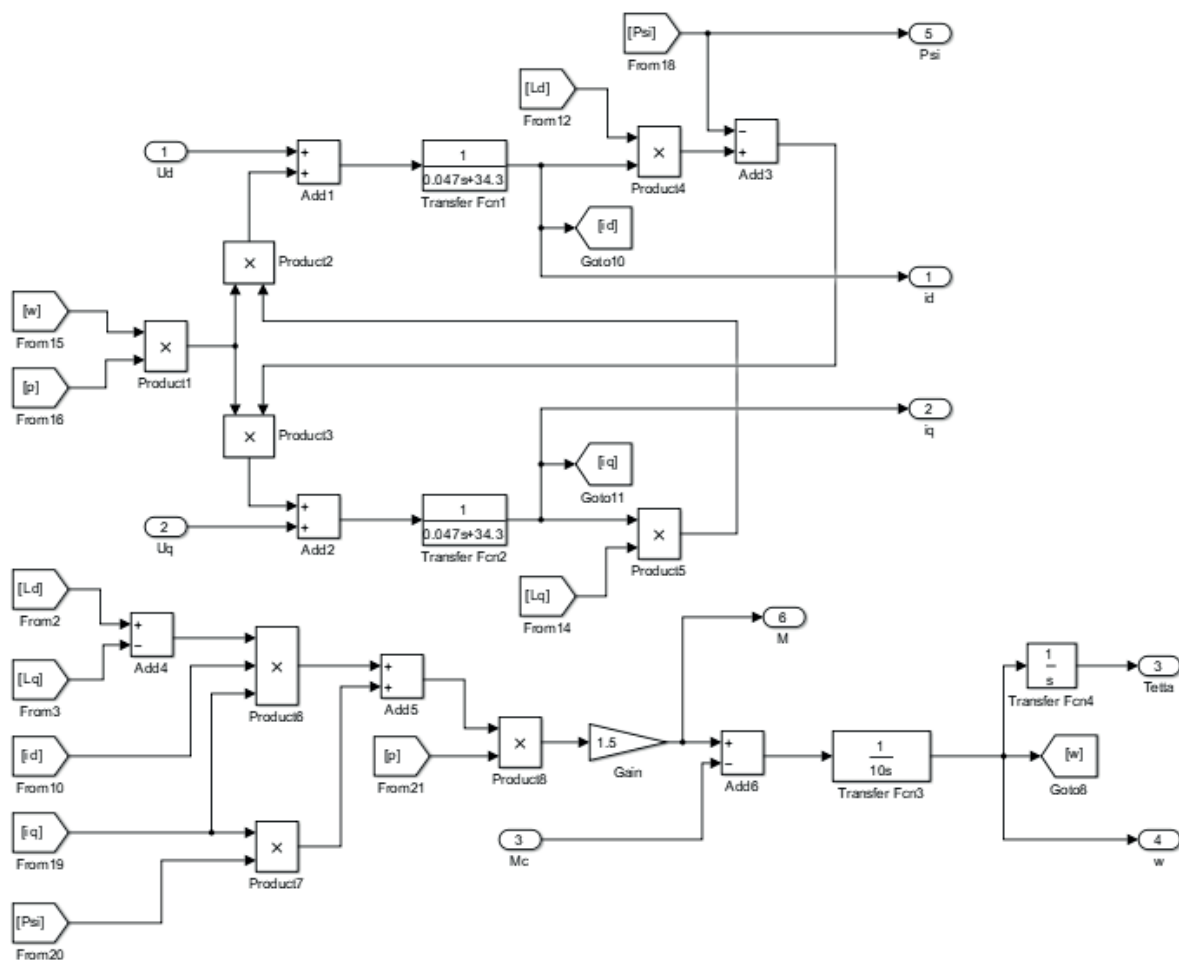


Рисунок 9. Компьютерная аналитическая модель вентильного двигателя

Figure 9. Computer analytical model of a valve motor

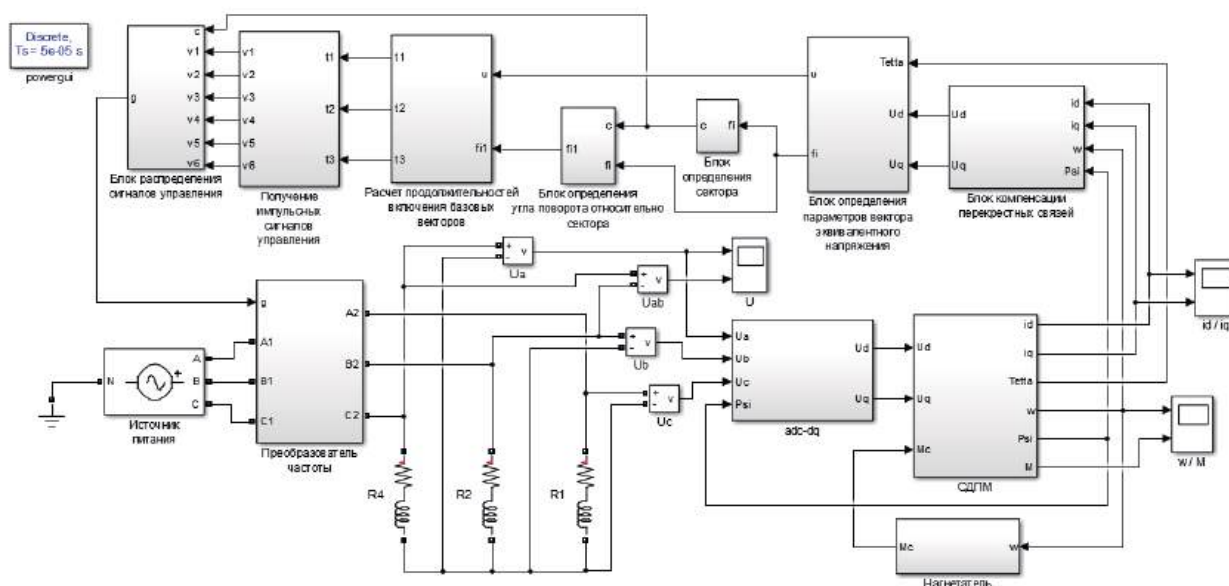


Рисунок 10. Модель электропривода установки штангового глубинного насоса на базе вентильного двигателя

Figure 10. Model of electric drive for the sucker rod pump installation based on a valve motor

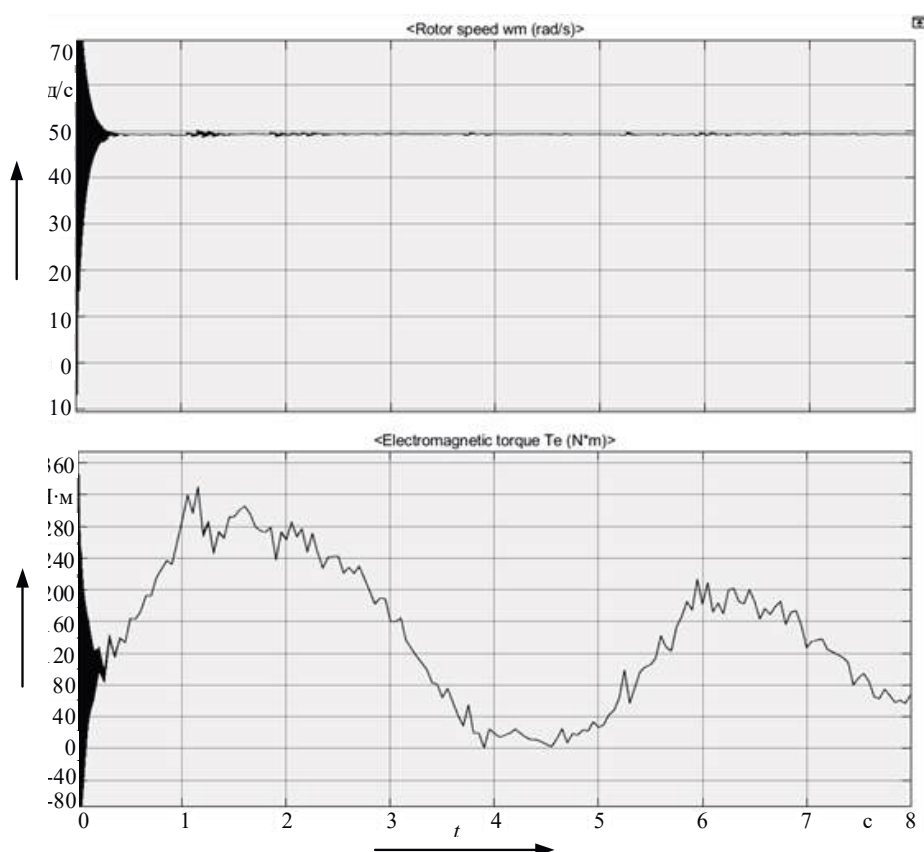


Рисунок 11. Зависимости скорости, момента от времени

Figure 11. Graphics of speed, torque on time

Выводы

1. В настоящее время созданы экспериментальные вентильные двигатели для привода УШГН, однако отсутствуют методики их расчета и подбора для конкретных скважин, а также обоснованные законы оптимального управления для приводов УШГН.

2. Представленная структура вентильного электропривода УШГН имеет особенность в том, что использует информацию с датчика положения ротора двига-

теля и датчика положения точки подвеса штанг, что позволяет улучшить качество процессов регулирования системы.

3. Разработанные модели позволяют ускорить и упростить процесс проектирования вентильного электропривода УШГН, а также смоделировать его работу в условиях возможных осложнений, таких как запарафинивание скважины и цилиндра насоса, образование высоковязких эмульсий и других.

Список источников

1. Буровой портал. Технология бурения скважин. Текущий ремонт скважин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.drillings.ru/tek-rem-skv?razdel=1&object=7> (дата обращения: 09.01.2024).

2. Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И. Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок // Электро-

технические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 1. С. 11-18. EDN: ZENQCP.

3. Карандаев А.С., Корнилов Г.П., Карандаева О.И., Ротанова Ю.Н., Ровнейко В.В., Галлямов Р.Р. и др. Анализ надежности оборудования тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2009. № 34 (167). С. 16-22. EDN: KZHOIZ.

4. 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.

5. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: учеб. для вузов. М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. 487 с. ISBN: 5-247-03867-3.

6. Ганджа С.А. Оптимальное проектирование вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком // Вопросы электроме- ханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 126. С. 9–12. EDN: OWYWBV.

7. Ганджа С.А., Косимов Б.И., Аминов Д.С. Разработка методики анализа вентильного двигателя постоянного тока с когтеобразными полюсами большой мощности, предназначенного для привода пилгерстана по производству бесшовных труб // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 38–57. EDN: ZPAMBM.

8. Сахаров М.В., Караулов В.Н. Методика проектирования обращенного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки // Вестник ИГЭУ. 2019. Вып. 2. С. 51–58. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.051-058.

9. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство «Юрайт», 2019. 828 с. ISBN 978-5-534-11700-4.

10. 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: XTDNKH.

11. Латыпов Б.М., Гумерова В.И. Совершенствование системы контроля состояния скважинной штанговой глубинной насосной установки на основе нейросетевых технологий // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 6. С. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-155-164>.

References

1. Burovoi portal. Tekhnologiya bureniya skvazhin. Tekushchii remont skvazhin [Drilling Portal. Well Drilling Technology. Current Well Repair: [Electronic Resource]. URL: <http://www.drillings.ru/tek-rem-skv?razdel=1&object=7> (accessed 09.01.2024). [in Russian].

2. Gizatullin F.A., Khakim'yanov M.I. Analiz rezhimov raboty elektropriwodov shtangovykh skvazhinnykh nasosnykh ustanovok [Operating Mode Analysis of the Oilwells Sucker Rod Pump Units Drives]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Information Complexes and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 1, pp. 11–18. EDN: ZEHQCP. [in Russian].

3. Karandaev A.S., Kornilov G.P., Karandaeva O.I., Rotanova Yu.N., Rovneiko V.V., Gallyamov R.R. i dr. Analiz nadezhnosti oborudovaniya teplovoi elektrostantsii pri vnedrenii preobrazovatelei chastoty [The Analysis of the Thermal Power Plant Equipment Reliability with the Frequency Changers Introduction]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta — Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. Seriya: Energetika*, 2009, No. 34 (167), pp. 16–22. EDN: KZHOIZ. [in Russian].

4. Yashin A.N., Konev A.A., Khakimyanov M.I. «Smart Well» Concept in Oil Production. *Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings» (ER(ZR) 2021) «Smart Innovation, Systems and Technologies»*, St. Petersburg, Russia, 14–17 April 2021. 2022, Vol. 232, pp. 403–414.

5. Men'shov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D. *Elektrotekhnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoi promyshlennosti: ucheb. dlya vuzov* [Electrical Installations and Complexes in the Oil and Gas Industry: Textbook for Universities]. Moscow, ОАО «Izdatel'stvo «Nedra», 2000. 487 p. ISBN 5-247-03867-3. [in Russian].

6. Gandzha S.A. Optimal'noe proektirovanie ventil'nykh elektricheskikh mashin s aksial'nym magnitnym potokom [Optimal Design of Valve Electric Machines with Axial Flux]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM — Electromechanics Questions. Proceedings of VNIEM*, 2012, Vol. 126, pp. 9–12. EDN: OWYWBV. [in Russian].

7. Gandzha S.A., Kosimov B.I., Aminov D.S. Razrabotka metodiki analiza ventil'nogo dvigatelya postoyannogo toka s kogteobraznymi polyusami bol'shoi moshchnosti, prednaznachennogo dlya privoda pil'gerstana po proizvodstvu besshovnykh trub [Development of a Method for Analyzing a DC Motor High-Power with Claw Poles Designed for Pilger Mill for the Manufacture of Seamless Pipes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya — Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems*, 2019, No. 32, pp. 38–57. EDN: ZPAMBM. [in Russian].

8. Sakharov M.V., Karaulov V.N. Metodika proektirovaniya obrashchennogo dvigatelya s postoyannymi magnitami privoda lebedki [Design Methodology of Inverted Permanent Magnet Motor for Winch Drive]. *Vestnik IGEU — «Vestnik IGEU» Journal*, 2019, Issue 2, pp. 51-58. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.051-058. [in Russian].

9. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov* [Design of Electrical Machines: Textbook for Universities]. 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Izdatel'stvo «Yurait», 2019. 828 p. ISBN 978-5-534-11700-4. [in Russian].

10. 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].

11. Latypov B.M., Gumerova V.I. Sovershenstvovanie sistemy kontrolya sostoyaniya skvazhinnoi shtangovoi glubinnoi nasosnoi ustanovki na osnove neirosetevykh tekhnologii [Improvement of the System of Control of the State of a Sucker Rod Pump Based on Neural Network Technologies]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2022, Vol. 20, No. 6. pp. 155-164. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-155-164>. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 17.03.2025; принята к публикации 24.03.2025.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 17.03.2025; accepted for publication 24.03.2025.

Научная статья

УДК 665.76

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-88-97

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АНАЛИЗА КАПЕЛЬНОЙ ПРОБЫ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**Тимур Робертович Нурлыгаянов****Timur R. Nurlygayanov***аспирант кафедры электронной инженерии,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия***Алексей Юрьевич Демин****Aleksei Yu. Demin***доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электронной инженерии,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия***Ильшат Ришатович Нигматуллин****Ilshat R. Nigmatullin***кандидат технических наук,
главный специалист ООО «Химмотолог»,
Уфа, Россия***Екатерина Фарагатовна Нурлыгаянова****Ekaterina F. Nurlygayanova***старший преподаватель кафедры электронной инженерии,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия*

Актуальность

Различные виды масел являются необходимым ресурсом для функционирования многих производств, техники, двигателей. Кроме выполнения основной функции смазки деталей технических устройств масла давно зарекомендовали себя как удобные, эффективные индикаторы, отражающие процессы, происходящие в ходе эксплуатации техники. Своевременный анализ химического состава моторных масел, используемых в автомобилях, позволяет делать вывод о необходимости их замены, а также проводить безразборную диагностику

Ключевые слова

«капельная проба»,
моторное масло,
индикаторная бумага,
автоматизация процесса
сбора информации,
нейронная сеть

самого двигателя, прогнозировать степень его износа и перспективы дальнейшей эксплуатации. Каждый тип моторного масла обладает изначально рядом характеристик, определенных нормативными документами. В ходе эксплуатации двигателя происходят качественные и количественные изменения в составе его масла. Накопление воды, примесей механического происхождения, изменение количества присадок масла отрицательно влияют на его эксплуатационные свойства. Рекомендуется проводить замену масла с учетом условий эксплуатации по фактическому состоянию, т.е. при достижении установленных соответствующей технической документацией предельных значений контролируемых показателей качества масла.

В условиях санкционного давления, ограниченного доступа к моторным маслам известных производителей контроль качества масел становится еще актуальнее. Отечественные производители вынуждены менять рецептуру масел из-за недоступности исходных базовых масел и присадок. Также возможен рост подделок из менее контролируемых источников производства масел. Для того, чтобы отечественные производители смогли завоевать доверие потребителя и рынок машинных масел, необходимо обладать соответствующими устройствами и методами оперативного текущего контроля техническими средствами его качества.

Цель исследования

Разработка автоматизированного устройства анализа капельной пробы с использованием искусственного интеллекта.

Методы исследования

Рассмотрены вопросы применения математического моделирования и искусственного интеллекта для анализа остаточного ресурса моторных масел, обозначены критерии, определяющие качество капельной пробы. Представлена структура автоматизированного устройства для анализа капельной пробы, предложена структура нейронной сети с повышенной семантической сходимостью, рекомендуемая для обработки данных.

Результаты

В статье представлены результаты разработки автоматизированного устройства анализа масляных проб, которое позволит снизить трудоемкость процесса, уровень субъективного фактора участия человека, повысит эффективность и точность выполнения снимков в динамике. На качество производимых снимков положительно повлияет рекомендуемое использование специальной пропитки для фильтровальной бумаги. Применение архитектуры «трансформер» нейронных сетей повысит эффективность выучивания закономерностей протекания химических реакций масла и реагентов бумаги-индикатора в динамике.

Для цитирования: Нурлыгаянов Т. Р., Демин А. Ю., Нигматуллин И. Р., Нурлыгаянова Е. Ф. Автоматизированное устройство для анализа капельной пробы моторных масел с использованием нейронных сетей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 88-97. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-88-97>.

AUTOMATED DEVICE FOR ANALYSING DROP SAMPLES OF MOTOR OILS USING NEURAL NETWORKS

Relevance

Various types of oils are essential resources for the operation of many industries, machinery, and engines. In addition to their primary function as lubricants for technical equipment components, oils have long proven themselves as convenient and effective indicators that reflect processes occurring during the use of machinery. When it comes to motor oils used in vehicles, timely analysis of their chemical composition allows conclusions to be drawn about the need for replacement, as well as performing non-invasive diagnostics of the engine itself, predicting its wear rate, and forecasting further operational prospects. Each type of motor oil initially has a set of characteristics defined by regulatory documents. During engine operation, qualitative and quantitative changes occur in the composition of the oil. The accumulation of water, mechanical impurities, and changes in the amount of oil additives negatively affect its performance properties. It is recommended to replace the oil based on operating conditions according to its actual condition, i.e., when the established limit values of controlled quality indicators specified in relevant technical documentation are reached.

Under sanctions pressure and limited access to motor oils from well-known manufacturers, monitoring oil quality becomes even more critical. Domestic producers are forced to change the formulation of oils due to the unavailability of base oils and additives. There may also be an increase in counterfeits from less regulated sources of oil production. To gain consumer trust and conquer the machine oil market, domestic producers must possess appropriate devices and methods for ongoing technical control of oil quality using current means.

Aim of research

Development of an automated device for analyzing drop samples using artificial intelligence.

Research methods

Issues related to applying mathematical modeling and artificial intelligence for analyzing the residual resource of motor oils were examined. Criteria determining the quality of drop samples were identified. The structure of an automated device for analyzing drop samples was presented, and a neural network architecture with enhanced semantic convergence, recommended for data processing, was proposed.

Results

The article presents the results of developing an automated device for analyzing oil samples, which will reduce labor intensity, minimize subjective human involvement, and improve efficiency and accuracy in capturing dynamic images. The quality of produced images will benefit positively from the recommended use of special filter paper treatment. Applying the transformer architecture of neural networks will enhance the effectiveness of learning patterns in the dynamics of chemical reactions between oil and indicator paper reagents.

Keywords

drop sample, motor oil, indicator paper, automation of information collection process, neural network

For citation: Nurlygayanov T. R., Demin A. Yu., Nigmatullin I. R., Nurlygayanova E. F. Avtomatizirovannoye ustroystvo dlya analiza kapel'noy proby motornykh masel s ispol'zovaniyem neyronnykh setey [Automated Device for Analysing Drop Samples of Motor Oils Using Neural Networks]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 88-97 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-88-97>.

Введение

Различные виды масел являются необходимым ресурсом для функционирования многих производств, техники, двигателей. Кроме выполнения основной функции смазки деталей технических устройств масла давно зарекомендовали себя как удобные, эффективные индикаторы, отражающие процессы, происходящие в ходе эксплуатации техники. Своевременный анализ химического состава моторных масел, используемых в автомобилях, позволяет делать вывод о необходимости их замены, а также проводить безразборную диагностику самого двигателя, прогнозировать степень его износа и перспективы дальнейшей эксплуатации. Каждый тип моторного масла обладает изначально рядом характеристик, определенных нормативными документами [1].

Сегодня специалисты широко используют различные группы методов анализа моторных масел [2]. Наряду с хорошо зарекомендовавшими себя лабораторными методами химического титрования, хроматографии, спектроскопии большую актуальность имеют методы экспресс-анализа, проводимые непосредственно на объектах исследования [3, 4]. По простоте реализации, доступности, эффективности хорошо проявил себя органолептический метод по анализу каплевой масляной пробы, нанесенной на индикаторную бумагу [2, 5–7]. Качество получаемого рисунка масла существенно зависит от используемой индикаторной бумаги. Разработанная и запатентованная уфимским предприятием «Химмотолог» специальная химическая пропитка фильтровальной бумаги обеспечивает контрастные переходы цветов по шкале, отсутствие размываемости и большую стойкость результирующего цвета после контакта с анализируемыми образцами [8]. Данным предприятием уже реализуется метод экспресс-диагно-

стики моторных масел по каплевой пробе с дальнейшим анализом фотоснимков полученных рисунков [9]. По размерам ядра, диффузионным зонам, их цвету и времени впитывания можно определить вид масла, его вязкость и другие эксплуатационные характеристики. Однако данный вариант анализа требует значительные временные и человеческие ресурсы и характеризуется высоким уровнем субъективного фактора.

Введение искусственного интеллекта в процесс обработки информации позволит повысить быстродействие, доступность, эффективность качественного анализа моторных масел [10].

Немаловажным фактором, оказывающим влияние на эффективность обработки данных снимков искусственным интеллектом, является точность нанесения каплевой пробы, качество и синхронность выполнения фотоснимков в динамике. Выполнение данных операций человеком однозначно будет вносить субъективную погрешность в результат.

Обзор существующих методов по анализу каплевых проб с целью определения химического состава масел позволяет наметить основные перспективные направления их усовершенствования:

- минимизация субъективных факторов, влияющих на качество процесса сбора снимков проб;
- использование эффективного индикатора для нанесения каплевой пробы с целью улучшения качества рисунка;
- повышение эффективности обработки базы данных за счет применения оптимальной архитектуры нейронной сети;
- удобство и универсальность реализации метода как в лабораторных, так и в полевых условиях с помощью автономного устройства.

Авторами предлагается следующая структурная организация автономного

автоматизированного устройства для процесса выполнения снимков капельной пробы масла с последующей интеллектуальной обработкой (рисунок 1).

Предлагается организовать автоматизированный процесс управления небольшой конвейерной лентой, на которой будет располагаться индикаторная фильтровальная бумага для нанесения проб с последующим фотографированием. Роль человека в разрабатываемом устройстве будет заключаться в заполнении кассеты с дозаторами пропитывающей жидкостью и пробами масел, в установке данной кассеты в устройство, в заправке на конвейер фильтровальной бумаги и запуске процесса анализа. Конвейером управляет модуль обработки, посылая сигнал в необходимые моменты времени на шаговый двигатель. Дозаторы с пропиткой и масляной пробой также управляются сигналами из модуля обработки. По сигналу от блока управления происходит нанесение пропитки на первую рабочую зону фильтровальной бумаги. Затем конвейер продвигает под дозатор с маслом бумагу-индикатор, и запускается процесс нанесения пробы. После этого конвейер снова запускается и продвигает пробу до метки позиционирования, где располагается фотокамера. Блок управления получает сигнал с меток,

останавливает конвейер и подает сигнал фотокамере на выполнение 1-го снимка. Для оценки динамики химического взаимодействия масла с индикатором во времени, выполняются еще 4 снимка с интервалом 5 мин. Далее процесс по необходимости повторяется для следующей пробы в дозаторе автоматически. Собранные образцы пятен масел передаются из блока управления устройства в компьютер для обработки нейросетью. На дисплее компьютера визуализируется результат обработки и происходит запись результата анализа в базу данных.

Среди существующих разработок в области анализа масел с использованием искусственного интеллекта можно выделить основные тенденции. В статье [11] описывается способ изучения и диагностики моторных масел, базирующийся на анализе диагностических параметров системы «двигатель — моторное масло». Капельная проба моторного масла наносится на фильтровальную бумагу — беззольный фильтр «синяя лента». Спустя некоторое время, необходимое для высыхания пятна, проводится сканирование получившегося результата, в результате чего появляется цветное позитивное цифровое изображение масляного пятна. Авторы предлагают для устранения неравномерности растекания масляного



Рисунок 1. Структурная схема устройства

Figure 1. Structural diagram of the device

пятна изображение преобразовать в негативное, разделить на 4 части, каждую из которых трижды проворачивают на 90° по часовой стрелке. Далее 4 кадра с разными фрагментами одного и того же пятна подвергаются обработке с использованием методов компьютерного зрения (CV). Цифровая обработка реализована с использованием программного обеспечения Mathcad, позволившем авторам выявить ключевые паттерны для определения качества масла по хроматографическим снимкам проб.

Интересен вариант применения нейронных систем для анализа трансформаторных масел в другой работе [12]. Авторами ставилась задача по улучшению качества анализа в режиме реального времени масляных проб энергетических трансформаторов. Для своего анализа авторы остановились на архитектуре нейронных сетей Long Short-Term Memory (LSTM). Классическая структура данной архитектуры состоит из 3 слоев: слой входных данных, скрытый слой, слой выходных данных. Данная архитектура меняет веса модели в скрытых слоях при каждом новом объекте из обучающей выборки и использует их при обработке последующих данных. Это позволяет хранить «короткую» память о предыдущих картинках и ее паттернах. Для тестирования работы данной архитектуры авторы собрали выборку как онлайн данных, так и лабораторных исследований. Тестирование проводилось на поиск 3 составляющих в масле: доля метана, доля углеводорода и доля водорода. В результате авторам удалось приблизить нейронную сеть к лабораторным тестовым данным. На начальных этапах нейронная сеть допускала ошибки, однако со временем при увеличении количества данных алгоритм удалось приблизить к тестовым данным.

На сегодняшний день наиболее прогрессивные методы анализа с помощью

искусственного интеллекта так или иначе связаны с архитектурой трансформера [13–15]. Данная архитектура доказала свою универсальность и применяется в большинстве областей машинного обучения (обработка естественного языка, компьютерное зрение, рекомендательные системы, обработка звука и т.д.) благодаря механизму attention. Благодаря последним прорывам при активном использовании этой архитектуры (ChatGPT) исследовательские группы по всему миру сходятся к единому выводу: для лучшей семантической сходимости трансформера нужно сводить обучение нейронной сети к анализу не отдельных элементов, а последовательности из элементов.

Для решения нашей задачи предлагается архитектура нейронной сети, состоящая из двух частей: генератор признаков и трансформерный блок. Схематичное изображение данной архитектуры представлено на рисунке 2.

После того, как капля пробы масла попадает на бумажный индикатор, фотокамера начинает раз в 5 мин производить фотосъемку. К концу 20-ой минуты для каждой пробы будет сформировано 5 фотоснимков, демонстрирующих динамику химического взаимодействия масла с индикатором во времени. По степени впитываемости и растекаемости пятен в динамике делаются выводы о вязкости масла. Все снимки попадают в первый блок нейронной сети, где происходит извлечение цифровых признаков. Данный блок представляет набор сверточных нейронных слоев с функциями нелинейности и нормализацией, которые приводят входные изображения к единому признаковому пространству, объединяя выходы всех сверточных слоев [16]. Схематичное изображение первого блока с изменением размерности входного изображения представлено на рисунке 3.



Рисунок 2. Блочный план нейронной сети

Figure 2. Block plan of neural network



Рисунок 3. Схема первого блока нейронной сети

Figure 3. Scheme of the first block of neural network

После извлечения признаков все 5 изображений последовательно с момента появления подаются в трансформерные блоки. Данные блоки состоят из объединенных «декодер» частей, где при помощи казуальной маски [17] в механизме attention, происходит последовательное выучивание закономерностей протекания химических реакций масла и реагентов бумаги-индикатора с первой по 20-ую минуту. Выходным элементом последнего блока трансформера является векторное представление, которое можно свести к целому ряду задач машинного обучения:

- задача бинарной классификации — целевая переменная представляется в виде бинарного числа, говорящего о том, что масло новое или использованное;
- задача многоклассовой классификации — целевая переменная представляется в виде принадлежности к какому-либо классу «пробега» масла;

— задача регрессии — целевая переменная представляется в виде одного или нескольких чисел, описывающих количество входящих в состав масла присадок и химических элементов.

Выводы

В рамках данной статьи рассмотрена тема анализа качества масла методом капельной пробы с использованием искусственного интеллекта. Предлагаемые технические решения для автоматизированного устройства анализа масляных проб позволяют снизить трудоемкость процесса и уровень субъективного фактора участия человека, повышают эффективность и точность выполнения снимков в динамике. На качество получаемых рисунков пятен положительно повлияет использование специальной пропитки для фильтровальной бумаги. Применение архитектуры «трансформер» нейронных сетей увели-

чит эффективность выучивания закономерностей протекания химических реакций масла и реагентов бумаги-индикатора в динамике. Создание портативного

автоматизированного устройства позволит проводить быстрый качественный анализ проб масел как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Список источников

1. ГОСТ 17479.1-2015. Масла моторные. Классификация и обозначение. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

2. Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р. Диагностика ДВС по анализу моторного масла. Уфа: ГУП РБ Уфимский полиграфкомбинат, 2011. 296 с. ISBN 978-5-85051-529-4. EDN: PUSDIZ.

3. Иванова Ю.А. Хроматографическое и спектрометрическое определение функциональных присадок в смазочных маслах различных видов и дизельном топливе: дисс. ... канд. хим. наук. Краснодар, 2021. 153 с.

4. Пат. 2498269 РФ, МПК МПК G 01 N 15/02. Способ анализа загрязненности моторного масла двигателя внутреннего сгорания дисперсными частицами / В.В. Семенов, Ю.Б. Ханжонков, Ю.Г. Асцатуров. 2012115075/28, Заявлено 16.04.2012; Оpubл. 10.11.2013. Бюл. 31.

5. Пат. 2563206 РФ, МПК G 01 N 15/02. Способ экспресс-оценки рабочих свойств работающих моторных масел в полевых условиях методом «масляного пятна» / А.В. Дунаев, С.А. Соловьев. 2014131758/15, Заявлено 31.07.2014; Оpubл. 20.09.2015. Бюл. 26.

6. Семенов В.В., Асцатуров Ю.Г., Ханжонков Ю.Б. Разработка оптико-электронного устройства для контроля качества моторного масла // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3732. EDN: YGSSTT.

7. Пат. 2582296 РФ, МПК G 01 N 33/28, G 01 N 21/00. Оптико-электронное устройство для контроля качества моторного масла / В.В. Семенов, Ю.Г. Асцатуров, Ю.Б. Ханжонков. 2015106462/15, Заявлено 25.02.2015; Оpubл. 20.04.2016, Бюл. 11.

8. Пат. 2731818 РФ, МПК G 01 N 33/28, G 01 N 33/30, G 01 N 31/22. Способ экспресс-анализа присадок, смазочных материалов, технических жидкостей, включая отработанные (варианты) / В.Р. Нигматуллин, И.Р. Нигматуллин, Р.Г. Нигматуллин, Р.В. Нигматуллин, Д.И. Нигматуллин. 2019109613, Заявлено 01.04.2019; Оpubл. 08.09.2020. Бюл. 25.

9. ООО «Химмотолог»: официальный сайт. 2011. URL: <https://himmotolog.com/> (дата обращения: 28.03.2025).

10. Нурлыгаянов Т.Р., Антропов Р.И. Использование искусственного интеллекта для анализа капельной пробы моторного масла // Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак, 2024. С. 395-399.

11. Серков А.П., Корнеев С.В. Алгоритм определения остаточного ресурса моторного масла // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. № 4 (44). С. 138-143. EDN: UJLKAJ.

12. Lin J., Sheng G., Yan Y., Zhang Q., Jiang X. Online Monitoring Data Cleaning of Transformer Considering Time Series Correlation // 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). Denver, CO, USA, 2018. P. 1-9. DOI: 10.1109/TDC.2018.8440521.

13. Shuiqingshan Lu, Chuanzhi Cui, Yin Qian, Jiajie He. Well Production Forecast Post-Liquid Lifting Measures: a Transformer-Based Seq2Seq Method with Attention Mechanism // Energy Fuels. 2024. No. 38 (15). P. 14072–14084. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02123.

14. Abdrakhmanov I.R., Kanin E.A., Boronin S.A., Burnaev E.V., Osipov A.A. Development of Deep Transformer-Based Models for Long-Term Prediction of Transient Production of Oil Wells // Paper Presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, October 2021. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2110.06059.

15. Zhang Jiafeng, Liu Ye, Zhang Fuqiang, Li Yan, Yang Xun, Wang Kaisong, Ma Yuheng, Nan Zhang. Integrating Petrophysical, Hydrofracture, and Historical Production Data with Self-Attention-Based Deep Learning for Shale Oil Production Prediction // SPE J. 2024. No. 29. P. 6583–6604. DOI: 10.2118/223594-PA.

16. Wang X., Cai Z., Luo Y. e.a. Long Time Series Deep Forecasting with Multiscale Feature Extraction and Seq2seq Attention Mechanism // Neural Process Lett. 2022. No. 54. P. 3443–3466. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11063-022-10774-0>.

17. Yin Q., He X., Zhuang X., Zhao Y., Yao J., Shen X., Zhang Q. Stablemask: Refining Causal Masking in Decoder-Only Transformer // Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning, PMLR. 2024. No. 235. P. 57033-57052. URL: <https://arxiv.org/pdf/2402.04779>.

References

1. *GOST 17479.1-2015. Masla motornye Klassifikatsiya i oboznachenie* [State Standard 17479.1-2015. Motor oils. Classification and Designation]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 12 p. [in Russian].
2. Nigmatullin R.G., Nigmatullin V.R., Nigmatullin I.R. *Diagnostika DVS po analizu motornogo masla* [Diagnostics of Internal Combustion Engines by Analysis of Motor Oil]. Ufa, GUP RB Ufimskii poligrafkombinat, 2011. 296 p. ISBN 978-5-85051-529-4. EDN: PUSDIZ. [in Russian].
3. Ivanova Yu.A. *Khromatograficheskoe i spektrometricheskoe opredelenie funktsional'nykh prisadok v smazochnykh maslakh razlichnykh vidov i dizel'nom toplive: diss. ... kand. khim. nauk* [Chromatographic and Spectrometric Determination of Functional Additives in Lubricating Oils of Various Types and Diesel Fuel: Diss. Cand. Chem. Sci.]. Krasnodar, 2021. 153 p. [in Russian].
4. Semenov V.V., Khanzhonkov Yu.B., Astsaturov Yu.G. *Sposob analiza zagryaznennosti motornogo masla dvigatelya vnutrennego sgoraniya dispersnymi chastitsami* [Method for Analyzing Contamination of Internal Combustion Engine Motor Oil with Dispersed Particles]. Patent RF, No. 2498269, 2013. [in Russian].
5. Dunaev A.V., Solovov S.A. *Sposob ekspress-otsenki rabochnikkh svoystv rabotayushchikh motornykh masel v polevykh usloviyakh metodom «maslyanogo pyatna»* [Method of Express Evaluation of Working Properties of Working Motor Oils in Field Conditions by the «Oil Spot» Method]. Patent RF, No. 2563206, 2015. [in Russian].
6. Semenov V.V., Astsaturov Yu.G., Khanzhonkov Yu.B. *Razrabotka optiko-elektronnogo ustroystva dlya kontrolya kachestva motornogo masla* [Development of Optico-Electronic Device for Quality Control of Motor Oil]. *Inzhenernyi vestnik Dona — Engineering Journal of Don*, 2016, No. 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3732. EDN: YGSSTT. [in Russian].
7. Semenov V.V., Astsaturov Yu.G., Khanzhonkov Yu.B. *Optiko-elektronnnoe ustroystvo dlya kontrolya kachestva motornogo masla* [Optical-Electronic Device for Quality Control of Motor Oil]. Patent RF, No. 2582296, 2016. [in Russian].
8. Nigmatullin V.R., Nigmatullin I.R., Nigmatullin R.G., Nigmatullin R.V., Nigmatullin D.I. *Sposob ekspress-analiza prisadok, smazochnykh materialov, tekhnicheskikh zhidkostei, vklyuchaya otrabotannye (varianty)* [Method of Express Analysis of Additives, Lubricants, Technical Fluids, Including Waste Ones (Variants)]. Patent RF, No. 2731818, 2020. [in Russian].
9. *ООО «Khimmotolog»* [LLC «Khimmotolog»]. [Official Website]. 2011. URL: <https://himmotolog.com/> (accessed 28.03.2025). [in Russian].
10. Nurlygayanov T.R., Antropov R.I. *Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta dlya analiza kapel'noi proby motornogo masla* [Using Artificial Intelligence to Analyze a Drop Sample of Motor oil]. *Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya v sovremennom vuze»* [Collection of Works of the VI International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Science and Education in a Modern University»]. Sterlitamak, 2024, pp. 395-399. [in Russian].
11. Serkov A.P., Korneev S.V. *Algoritm opredeleniya ostatochnogo resursa motornogo masla* [The Algorithm for Determining the Remaining Resource of Motor Oil]. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii — The Siberian State Automobile and Highway University*, 2015, No. 4 (44), pp. 138-143. EDN: UJLKAJ. [in Russian].
12. Lin J., Sheng G., Yan Y., Zhang Q., Jiang X. *Online Monitoring Data Cleaning of Transformer Considering Time Series Correlation*. *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Denver, CO, USA, 2018, pp. 1-9. DOI: 10.1109/TDC.2018.8440521.
13. Shuiqingshan Lu, Chuanzhi Cui, Yin Qian, Jiajie He. *Well Production Forecast Post-Liquid Lifting Measures: a Transformer-Based Seq2Seq Method with Attention Mechanism*. *Energy Fuels*, 2024, No. 38 (15), pp. 14072–14084. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02123.
14. Abdrakhmanov I.R., Kanin E.A., Boronin S.A., Burnaev E.V., Osipov A.A. *Development of Deep Transformer-Based Models for Long-Term Prediction of Transient Production of Oil Wells*. *Paper Presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, October 2021*. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2110.06059.
15. Zhang Jiafeng, Liu Ye, Zhang Fuqiang, Li Yan, Yang Xun, Wang Kaisong, Ma Yuheng, Nan Zhang. *Integrating Petrophysical, Hydrofracture, and Historical Production Data with Self-Attention-Based Deep Learning for Shale Oil Production Prediction*. *SPE J.*, 2024, No. 29, pp. 6583–6604. DOI: 10.2118/223594-PA.
16. Wang X., Cai Z., Luo Y. e.a. *Long Time Series Deep Forecasting with Multiscale Feature Extraction and Seq2seq Attention Mechanism*.

Neural Process Lett., 2022, No. 54, pp. 3443–3466.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11063-022-10774-0>.

17. Yin Q., He X., Zhuang X., Zhao Y., Yao J., Shen X., Zhang Q. Stablemask: Refining Causal Masking in Decoder-Only Transformer. *Pro-*

ceedings of the 41st International Conference on Machine Learning, PMLR, 2024, No. 235, pp. 57033-57052. URL: <https://arxiv.org/pdf/2402.04779>.

Статья поступила в редакцию 18.04.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was submitted 18.04.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 05.05.2025.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 2. С. 98–110. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2025. Vol. 21. No. 2. P. 98–110. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 622.276.72

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-98-110

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ УСТАНОВКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СКВАЖИНЫ



Сергей Николаевич Федоров

Sergey N. Fedorov

старший преподаватель кафедры

«Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия



Геннадий Юрьевич Коловертнов

Gennady Yu. Kolovertnov

доктор технических наук, профессор кафедры

«Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия



Андрей Николаевич Краснов

Andrey N. Krasnov

кандидат технических наук, доцент кафедры

«Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия



Марина Юрьевна Прахова

Marina Yu. Prakhova

доцент кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Актуальность

Примерно пятую часть нефтяных запасов Российской Федерации составляет нефть с высоким содержанием асфальтосмолопарафинистых отложений (АСПО). При изменении термобарических условий в добывающей нефтяной скважине (при падении температуры и давления) АСПО кристаллизуются из нефти и осаждаются на стенках насосно-компрессорных труб. Это приводит к уменьшению их рабочего сечения и дебита нефти, к увеличению количества потребляемой электроэнергии, непроизводительных простоев скважин и в целом снижает эффективность эксплуатации нефтяного промысла. Поэтому с определенной периодичностью скважины очищают от АСПО чаще всего механическим способом с помощью различных скребков.

Ключевые слова

методика, конфузور, система охлаждения, силовая установка, вертолет

Цель исследования

Разработать диагностическую диаграмму состояния установки механической очистки скважины от АСПО в режиме реального времени и выбрать вид математической модели для цифрового двойника установки.

Методы исследования

Для реализации поставленной цели в статье рассмотрены условия работы и возможные состояния установки механической очистки скважины от АСПО. Проведен сопоставительный анализ нескольких методов синтеза математических моделей, наиболее часто используемых в нефтегазовой отрасли.

Результаты

Разработана диагностическая диаграмма состояния установки в реальном времени, позволяющая оценить вероятность наступления конкретных нештатных или аварийных ситуаций. Установлено, что наиболее целесообразными методами моделирования диагностирования состояния установки механической очистки скважины от АСПО являются методы на основе нечеткой логики с использованием алгоритма Мамдани и нейронных сетей класса многослойный персептрон.

Для цитирования: Федоров С. Н., Коловертнов Г. Ю., Краснов А. Н., Прахова М. Ю. Диагностическая диаграмма состояния установки механической очистки скважины // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 98-110. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-98-110>.

Original article

DIAGNOSTIC DIAGRAM OF STATE OF WELL MECHANICAL CLEANING UNIT

Relevance

Approximately one fifth of oil reserves of the Russian Federation belong to oil with high content of asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD). When thermobaric conditions in a producing oil well change (temperature and pressure drop), ARPD crystallize from oil and precipitate on tubing walls. This leads to a decrease in their working cross-section and oil flow rate, an increase in the amount of consumed electricity, unproductive downtime of wells and, in general, reduces the efficiency of oil field operation. That is why wells are cleaned from ARPD at certain intervals, most often mechanically with the help of various scrapers.

Aim of research

The main aim is to develop a diagnostic diagram of the state of the mechanical well cleaning unit from ARPD in real time and to choose a type of mathematical model for the digital twin of the unit.

Research methods

For realization of the set goal in the article the working conditions and possible states of the mechanical well cleaning unit from ARPD are considered. A comparative analysis of several methods of mathematical models synthesis most often used in the oil and gas industry is carried out.

Results

The diagnostic diagram of the unit state in real time is developed, which allows estimating the probability of occurrence of specific abnormal or emergency situations. It is established that the most expedient methods for modeling of the state diagnostics for mechanical cleaning unit from ARPD are methods based on fuzzy logic using Mamdani algorithm and neural networks of multilayer perceptron class.

Keywords

asphalt-resin-paraffin deposits, ARPD, oil well, fuzzy logic method, Mamdani algorithm, neural network, multilayer perceptron

For citation: Fedorov S. N., Kolovertnov G. Yu., Krasnov A. N., Prakhova M. Yu. Diagnosticheskaya diagramma sostoyaniya ustanovki mekhanicheskoy ochkistki skvazhiny [Diagnostic Diagram of State of Well Mechanical Cleaning Unit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 98-110 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-98-110>.

Введение

Основная часть нефтяных месторождений России на сегодняшний день находится на последней, поздней стадии разработки, что характеризуется увеличением доли трудноизвлекаемых запасов нефти (ТИЗН). Россия обладает наибольшей долей запасов в этой области — 22 % от мировых запасов ТИЗН [1, 2]. Завершающая стадия эксплуатации характеризуется снижением давления пластовой жидкости и давления на заборе жидкости, что приводит к значительному повышению интенсивности образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО). На рисунке 1 показано увеличение доли скважин, осложненных АСПО, в общем фонде скважин с высоковязкой нефтью (ВВН).

Главный фактор образования АСПО — падение температуры жидко-

сти. В результате АСПО, кристаллизуясь на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ), уменьшают их рабочее сечение, вследствие чего падает дебит нефти, а количество потребляемой электроэнергии увеличивается. При наихудшем сценарии возможно образование парафиновой пробки, в таком случае эксплуатацию скважины приходится полностью останавливать для очистки оборудования от парафина. Такие инциденты не только повышают вероятность выхода из строя насосного оборудования, но и могут привести к утечкам нефти на землю, что создает риск возникновения пожаров, становится причиной жертв, серьезных экологических загрязнений и значительных финансовых потерь.

В нефтедобыче для предотвращения и борьбы с АСПО используются различные методы. Непосредственно для уда-

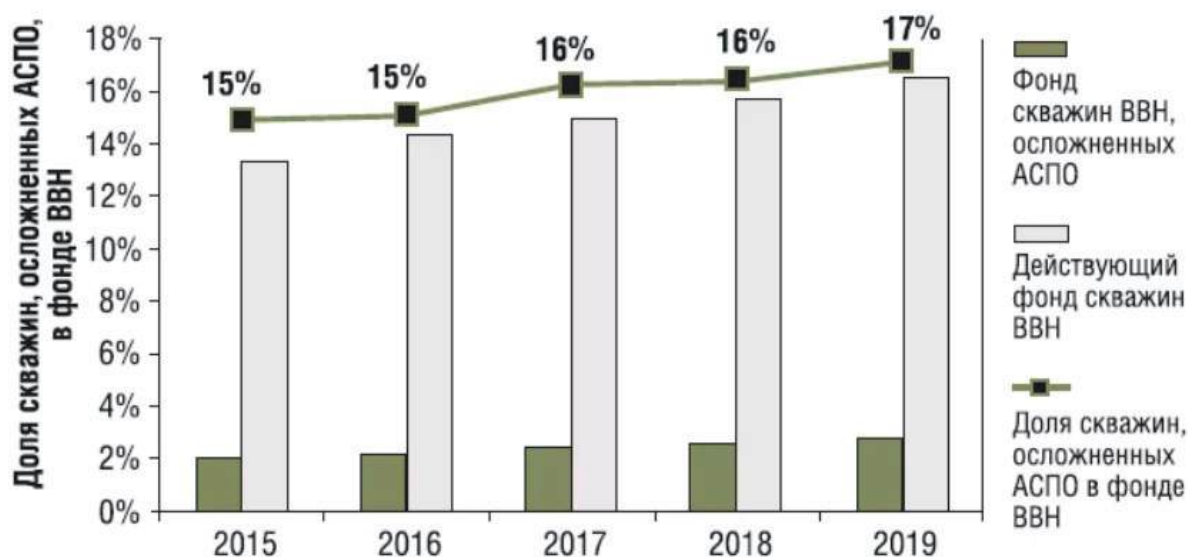


Рисунок 1. Увеличение доли скважин, осложненных АСПО, в общем фонде скважин РФ с высоковязкой нефтью

Figure 1. Increase in the share of wells complicated with asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD) in the total number of high-viscosity oil wells in Russia

ления АСПО используются тепловые, химические и механические методы [3–5].

Механические методы предполагают удаление уже образовавшихся АСПО на НКТ. В этом случае механическая очистка проводится с использованием скребков разных конструкций, входящих в состав установки для очистки скважин от АСПО. Для выполнения процедуры очистки устройство опускается в НКТ благодаря собственному весу и подвешенных к нему грузов, а на поверхность извлекается с помощью лебедки.

Частота спуска и подъема скребков внутри скважины для очистки АСПО зависит от дебита скважины, содержания АСПО в нефти, термобарических условий и т.д.

Преимуществами использования скребков являются простота реализации и малые затраты по сравнению с другими методами вкупе с высокой эффективностью очистки, что позволяет без существенных затрат увеличить дебит и межремонтный период работы скважин [6, 7].

Однако, как любое механическое устройство с подвижными частями, скребок часто создает аварийные ситуации из-за заклинивания скребка в НКТ или обрыва проволоки.

Тем не менее, на большинстве месторождений наиболее эффективным и экономичным методом борьбы с АСПО считается именно механический метод очистки скребками. Поэтому его усовершенствование с помощью внедрения цифровых технологий является актуальной научно-практической задачей.

Цель исследования

Проведение непрерывного мониторинга процесса очистки скважин от АСПО возможно с помощью цифрового двойника (ЦД) для диагностирования состояния установки и процесса очистки

скважин — виртуального аналога физического устройства для очистки НКТ. С помощью такого цифрового двойника можно не только оперативно следить за состоянием самого устройства очистки, но и прогнозировать аварийные ситуации, например возможный обрыв троса лебедки. Для построения ЦД необходимо иметь диагностическую диаграмму, позволяющую оценивать состояние установки для очистки от АСПО в реальном времени.

Цель данных исследований — разработка такой диагностической диаграммы и выбор вида математической модели для цифрового двойника установки.

Известные решения

В российской нефтедобыче активно внедряются методы математического моделирования и цифровые технологии для повышения эффективности разработки и эксплуатации нефтяных месторождений.

Исследования, результаты которых приведены в работах [8, 9], направлены на прогнозирование и моделирование накопления АСПО в добывающих скважинах на нефтяных месторождениях Пермского края. При помощи PVT анализа с применением программного комплекса PVTsim и имитационных гидравлических моделей подъема жидкости из пласта через скважину на поверхность выполнено моделирование процессов образования парафиновых отложений, сформулированы рекомендации и определен алгоритм действий для эффективной профилактики и борьбы с образованием парафиновых отложений, что критически важно для поддержания стабильной работы нефтедобывающих скважин. Процесс симуляции позволяет определить точные координаты образования отложений, максимальную толщину парафиновых слоев, а также величину накопления и распределение пара-

фина по стенкам и в пространстве НКТ, включая участки в применяемой обсадной колонне. Использование методики цифрового моделирования позволило рассчитать регулярность процедур запуска скребков и обработки скважин высокотемпературной нефтью. Полученная зависимость была протестирована на 150 скважинах. Итоги численного моделирования процесса образования парафина позволили уменьшить межремонтный период отбраковки для 111 скважин (74 %), что говорит о высокой точности разработанного метода.

Программа «Инженерный симулятор технологических процессов» [10, 11] включает в себя динамический симулятор движения многофазных систем по эксплуатационным колоннам нефтяных месторождений и трубопроводам на поверхности. Разработанная модель дает возможность решать следующие задачи: выполнять расчеты в статике и динамике движения смеси газа и жидкости внутри скважины и трубопроводах, проложенных над землей; выбирать оптимальный насос для скважины; выполнять гидравлические вычисления максимальной возможной пропускной способности систем сбора и транспортировки нефти, систем сохранения пластового давления и систем транспортировки газа; моделировать и предугадывать отложения АСПО, образование гидратов, солей и шламов. «Инженерный симулятор» позволяет программно имитировать физический процесс добычи нефти и газа на скважине с восстановлением реальных координат месторождений и нефтепроводов, их геометрической конструкции, а также стандартных размеров и характеристик применяемого оборудования [12, 13].

Можно также отметить следующие математические модели:

- модель для анализа эффективности применения ультразвуковой технологии в борьбе с АСПО, результатом моде-

лирования является программа, вычисляющая профиль температуры и перемещение фронта плавления парафина в скважине [14];

- модель теплопроводности эффективной среды для симуляции образования АСПО в подводных нефтепроводах, результатом моделирования является определение участка нефтепровода с максимальным скоплением АСПО и анализ изменения толщины этих отложений на внутренней стороне трубы [15];

- программа симуляции процесса очистки скважин от АСПО с использованием метода термической обработки, которая выполняет расчеты необходимого количества теплоносителя и оптимальной температуры для нагревания нефтепроводной колонны, учитывая температуру плавления АСПО и условия удаления отложений через выкидную систему месторождения, а также рассчитывает межочистный период для конкретного объекта. Инструменты визуализации обеспечивают анализ эффективности и скорости растворения АСПО, а также оценку степени удаления отложений после применения растворителя [16–18].

Что же касается моделирования работы самих очистных устройств (т.е. изучение траектории скребков в потоках нефти), то такие исследования практически не проводились за исключением работы [19], посвященной моделированию движения средств очистки в трубопроводе.

В этой работе механика движения скребка в трубопроводе описывается через динамические системы уравнениями второго порядка, отражающими принципы динамики Ньютона. В модели учитываются переменные силы: давления, обусловленная действием насосной станции, которая генерирует поток нефти под заданным напором в контексте конфигурации площади сечения

трубы; трения, зависящая от материального взаимодействия скребка с трубной стенкой, а также массы устройства и его расположения относительно горизонта; и тяжести, значимость которой определяется как функция массы скребка и угла наклона трубы [20]. Также учитывается объем жидкости, протекающей через поршень, в силу расположения оборудования для очистки и диагностики в потоке нефти на значительном удалении от внутренней стенки трубопровода.

Применение модели ограничено из-за ее простоты и неполноты описания. Кроме того, траектории и характер движения скребка в трубопроводе и скважине существенно различаются, поэтому можно сделать вывод, что моделирование работы установки для механической очистки скважины от АСПО является новой и нетривиальной задачей.

Диагностическая диаграмма состояния установки очистки скважины от АСПО

Эта диаграмма необходима для понимания того, в какие моменты работы устройства формируются данные, необходимые для экспресс-оценки его состояния. В дальнейшем при построении цифрового двойника сбор и обработка данных именно в эти моменты позволит выявлять внештатные состояния установки очистки скважин в реальном времени.

Для разработки диагностической диаграммы, прежде всего, необходимо определить, какие операции выполняются при эксплуатации установки очистки скважины.

В процессе механической очистки скважины за один цикл могут происходить следующие события [21]:

- задание входных технологических параметров (уровней спуска, парковки скребка);

- включение электроцентробежного насоса (ЭЦН) перед спуском;
- спуск скребка с преодолением препятствий;
- калибровка устройства;
- подъем скребка с преодолением препятствий;
- калибровка устройства;
- останов лебедки;
- аварийная остановка устройства очистки скважины.

Нормы технологических параметров определяются относительно того, в каком состоянии пребывает установка.

Эксплуатация установки очистки скважины не может быть выполнена без его запуска, ввода заданных входных значений и включения оборудования. Соответственно, в ходе работы установки очистки скважины определяется то, в каком состоянии пребывают её узлы, корректно ли выполняется технологический процесс.

На рисунке 2 приведена диагностическая диаграмма состояний установки очистки скважины. Спуск скребка и его подъём являются наиболее подходящими событиями для диагностики состояния оборудования установки очистки.

На следующем этапе подготовки к разработке цифрового двойника необходимо выбрать метод моделирования диагностики установки для механической очистки скважины с учетом особенностей этого процесса и требований к модели.

Выбор и обоснование метода моделирования диагностики установки для механической очистки скважины

Цифровые двойники на основе регрессионного анализа являются наиболее популярными в нефтегазовой отрасли. Практика их применения основана на данных с объекта, эвристических знаниях о поведении сырья, полупродук-

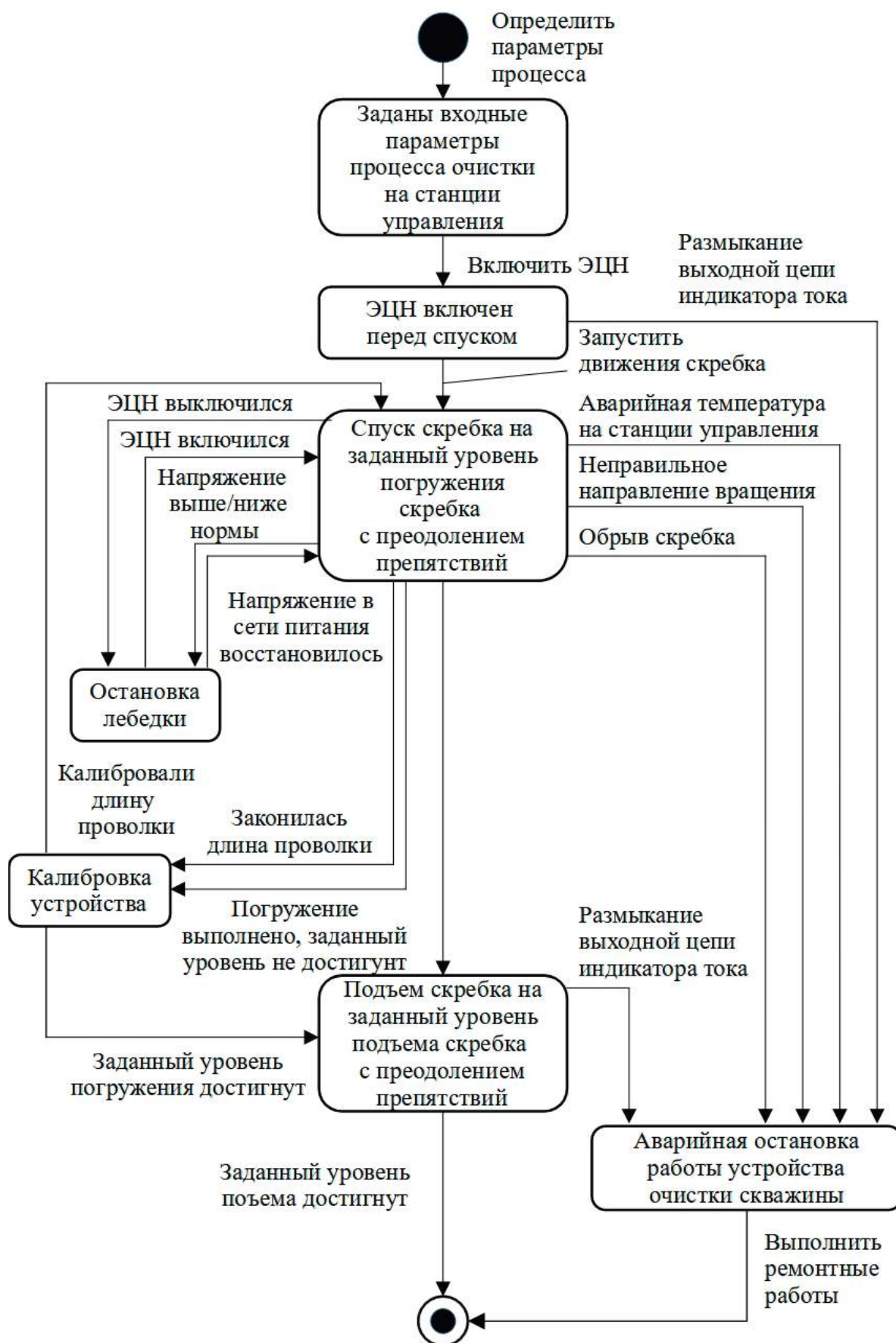


Рисунок 2. Диагностическая диаграмма состояний установки очистки скважины

Figure 2. Diagnostic diagram of the states of the well cleaning unit

тов и продуктов исследуемых объектов [22].

Модель цифрового двойника на основе регрессионного анализа строится путем выполнения:

- корреляционного анализа входных, промежуточных и выходных сигналов;

- применения матричного метода наименьших квадратов для расчёта параметров форм описания взаимосвязи сигналов;

- проверки математических выражений, выполняющих расчёты промежуточных и выходных сигналов, на адекватность.

Необходимые условия для синтеза цифрового двойника какого-либо технологического процесса или объекта на основе регрессионного анализа:

- необходимо, чтобы результаты расчётов параметров моделей соответствовали условию:

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i^{\text{эксп}} - y_i^{\text{расч}})^2 \rightarrow \min,$$

- среднеквадратичное отклонение рассчитываемых выходных сигналов не должно превышать максимальное значение погрешности средств измерения моделируемого объекта.

Математическая модель на основе нечеткой логики представляет собой совокупность расчётных функций, основанных на эмпирических знаниях об объекте, его процессах. Она применима для экспертной системы анализа состояния процесса по текущей группе значений входных сигналов. Для синтеза цифрового двойника на основе нечеткой логики требуется определить нечеткие множества, состоящие из лингвистических переменных описания входных и выходных сигналов [23]. Эта переменная имеет вид:

$$y = \langle \beta, M, X, S, P \rangle,$$

где β — имя лингвистической переменной;

M — множество значений лингвистической переменной;

X — совокупность нечетких переменных;

S — процедура образования новых множеств значений лингвистической переменной;

P — процедура формирования нечеткого множества для каждого множества значений лингвистической переменной.

Каждому термину присваивается область рассуждений, которая интерпретирует его численно.

Нечеткая переменная представляет собой описание переменной в конкретном состоянии и имеет следующий вид:

$$y = \langle \alpha, X, A \rangle,$$

где α — имя нечеткой переменной;

X — область определения нечеткой переменной;

A — нечеткое множество совокупности X .

Функционирование модели на основе нечеткой логики выполняется за счёт использования продукционных правил. Это позволяет построить экспертную систему, которая на основе нечетких данных определяет значение выхода.

Модели нечеткой логики различаются видами применяемых алгоритмов, таких как Мамдани, Сугэно, Ларсена, Цукамото. Для процессов и объектов нефтегазовой отрасли наиболее часто применяют алгоритмы Мамдани и Сугэно [24]. Их разница состоит в том, как формируются продукционные правила и чёткий вывод выходных сигналов из нечетких входных.

Модель на основе нейронной сети представляет собой совокупность функций активации, способных интерпретировать состояние применяемых данных. Различают такие основные классы нейронных сетей, применяемых для работы с данными, как многослойный персептрон, рекуррентные и свёрточные сети,

автокодировщики и генеративно-состязательные сети [25].

Результаты сравнения достоинств и недостатков рассмотренных методов синтеза математических моделей приведены в таблице 1.

Таким образом, можно сделать вывод, что для разработки цифрового двойника целесообразно использовать такие

методы моделирования, как *метод на основе нейронной сети класса многослойный персептрон* за счет его преимуществ и возможности ретроспективно вести диагностику состояния устройства очистки скважины, а также *метод нечеткой логики*, так как с помощью него возможно проведение быстрого моделирования сложных динамических систем.

Таблица 1. Результаты анализа методов синтеза математических моделей

Table 1. Results of analysis of the methods for mathematical models synthesis

Наименование метода	Достоинства	Недостатки
Регрессионный анализ	1. Простота в реализации. 2. Эффективность при линейных зависимостях сигналов. 3. Высокая интерпретируемость результатов.	1. Неэффективность при нелинейных зависимостях сигналов. 2. Необходимость исключать выбросы выборок. 3. Зависимость от точности эмпирических данных.
Нечеткая логика	1. Нечувствительность к точности эмпирических данных. 2. Нетребовательность к вычислительным ресурсам. 3. Высокая интерпретируемость результатов.	1. Сложность математического анализа результатов моделирования. 2. Невысокая точность результатов моделирования.
Нейронная сеть	1. Большое количество вариантов моделирования объекта, процессов. 2. Возможность адаптации моделей к поступающим на вход данным. 3. Эффективность для линейных и нелинейных зависимостей сигналов.	1. Сложность интерпретации результатов. 2. Большие временные затраты на подготовку моделей.

Выводы

Как показывает опыт эксплуатации установок для механической очистки скважин от АСПО, на них нередко возникают нештатные и аварийные ситуации. Повысить надежность эксплуатации установки можно за счет внедрения цифровых технологий, в частности создания цифрового двойника для диагностики состояния установки в режиме реального времени.

Разработанная диагностическая диаграмма состояний фактически является алгоритмом диагностики, позволяющим определить требования к виду математической модели, на основе которой наиболее целесообразно построить цифровой двойник. В результате сравнительного анализа нескольких методов моделирования рекомендовано использовать модель на основе нечеткой логики с использованием алгоритма Мамдани или на основе нейронных сетей класса многослойный персептрон.

Список источников

1. Раупов И.Р., Сытник Ю.А. Повышение нефтеотдачи пласта на месторождениях высоковязкой и сверхвязкой нефти: современное состояние технологий // NEFTEGAZ.RU. 2022. № 7 (127). С. 14–22. EDN: KCLSGI.
2. Раупов И.Р., Бурханов Р. Н., Лутфуллин А.А., Максютин А. В. и др. Локализация и вовлечение в разработку остаточных извлекаемых запасов многопластового нефтяного месторождения // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 599–612. EDN DKXZSP.
3. Персиянцев М.Н. Добыча в осложненных условиях. М.: ООО НедраБизнесцентр, 2000. 653 с. ISBN 5-8365-0052-5.
4. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and Removing Wax Deposition inside Vertical Wells: a Review // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2019. Vol. 9, No. 3. P. 2091–2107. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0609-x>.
5. Mangura A.M., Mangura S.I. Effect of Magnetic Field on Asphalt, Resin, Paraffin and Salt Deposits. URL: <https://paper.researchbib.com/view/paper/83987> (дата обращения: 23.03.2025).
6. Алшавка Х.Х. Пути решения проблемы очистки нефтепроводов от парафина и других отложений // Теория и практика современной науки. 2021. № 4. С. 36–40. EDN: HAVIJG.
7. Krasnov A.N., Khoroshavina E.A., Prakhova M.Yu. Preventing Paraffination of Pumping Equipment of Oil Wells // Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017). Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. P. 370–375. DOI: 10.2991/aime-17.2017.60.
8. Мартюшев Д.А. Моделирование и прогнозирование отложений асфальтеносмолопарафиновых веществ в нефтедобывающих скважинах // Георесурсы. 2020. № 4. С. 86–92. DOI: 10.18599/grs.2020.4.86-92. EDN: OLHWTL.
9. Кравцов С.А. Моделирование условий и прогноз образования АСПО отложений в скважинах // Совершенствование методологии познания в целях развития науки: сб. ст. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. Челябинск: ООО «Агентство международных исследований». 2023. С. 24–27. EDN: XNOMJF.
10. Илюшин П.Ю., Вяткин П.Ю., Козлов А.В., Вотинова А.О. Верификации модели парафинообразования на основе лабораторных исследований проб флюида из забоя и устья скважины // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6(134). С. 19–30. DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-6-19-30. EDN: YCHNQL.
11. Чеботников В.А., Галикеев Р.М. Моделирование образования АСПО на стенках насосно-компрессорных труб в зависимости от различных параметров режима работы // Нефтепромысловое дело. 2020. № 4. С. 44–47. EDN: LMCXSN.
12. Титова А.В., Макаров С.С. Математическое моделирование образования асфальтосмолопарафиновых отложений в скважине // Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли: сб. тез. Всеросс. науч.-техн. конф. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова. 2021. С. 168–171. EDN: LEIVGO.
13. Бандалетова А.А. Моделирование динамики парафиноотложений в системе нефтесбора // Бурение и нефть. 2019. № 7–8. С. 70–75. EDN: UXGHYK.
14. Морозов Г.А., Орлов И.Г., Шакиров А.С. Модели микроволновых технологий очистки труб от асфальтосмолопарафиновых отложений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 13, № 3. С. 125–130. EDN: MWFTGF.
15. Хасанов И.И., Шакиров Р.А., Гильмутдинов Т.Д. Применение модели эффективной среды теплопроводности для моделирования выпадения АСПО в морских нефтепроводах // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. № 1. С. 17–23. DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10104.
16. Ибрагимов Н.Г., Ланчаков Г.А., Васильев В.И., Хабибуллин З.А. Обобщение промысловых данных и моделирование удаления АСПО в процессе тепловых обработок скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2019. № 6. С. 203. EDN: SMSIKD.
17. Блябляс А.Н. AI-подход к борьбе со скважинными осложнениями // Газовая промышленность. 2019. № 4. С. 16–21. EDN: YWRMJY.
18. Coutinho J.A.P., Pauly J., Daridon J.L. A Thermodynamic Model to Predict Wax Formation in Petroleum Fluids // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2001. Vol. 18, No. 4. P. 411–422. DOI: 10.1590/S0104-66322001000400006.
19. Калашников П.К., Кувичко А.М. Моделирование движения средств очистки и диагностики по участку нефтепровода // Записки Горного института, 2020. № 181. С. 127–128. EDN: KZXLPLZ.

20. Федоров С.Н., Набиев Д.Д. Экспериментальные исследования процесса спуска и подъема скребка в колонне НКТ // Перспективы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: сб. ст. VIII Всеросс. науч.-практ. конф. Уфа: УГНТУ, 2019. С. 191-196.

21. Leontaritis K.J. Wax Deposition Envelope of Gas Condensates // Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. 1997. Vol. 3. P. 341–348. DOI: 10.4043/8776-MS.

22. Fedorov S.N., Kolovertnov G.Yu., Krasnov A.N., Prakhova M.Yu. Digital Twins in the Oil and Gas Industry: Experience and Prospects of Use. Proceedings of the International Science Conference «Science. Education. Practice» (March 26, 2025). Delhi, India, 2025. P. 116–123. DOI: 10.34660/conf.2025.33.88.032/.

23. Веревкин А.П., Кирюшин О.В., Павлова З.Х. Метод синтеза сложных логических управляющих устройств с переменными булевой и нечеткой логик // Датчики и системы. 2022. № 12(220). С. 10-14. EDN: ZXDVKH.

24. Sinitsyn A.V., Lisay N. Yu., Selivanov S.A., Sinitsyn A.A. Development the Information Systems with Fuzzy Logic Algorithms and Network Optimization // Information and Innovations. 2023. Vol. 18, No. 2. P. 33-47. DOI: 10.31432/1994-2443-2023-18-2-33-47.

25. Zadeh L.A., Aliev R.A. Fuzzy Logic Theory and Applications. New Jersey: World Scientific, 2018. DOI: 10.1142/10936.

References

1. Raupov I.R., Sytnik Yu.A. Povyshenie nefteotdachi plasta na mestorozhdeniyakh vysokovyazkoi i sverkhvyazkoi nefti: sovremennoe sostoyanie tekhnologii [Enhanced Oil Recovery at High-Viscosity and Extra-Viscous Oil Fields: Current State of Technology]. NEFTEGAZ.RU — NEFTEGAZ.RU, 2022, No. 7 (127), pp. 14–22. EDN: KCLSGI. [in Russian].

2. Raupov I.R., Burkhanov R. N., Lutfulin A.A., Maksyutin A.V. e.a. Lokalizatsiya i вовлечение v razrabotku ostatochnykh izvlekaemykh zasobov mnogoplastovogo neftyanogo mestorozhdeniya [Localization and Involvement in Development of Residual Recoverable Reserves of a Multilayer Oil Field]. Zapiski Gornogo instituta — Journal of Mining Institute, 2024, Vol. 268, pp. 599–612. EDN DKXZSP. [in Russian].

3. Persiyantsev M.N. Dobycha v oslozhnennykh usloviyakh [Mining in Challenging Environments].

Moscow, OOO NedraBiznestsentr, 2000. 653 p. ISBN 5-8365-0052-5. [in Russian].

4. Sousa A.L., Matos H.A., Guerreiro L.P. Preventing and Removing Wax Deposition inside Vertical Wells: a Review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, Vol. 9, No. 3, pp. 2091–2107. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0609-x>.

5. Mangura A.M., Mangura S.I. Effect of Magnetic Field on Asphalt, Resin, Paraffin and Salt Deposits. URL: <https://paper.researchbib.com/view/paper/83987> (accessed 23.03.2025).

6. Alshavka Kh.Kh. Puti resheniya problemy ochistki nefteprovodov ot parafina i drugikh otlozhenii [Ways to Solve the Problem of Cleaning Oil Pipelines from Paraffin and Other Sediments]. *Teoriya i praktika sovremennoj nauki — Theory and Practice of Modern Science*, 2021, No. 4, pp. 36–40. EDN: HAVIJG. [in Russian].

7. Krasnov A.N., Khoroshavina E.A., Prakhova M.Yu. Preventing Paraffination of Pumping Equipment of Oil Wells. Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017). Advances in Engineering Research, 2017, Vol. 133, pp. 370–375. DOI: 10.2991/aime-17.2017.60. [in Russian].

8. Martyushev D.A. Modelirovanie i prognozirovaniye otlozhenii asfal'tenosmoloparafinykh veshchestv v neftedobyvayushchikh skvazhinakh [Modeling and Prediction of Asphaltene-Resin-Paraffinic Substances Deposits in Oil Production Wells]. *Georesursy — Georesources*, 2020, No. 4, pp. 86-92. DOI: 10.18599/grs.2020.4.86-92. EDN: OLHWTL. [in Russian].

9. Kravtsov S.A. Modelirovanie uslovii i prognoz obrazovaniya ASPO otlozhenii v skvazhinakh [Modeling of Conditions and Prediction of ARPD Formation in Wells]. *Sbornik statei po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovershenstvovanie metodologii poznaniya v tselyakh razvitiya nauki»* [Collection of Articles on the Materials of the International Scientific and Practical Conference «Improvement of Cognition Methodology for the Development of Science»]. Chelyabinsk, OOO «Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy», 2023, pp. 24-27. EDN: XNOMJF. [in Russian].

10. Ilyushin P.Yu., Vyatkin P.Yu., Kozlov A. V., Votinova A.O. Verifikatsii modeli parafino-obrazovaniya na osnove laboratornykh issledovaniy prob flyuida iz zaboya i ust'ya skvazhiny [Verification of the Paraffin Formation Model Based on Laboratory Studies of Fluid Samples from the Bottom and Wellhead]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov —*

Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, 2021, Issue 6 (134), pp. 19-30. DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-6-19-30. EDN: YCHNQL. [in Russian].

11. Chebotnikov V.A., Galikeev R.M. Modelirovanie obrazovaniya ASPO na stenkakh nasosno-kompressornykh trub v zavisimosti ot razlichnykh parametrov rezhima raboty [Modeling of Asphalt-Resin-Paraffin Formation on Walls of Pump-Compressor Pipes Depending on Various Operation Parameters]. *Neftepromyslovoye delo — Oilfield Engineering*, 2020, No. 4, pp. 44-47. EDN: LMCXSN. [in Russian].

12. Titova A.V., Makarov S.S. Matematicheskoe modelirovanie obrazovaniya asfal'tosmoloparafinovyykh otlozhenii v skvazhine [Mathematical Modeling of Asphalt-Resin-Paraffin Deposits Formation in a Well]. *Sbornik tezisev Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy energomashinostroeniya, neftyanoi i gazovoi otrasli»* [Collection of Abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Actual Issues of Power Engineering, Oil and Gas Industry»]. Izhevsk, Izhevskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni M.T. Kalashnikova, 2021, pp. 168-171. EDN: LEIVGO. [in Russian].

13. Bandaletova A.A. Modelirovanie dinamiki parafinootlozhenii v sisteme neftesbora [Modeling of Paraffin Deposition Dynamics in Oil Gathering Systems]. *Burenie i neft' — Drilling and Oil*, 2019, No. 7-8, pp. 70-75. EDN: UXGHYK. [in Russian].

14. Morozov G.A., Orlov I.G., Shakirov A.S. Modeli mikrovolnovykh tekhnologii oчитki trub ot asfal'tosmoloparafinovyykh otlozhenii [The Models of Microwave Technologies for Treatment of the Tubes from the Asphalt-Tar-Paraffin Deposits]. *Fizika volnovykh protsessov i radio-tekhnicheskie sistemy — Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*, 2020, Vol. 13, No. 3, pp. 125-130. EDN: MWFTGF. [in Russian].

15. Khasanov I.I., Shakirov R.A., Gil'mutdinov T.D. Primenenie modeli effektivnoi sredy teploprovodnosti dlya modelirovaniya vypadeniya ASPO v morskikh nefteprovodakh [Application of Heavy Oil Deposits as Thermal Insulating Layer in Major Pipelines]. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya — Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2019, No. 1, pp. 17-23. DOI: 10.24411/0131-4270-2019-10104. [in Russian].

16. Ibragimov N.G., Lanchakov G.A., Vasil'ev V.I., Khabibullin Z.A. Obobshcheniye promyslovyykh dannyykh i modelirovaniye udaleniya ASPO v protsesse teplovykh obrabotok skvazhin

[Generalization of Field Data and Modeling of ARPD Removal in the Process of Thermal Treatment of Wells]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — Oil and Gas Studies*, 2019, No. 6, pp. 203. EDN: SMSIKD. [in Russian].

17. Blyablyas A.N. AI-podkhod k bor'be so skvazhinnyimi oslozhneniymi [Application of Artificial Intelligence Approach to the Well Complication Control]. *Gazovaya promyshlennost' — Gas Industry*, 2019, No. 4, pp. 16-21. EDN: YWRMJY. [in Russian].

18. Coutinho J. A. P., Pauly J., Daridon J. L. A Thermodynamic Model to Predict Wax Formation in Petroleum Fluids. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2001, Vol. 18, No. 4, pp. 411-422. DOI: 10.1590/S0104-66322001000400006.

19. Kalashnikov P.K., Kuvichko A.M. Modelirovanie dvizheniya sredstv oчитki i diagnostiki po uchastku nefteprovoda [Modeling of the Movement of Cleaning and Diagnostic Means along the Oil Pipeline Section]. *Zapiski Gornogo instituta — Journal of Mining Institute*, 2020, No. 181, pp. 127-128. EDN: KZXLPZ. [in Russian].

20. Fedorov S.N., Nabiev D.D. Eksperimental'nye issledovaniya protsessa spuska i pod'ema skrebka v kolonne NKT [Experimental Studies of the Scraper Descending and Lifting Process in the Tubing String]. *Sbornik statei VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Perspektivy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov dobychi, transporta i pererabotki nefti i gaza»* [Collection of Articles of VIII All-Russian Scientific-Practical Conference «Prospects of Automation of Technological Processes of Oil and Gas Production, Transportation and Processing»]. Ufa, USPTU Publ., 2019, pp. 191-196. [in Russian].

21. Leontaritis K.J. Wax Deposition Envelope of Gas Condensates. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 1997, Vol. 3, pp. 341-348. DOI: 10.4043/8776-MS.

22. Fedorov S.N., Kolovertnov G.Yu., Krasnov A.N., Prakhova M.Yu. Digital Twins in the Oil and Gas Industry: Experience and Prospects of Use. *Proceedings of the International Science Conference «Science. Education. Practice» (March 26, 2025)*. Delhi, India, 2025, pp. 116-123. DOI: 10.34660/conf.2025.33.88.032/.

23. Verevkin A.P., Kiryushin O.V., Pavlova Z.Kh. Metod sinteza slozhnykh logicheskikh upravlyayushchikh ustroystv s peremennymi bulevoi i nechetkoi logik [Synthesis Method of the Complex Logic Control Devices with the Variables of the Boolean and Fuzzy Logic]. *Datchiki i sistemy*

— *Sensors & Systems*, 2022, No. 12 (220), pp. 10-14. EDN: ZXDVKH. [in Russian].

24. Sinitsyn A.V., Lisay N.Yu., Selivanov S.A., Sinitsyn A.A. Development the Information Systems with Fuzzy Logic Algorithms and Network Optimization. *Information and Innovations*, 2023,

Vol. 18, No. 2, pp. 33-47. DOI: 10.31432/1994-2443-2023-18-2-33-47.

25. Zadeh L.A., Aliev R.A. Fuzzy Logic Theory and Applications. New Jersey, *World Scientific*, 2018. DOI: 10.1142/10936.

Статья поступила в редакцию 14.04.2025; одобрена после рецензирования 23.04.2025; принята к публикации 30.04.2025.

The article was submitted 14.04.2025; approved after reviewing 23.04.2025; accepted for publication 30.04.2025.

Научная статья

УДК 004.932.4

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-111-122

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К УЛУЧШЕНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ОСНОВЕ РЕТИНЕКСА И РЕКУРРЕНТНЫХ СВЕРТОЧНЫХ СЕТЕЙ

**Алексей Эдуардович Бадамшин****Alexey E. Badamshin**

студент кафедры

«Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Максим Евгеньевич Рузанов****Maxim E. Ruzanov**

студент кафедры

«Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Фанур Анурович Баязитов****Fanur A. Bayazitov**

ассистент кафедры

«Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**Екатерина Владимировна Филиппова****Ekaterina V. Filippova**

студент кафедры «Корпоративные финансы и учетные технологии»,

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

Актуальность

Современные задачи компьютерного зрения часто сталкиваются с проблемами шумов, искажения цветопередачи и потери детализации, что ограничивает их применимость в реальных сценариях. Существующие подходы, включая гистограммные преобразования и методы на основе глубокого обучения, демонстрируют либо недостаточную адаптивность к непостоянным уровням освещения, либо высокую вычислительную сложность. Это создает потребность в гибридных решениях, объединяющих преимущества классических и нейросетевых методов для повышения эффективности и универсальности.

Ключевые слова

улучшение изображений, низкая освещенность, ретинекс, рекуррентные CNN, гибридные модели

Цель исследования

Исследовать гибридный метод улучшения изображений в условиях низкой освещенности, сочетающий адаптивность многомасштабного ретинекса (MSR-net) с возможностями рекуррентных сверточных нейронных сетей (gruCNN) для интеграции временных зависимостей. Задача состоит в преодолении ограничений базовых методов, таких как недостаточная обработка динамических сцен и неспособность сохранять структурную целостность объектов при коррекции освещения.

Методы исследования

Для достижения цели предложена гибридная архитектура, объединяющая два ключевых компонента: многомасштабный ретинекс (MSR-net), который обеспечивает адаптивную коррекцию освещения на разных пространственных масштабах, минимизируя переосвещение и потерю контраста, и рекуррентная сверточная сеть gruCNN, которая интегрирует механизмы временной памяти (на основе GRU-блоков) для учета последовательных кадров в видео или связанных изображений, что улучшает устойчивость к шумам и артефактам. Эксперименты проведены на наборах данных LOL (с акцентом на низкую освещенность) и CIFAR-10 (для оценки общей Robustness). В качестве метрик использованы SSIM (структурное сходство) и PSNR (пиковое отношение сигнала к шуму), обеспечивающие комплексную оценку качества.

Результаты

Гибридная модель, объединяющая методы, разработанные Чэнь Вэй-Тингом и Чжан Юнхуа, превзошла традиционные и нейросетевые подходы в улучшении изображений при низкой освещенности. На датасете LOL достигнуто SSIM 0.89 и PSNR 28.6 dB, опередив RetinexNet на 12 % и 18 % соответственно. Модель эффективно восстанавливает детали, подавляет шумы и сохраняет естественность изображений. Благодаря GRU-блокам снижено мерцание видео на 22 %. Перспективы развития модели позволяют обрабатывать изображения в условиях экстремально низкой освещенности и работать с мультиспектральными изображениями. Благодаря высокой точности восстановления деталей и стабильности при обработке видео модель может подходить для систем автономного вождения, где критична контекстная информация, и задач видеонаблюдения, требующих надежной работы в реальном времени.

Для цитирования: Бадамшин А. Э., Рузанов М. Е., Баязитов Ф. А., Филиппова Е. В. Гибридный подход к улучшению изображений в условиях низкой освещенности на основе ретинекса и рекуррентных сверточных сетей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 111-122. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-111-122>.

Original article

A HYBRID APPROACH TO IMAGE ENHANCEMENT IN LOW-LIGHT CONDITIONS BASED ON RETINEX AND RECURRENT CONVOLUTIONAL NETWORKS

Relevance

Modern computer vision tasks often face problems with noise, color distortion, and loss of detail, which limits their applicability in real-world scenarios. Existing approaches, including histogram transformations and deep learning-based methods, demonstrate either insufficient adaptability to variable lighting levels or high computational complexity. This creates

Keywords

image enhancement, low-light, retinex, recurrent CNN, hybrid models

the need for hybrid solutions that combine the advantages of classical and neural network methods to increase efficiency and versatility.

Aim of research

The main aim of the research is to investigate a hybrid image enhancement method in low-light conditions that combines the adaptivity of multiscale retinex (MSR-net) with the capabilities of recurrent convolutional neural networks (gruCNN) to integrate time dependencies. The task is to overcome the limitations of the basic methods, such as insufficient processing of dynamic scenes and the inability to maintain the structural integrity of objects when correcting lighting.

Research methods

To achieve this goal, a hybrid architecture is proposed that combines two key components: multiscale retinex (MSR-net), which provides adaptive illumination correction at different spatial scales, minimizing over-illumination and contrast loss, and the recurrent convolutional network gruCNN, which integrates temporary memory mechanisms (based on GRU blocks) to account for consecutive frames in a video. or related images, which improves resistance to noise and artifacts. The experiments were carried out on LOL datasets (with an emphasis on low illumination) and CIFAR-10 (to assess overall Robustness). SSIM (structural similarity) and PSNR (peak signal-to-noise ratio) were used as metrics, providing a comprehensive quality assessment.

Results

The hybrid model, combining the methods of Chen Wei-Ting and Zhang Yunhua, surpassed traditional and neural network approaches in improving images in low light conditions. On the LOL dataset, it reached SSIM 0.89 and PSNR 28.6 dB, beating RetinexNet by 12 % and 18 %, respectively. The model effectively restores details, suppresses noise, and preserves the naturalness of images. Thanks to the GRU blocks, it reduced video flickering by 22 %. The model's development prospects will enable image processing in extremely low-light conditions and multispectral imaging. Due to its high accuracy of detail restoration and stability in video processing, the model may be suitable for autonomous driving systems where contextual information is critical, and video surveillance tasks that require reliable operation in real time.

For citation: Badamshin A. E., Ruzanov M. E., Bayazitov F. A., Filippova E. V. Gibridnyy podkhod k uluchsheniyu izobrazheniy v usloviyakh nizkoy osveshchennosti na osnove retineksa i rekurrentnykh svertochnykh setey [A Hybrid Approach to Image Enhancement in Low-Light Conditions Based on Retinex and Recurrent Convolutional Networks]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 111-122 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-111-122>.

Введение

Обнаружение объектов на открытой местности при непостоянной освещённости остаётся актуальной задачей и по сей день. Существует множество различных традиционных способов решения задачи обработки изображений: адаптивная бинаризация, выравнивание гистограммы, фильтрация и сегментация, цветовые пространства. Однако эти под-

ходы демонстрируют ограниченную эффективность в условиях динамического освещения, резкие перепады яркости, тени и блики существенно искажают структуру объектов, затрудняя их идентификацию.

В данной работе рассматривается гибридный подход, объединяющий многомасштабный ретинекс (MSR) и рекуррентные сверточные сети (RCNN).

1 Retinex

1.1 История создания

Теория Retinex была предложена Эдвином Лэндом в 1971 году для объяснения механизмов цветового постоянства в человеческом зрении [1]. Лэнд, известный как создатель фотоаппарата Polaroid, доказал, что восприятие цвета зависит не только от спектрального состава света, но и от контекста — отражательной способности объектов и их окружения. В 1990-х годах метод был адаптирован для обработки изображений, что привело к появлению многомасштабного Retinex (MSR) — алгоритма, разделяющего изображение на освещение и отражательную компоненту. Этот подход стал основой для дальнейшего развития методов улучшения изображений, особенно в условиях низкой освещённости.

1.2 Принцип работы

Алгоритм Retinex, основанный на принципах имитации устройства рецепторов сетчатки человека, моделирует чувствительные области отдельных ней-

ронов и процесс восприятия с помощью функции окружения $F(x, y)$:

$$F(x, y) = K \times e^{\frac{-x^2+y^2}{c^2}},$$

где (x, y) — координаты текущего пикселя;

c — постоянная Гаусса;

K — множитель.

Главная цель алгоритма Retinex заключается в разделении исходного изображения S на два: R -компонента, отвечающая за отражение, и I -компонента, отвечающая за освещение [2].

На рисунке 1 продемонстрирован пример работы алгоритма Retinex. Таким образом, после обработки и преобразования компонентов изображения можно компенсировать артефакты видеопоследовательности, что приведет к повышению уровня детализации объектов.

1.3 Преимущества и недостатки

Преимущества:

— *эффективная коррекция глобального освещения.* Метод Retinex моделирует восприятие человеческого глаза, учитывая адаптацию к изменениям освеще-



a)



b)

Рисунок 1. Алгоритм Retinex: исходное изображение (a), результат обработки алгоритмом Retinex (b)

Figure 1. Retinex algorithm: original image (a), result of processing by Retinex algorithm (b)

щения. Он помогает скорректировать изображения, снятые в условиях неравномерного освещения, восстанавливая детали в затемненных или пересвеченных областях;

— *улучшение контрастности в затемненных областях*. Retinex улучшает видимость деталей в тенях, делая их более отчетливыми. Это особенно полезно для изображений с высокой динамической контрастностью, таких как фотографии, сделанные при плохом освещении или в условиях сильных перепадов яркости.

Недостатки:

— *артефакты (гало, шумы) при экстремально низкой освещенности*. При агрессивной обработке изображений могут появляться нежелательные эффекты, такие как гало (светящиеся ореолы вокруг границ объектов) и усиление шумов в темных областях. Это связано с тем, что метод Retinex сильно увеличивает контрастность, что также приводит к усилению шума, присутствующего в изображении;

— *зависимость от ручной настройки параметров (например масштабов гауссовых ядер)*. Качество обработки изображения сильно зависит от выбора параметров, таких как размер гауссовых ядер в многомасштабных версиях Retinex. Неправильный подбор параметров может привести либо к избыточному сглаживанию, либо к чрезмерному усилению контуров и шумов, что делает метод менее универсальным без тщательной настройки.

2 Свёрточные сети

2.1 История создания

История создания свёрточных нейронных сетей начинается в 1980-х годах, когда Ян Лекун разработал основные концепции CNN, вдохновленный организацией зрительной коры головного мозга. Одним из первых практических

применений этих сетей стало распознавание рукописных цифр и букв. В 1987 году Алекс Вайбель и его коллеги представили нейронную сеть с временной задержкой (TDNN), одну из ранних свёрточных архитектур для обработки временных данных. Крупный прорыв в развитии свёрточных сетей произошел в 2012 году с созданием AlexNet — сети, которая показала выдающиеся результаты на конкурсе ImageNet, значительно опередив другие методы классификации изображений. Этот успех стал важной вехой в популяризации глубоких нейросетей для задач компьютерного зрения, что впоследствии привело к активному развитию более сложных архитектур, включая рекуррентные свёрточные сети [3].

2.2 Принцип работы

Для работы со свёрточной нейронной сетью необходимо преобразовать картинку в виде N -мерных массивов матриц или чисел, где N — количество каналов (цветов) изображения.

В ходе обработки изображения выполняется умножение пикселей на соответствующие коэффициенты из матрицы фильтра, результаты умножения суммируются. Данный процесс последовательно повторяется по всем пикселям в изображении.

Для каждого пикселя входного изображения I размера $H \times W$ и фильтра F размера $k \times k$ выходное значение $G[i, j]$ вычисляется как:

$$G[i, j] = \sum_{u=-k/2}^{k/2} \sum_{v=-k/2}^{k/2} F[u, v] \times I[i + u, j + v] + b,$$

где $G[i, j]$ — значение пикселя в выходной карте признаков;

F — матрица весов фильтра (ядро свёртки);

b — смещение (bias);

k — нечётный размер фильтра.

CNN автоматически извлекают иерархические признаки через свёрточные слои. Рекуррентные CNN добавляют временные связи, позволяя сети учитывать контекст предыдущих итераций. Например, GRU-слои обновляют скрытые состояния [4]:

$$h_t = GRU(x_t, h_{t-1}),$$

где x_t — вход на шаге t ;

h_{t-1} — предыдущее состояние.

На рисунке 2 продемонстрирован пример работы алгоритма CNN.

2.3 Преимущества и недостатки

Преимущества:

— *устойчивость к шуму.* Свёрточные сети способны эффективно извлекать релевантные признаки даже из зашумленных данных благодаря своим фильтрам, которые учатся распознавать важные характеристики объектов, игнорируя ненужные детали;

— *обработка в реальном времени.*

CNN могут быть оптимизированы для работы с потоковыми данными, что делает их подходящими для применения

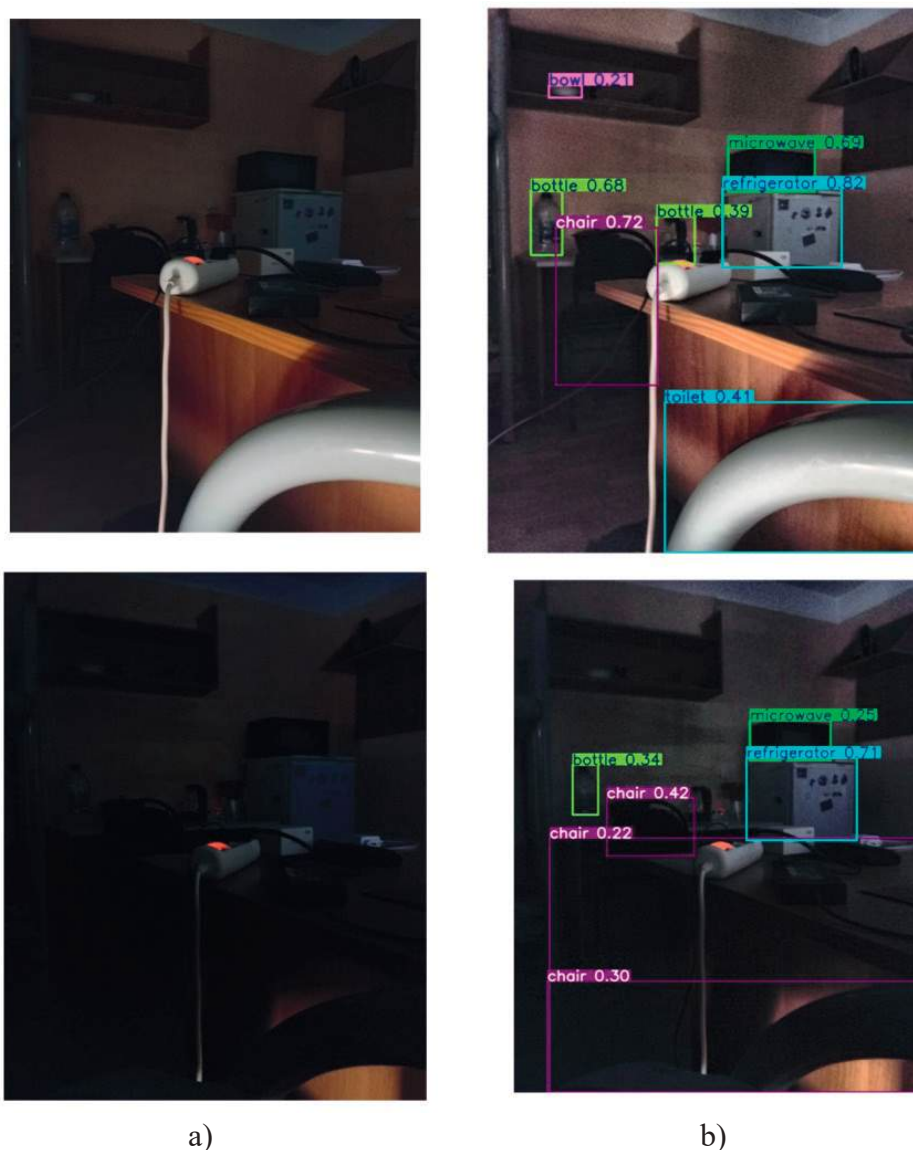


Рисунок 2. Алгоритм CNN: исходное изображение (a), результат обработки алгоритмом R-CNN (b)

Figure 2. CNN algorithm: original image (a), result of processing by R-CNN algorithm (b)

в системах, требующих быстрой обработки, таких как автономные автомобили или видеонаблюдение;

— *автоматическое извлечение признаков*. В отличие от традиционных методов машинного обучения, где признаки обычно создаются вручную свёрточные сети автоматически извлекают многоуровневые признаки из данных, что значительно упрощает процесс разработки модели и повышает её адаптивность;

— *гибкость архитектуры*. CNN можно модифицировать под различные задачи: классификация, сегментация, генерация изображений и другие. Это достигается за счет возможности добавления различных слоёв, таких как полносвязные, рекуррентные или attention-слои.

Недостатки:

— *высокие вычислительные затраты*. Тренировка глубоких свёрточных сетей требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при работе с большими наборами данных или сложными архитектурами. Это может стать ограничением для использования на устройствах с ограниченными возможностями, таких как мобильные телефоны или встраиваемые системы;

— *зависимость от качества данных*. Как и многие другие алгоритмы машинного обучения, CNN чувствительны к качеству входных данных. Недостаточно разнообразные или некорректно помеченные датасеты могут привести к переобучению или плохой обобщающей способности модели;

— *необходимость большого объема данных*. Для достижения высокой точности CNN часто требуется большое количество тренировочных примеров. Без достаточного количества данных модель может не научиться обобщать и давать

правильные предсказания на новых данных;

— *сложность интерпретации*. CNN являются «черным ящиком», то есть сложно понять, какие именно признаки они используют для принятия решений. Это может быть проблемой в критических приложениях, где необходима прозрачность алгоритма, например в медицине или юриспруденции.

3 Гибридный подход к методам

3.1 Концептуальные основы гибридного подхода

Гибридный подход объединяет преимущества теории Retinex (классический метод) и рекуррентных сверточных нейронных сетей (RCNN, метод глубокого обучения), преодолевая ограничения каждого метода. Retinex обеспечивает физически обоснованное разделение изображения на компоненты освещения $L(x, y)$ и отражательной способности $R(x, y)$:

$$I(x, y) = L(x, y) \cdot R(x, y),$$

где $R(x, y) \in [0, 1]$.

Retinex страдает от артефактов (гало, шумы) и зависимости от ручной настройки параметров. RCNN, в свою очередь, автоматически извлекают признаки из данных и обрабатывают временные зависимости через рекуррентные связи (например GRU-слои):

$$h_t = GRU(R_t, h_{t-1}),$$

где R_t — входная отражательная компонента на шаге t ;

h_t — скрытое состояние [5].

3.2 Архитектура гибридной модели

Гибридная модель состоит из нескольких этапов, каждый из которых выполняет определённые задачи для улучшения качества изображения. Ниже подробно описаны основные этапы работы модели.

3.2.1 Этап Retinex

На этапе Retinex выполняется нормализация освещения изображения. Это позволяет устранить неравномерное освещение и улучшить видимость деталей. Для этого используется сеть Multiscale Retinex Network (MSR-net), которая применяется к исходному изображению L [6].

Формально это можно записать следующим образом:

$$L_{norm} = MSR(L),$$

где L — исходное изображение;

MSR — операция, выполняемая сетью MSR-net;

L_{norm} — изображение после нормализации освещения.

На рисунке 3 представлена поэтапная схема этого метода, в которой ФГ — это Гауссовский фильтр «центр-окружение»; оА Retinex — односторонний алгоритм Retinex; MA Retinex — многосторонний алгоритм Retinex; MA Retinex* — многосторонний алгоритм Retinex с восстановлением цвета.

3.2.2 Этап RCNN

На этапе Recurrent Convolutional Neural Network (RCNN) обрабатывается отра-

жательная компонента R , которая содержит информацию о текстах и деталях изображения. Для этого используется рекуррентная сеть Convolutional Gated Recurrent Unit (ConvGRU), которая комбинирует пространственные и временные признаки [7].

Формально процесс можно описать следующим образом:

$$R_{out} = ConvGRU(R_{in}, h_{t-1}),$$

где R_{in} — входная отражательная компонента;

h_{t-1} — скрытое состояние на предыдущем шаге;

$ConvGRU$ — сверточный GRU-слой, который обрабатывает данные;

R_{out} — выходная отражательная компонента после обработки.

3.2.3 Синтез изображения

На заключительном этапе происходит синтез финального изображения. Для этого нормализованное изображение L_{norm} умножается на обработанную отражательную компоненту R_{out} . Это позволяет объединить улучшенное освещение и детализированные текстуры.

Формально синтез изображения описывается следующим уравнением:

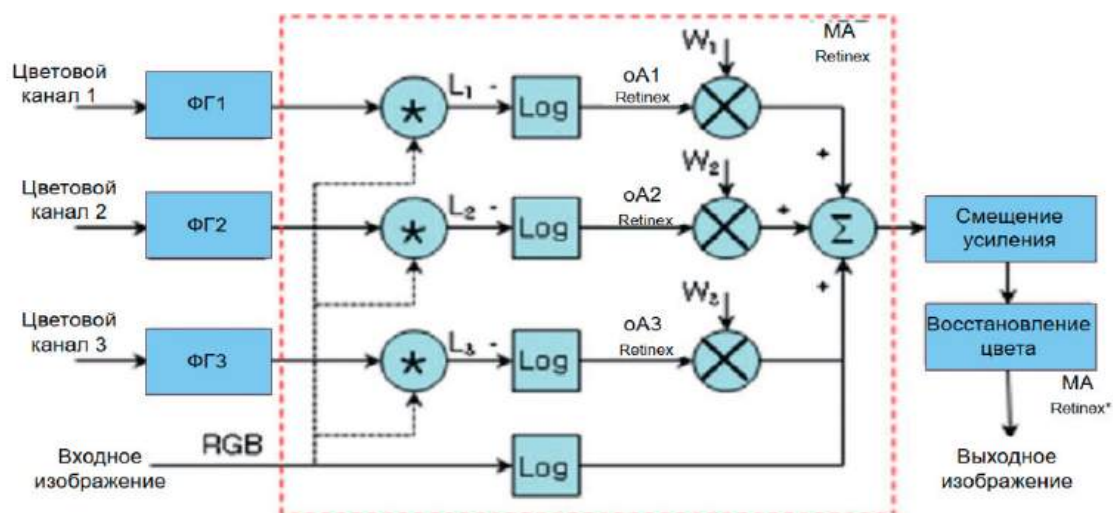


Рисунок 3. Схема алгоритма Retinex

Figure 3. Diagram of the Retinex algorithm

$$I_{final} = L_{norm} \cdot R_{out},$$

где L_{norm} — нормализованное изображение;

R_{out} — обработанная отражательная компонента;

I_{final} — финальное изображение после синтеза.

Демонстрация работы гибридного подхода, объединяющего теорию Retinex и рекуррентные свёрточные нейронные сети (RCNN), представлена на рисунке 4.

Таким образом, совместно применяя классическую теорию Retinex для коррекции освещённости и RCNN для анализа контекста и выделения признаков, можно компенсировать ограничения каждого метода по отдельности. Этот подход позволяет эффективно устранять артефакты, вызванные неравномерным освещением, и добиться значительного улучшения детализации объектов в зоне видимости, что особенно важно для задач компьютерного зрения в сложных условиях съёмки.

3.3 Преимущества гибридного подхода

Гибридный метод объединяет преимущества традиционных алгоритмов обработки изображений и глубоких нейросетей, что позволяет достичь высокой точности при улучшении качества изображений.

— *высокая точность восстановления деталей*: гибридный метод минимизирует потери информации при обработке изображений;

— *эффективное устранение шумов*: использование предварительной обработки улучшает входные данные для нейросетевой модели;

— *сохранение естественности изображений*: гибридный подход снижает артефакты, характерные для отдельных методов.

— *гибкость применения*: метод можно адаптировать для различных типов изображений (медицинская визуализация, спутниковые снимки и др.).

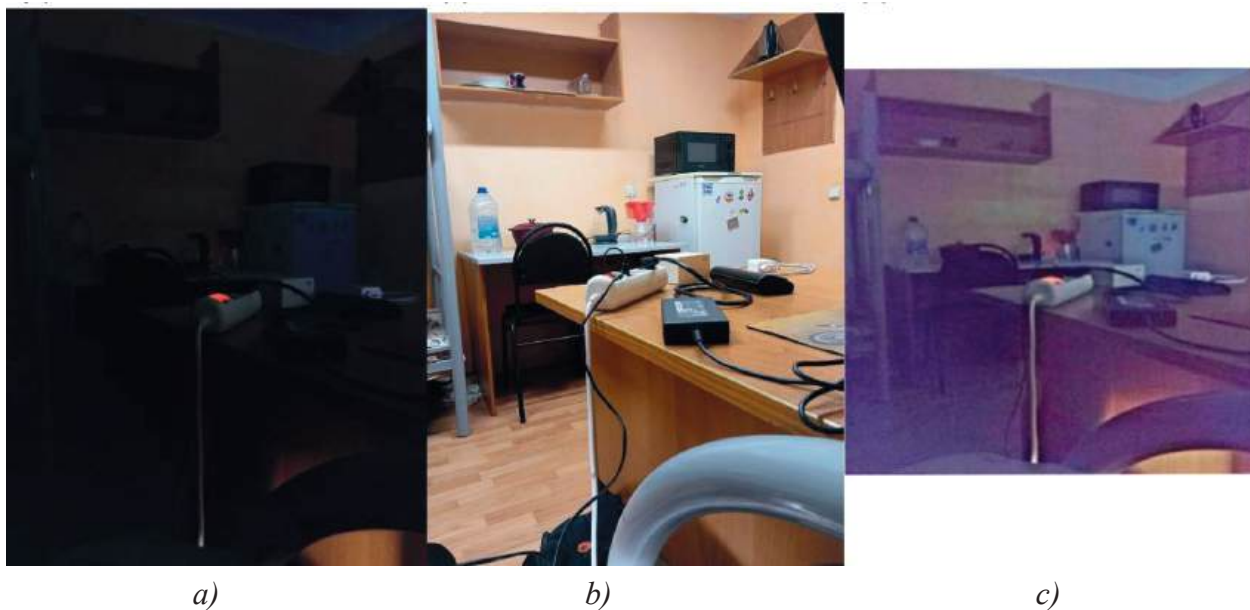


Рисунок 4. Гибридный подход: изображение при слабом освещении (а), изображение при нормальном освещении (б), восстановленное изображение с помощью нейронной сети (с)

Figure 4. Hybrid approach: low-light image (a), normal-light image (b), reconstructed image using neural network (c)

3.4 Экспериментальные результаты и сравнение методов

Для оценки эффективности рассмотренного гибридного метода проведены эксперименты, включающие количественный и качественный анализы результатов. В ходе экспериментов сравнивались следующие методы:

— *гистограммное выравнивание (HE)* — один из базовых методов улучшения контрастности;

— *ретинекс-метод* — улучшает освещённость, сохраняя детали [8];

— *глубокие нейросети (DCE-Net, EnlightenGAN)* — применяют глубокое обучение для реконструкции изображений [9];

— *гибридный метод* — комбинирует традиционные алгоритмы и нейросетевые модели для достижения оптимального результата.

3.4.1 Методология экспериментов

Эксперименты проводились на наборе данных, содержащем изображения, снятые при слабом освещении.

Оценка качества изображений проводилась с использованием следующих метрик:

— *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)* — выражение для соотношения между исходным изображением и уровнем шума.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right),$$

где MAX — максимальное значение пикселя;

MSE — среднеквадратическая ошибка между исходным и обработанным изображениями;

— *Structural Similarity Index (SSIM)* — показатель восприятия, который количественно оценивает ухудшение качества изображения, вызванное обработкой,

такой как сжатие данных, или потерями при передаче данных:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)},$$

где μ_x, μ_y — средние значения яркости изображений x и y ;

σ_x^2, σ_y^2 — дисперсии;

σ_{xy} — ковариация между x и y ;

C_1, C_2 — константы для стабилизации;

— *Naturalness Image Quality Evaluator (NIQE)* — характеризует качество изображения на основе его «естественности» или близости к статистическим свойствам реальных, качественных изображений (чем меньше значение, тем лучше):

$$NIQE = \sqrt{(v - v_{ref})^T \Sigma_{ref}^{-1} (v - v_{ref})},$$

где v — вектор параметров тестового изображения;

v_{ref} — эталонный вектор параметров, обученный на натуральных изображениях.

3.4.2 Количественные результаты

В таблице 1 представлены средние значения метрик для различных методов.

PSNR измеряется в децибелах (дБ); SSIM — безразмерная величина в диапазоне $[0, 1]$, где 1 означает идеальное совпадение с эталоном; NIQE — безразмерный показатель: чем ниже значение, тем естественнее выглядит изображение.

Как видно из результатов (таблица 1), гибридный метод показывает наилучшие значения PSNR и SSIM, а также достигает самой низкой NIQE, что указывает на высокое качество изображений с точки зрения визуального восприятия.

Таким образом, рассмотренный гибридный подход превосходит традиционные методы и отдельные нейросетевые модели, обеспечивая более высокое качество восстановления изображений при слабом освещении.

Таблица 1. Сравнение методов по метрикам PSNR, SSIM и NIQE**Table 1.** Comparison of methods based on PSNR, SSIM, and NIQE metrics

Метод	PSNR (дБ) ↑	SSIM ↑	NIQE ↓
Гистограммное выравнивание	14.2	0.67	5.8
Ретинекс	17.5	0.72	4.3
LLNet	19.8	0.78	3.9
EnlightenGAN	21.1	0.82	3.5
Гибридный метод	23.4	0.87	2.8

Выводы

В данной статье рассмотрены методы Retinex Эдвина Лэнда и CNN Яна Лекуна, а также гибридный подход, объединяющий преимущества многомасштабного ретинекса (MSR-net) и рекуррентных свёрточных нейронных сетей (gruCNN). Данный метод демонстрирует высокую эффективность за счёт сочетания физически обоснованного разделения изображения на компоненты освещения и отражательной способности, а также способности нейронных сетей автоматически извлекать и обрабатывать сложные признаки. Эксперименты авторов на наборах данных LOL и CIFAR-10 подтвердили превосходство гибридного подхода по метрикам PSNR и SSIM по сравнению с традиционными методами, такими как гистограммное выравнивание и классический ретинекс, а также современными нейросетевыми подходами, включая DCE-Net и EnlightenGAN.

Список источников

1. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. A Multiscale Retinex for Bridging the Gap between Color Images and the Human Observation of Scenes // IEEE Transactions on Image Processing. 1997. Vol. 6, No. 7. P. 965–976. DOI: 10.1109/83.597272. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/597272>.
2. Алексеев И.С., Беленя И.А. Применение алгоритма Retinex для обработка изображений, полученных в сложных условиях освещения // Решетневские чтения. 2016. Т. 2. С. 180–181. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie>

Основные преимущества рассмотренного метода заключаются в высокой точности восстановления деталей, эффективном устранении шумов и сохранении естественности изображения. Гибридный подход демонстрирует потенциал для применения в задачах автономного вождения, видеонаблюдения и других областях, где критически важно качество обработки изображений в условиях динамического освещения.

Перспективы дальнейших исследований включают оптимизацию архитектуры гибридной модели для работы в реальном времени, а также адаптацию метода для обработки видео в условиях экстремально низкой освещённости. Кроме того, планируется исследование возможностей использования более сложных рекуррентных архитектур и методов обучения с подкреплением для повышения устойчивости модели к различным условиям освещения.

algoritma-retinex-dlya-obrabotki-izobrazheniy-poluchennyh-v-slozhnyh-usloviyah-osvescheniya/viewer.

3. Бахмутов М.А. Анализ методов определения объектов на изображении // Студенческие исследования, идеи и инновации: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. 2024. Т. 3. С. 34–36. EDN: CLPVUZ.

4. Pinheiro P.O., Collobert R. Recurrent Convolutional Neural Networks for Scene Labeling // Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning. 2014. P. 82–90. URL: <https://proceedings.mlr.press/v32/pinheiro14.html>.

5. Wei C., Wang Y., Lu H., Wang J. Deep Retinex Decomposition for Low-Light Enhancement // arxiv.org : [Website]. August, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1808.04560. URL: Deep_Retinex_Decomposition_for_Low-Light_Enhanceme.pdf.

6. Oh J.G., Hong M.C. Low-Light Image Enhancement Using Hybrid Deep-Learning and Mixed-Norm Loss Functions // Sensors. September 2022, No. 22(18). P. 6904 DOI:10.3390/s22186904. URL: Low-Light Image Enhancement Using Hybrid Deep-Learning and Mixed-Norm Loss Functions.

7. Ma L., Liu R., Zhang J., Fan X., Luo Zh. Learning Deep Context-Sensitive Decomposition for Low-Light Image Enhancement // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. December, 2021. DOI:10.48550/arXiv.2112.05147. URL: https://www.researchgate.net/publication/356985690_Learning_Deep_Context-Sensitive_Decomposition_for_Low-Light_Image_Enhancement.

8. Wu J., Ding B., Zhang B., Ding J. A Retinex-Based Network for Image Enhancement in Low-Light Environments // eCollection. May 24, 2024. No. 19(5). P. e0303696. DOI: 10.1371/journal.pone.0303696.

9. Guo C., Li L., Shen H., Guo J., Loy C.C., Hou L., Kwong S., Cong R. Zero-Reference Deep Curve Estimation for Low-Light Image Enhancement // arxiv.org : [Website]. March 22, 2022. URL: <https://arxiv.org/pdf/2001.06826>.

References

1. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. A Multiscale Retinex for Bridging the Gap between Color Images and the Human Observation of Scenes. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, Vol. 6, No. 7, pp. 965–976. DOI: 10.1109/83.597272. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/597272>.

2. Alekseev I.S., Belenya I.A. Primenenie algoritma Retinex dlya obrabotka izobrazhenii, poluchennykh v slozhnykh usloviyakh osvescheniya [Application of the Retinex Algorithm for Processing Images Obtained in Difficult Lighting Conditions]. *Reshetnevskie chteniya — Reshetnev Readings*. 2016. T. 2. S. 180-181. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-algoritma-retinex-dlya-obrabotki-izobrazheniy-poluchennyh-v-slozhnykh-usloviyakh-osvescheniya/viewer>. [in Russian].

3. Bakhmutov M.A. Analiz metodov opredeleniya ob"ektov na izobrazhenii [Analysis of Methods for Determining Objects in an Image]. *Sbornik statei II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Studentcheskie issledovaniya, idei i innovatsii»* [Collection of Articles of the II International Scientific and Practical Conference «Student Research, Ideas and Innovations»]. 2024, Vol. 3, pp. 34-36. EDN: CLPVUZ. [in Russian].

4. Pinheiro P.O., Collobert R. Recurrent Convolutional Neural Networks for Scene Labeling. *Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning*, 2014, pp. 82-90. URL: <https://proceedings.mlr.press/v32/pinheiro14.html>.

5. Wei C., Wang Y., Lu H., Wang J. Deep Retinex Decomposition for Low-Light Enhancement. Arxiv.org : [Website]. August, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1808.04560. URL: Deep_Retinex_Decomposition_for_Low-Light_Enhanceme.pdf.

6. Oh J.G., Hong M.C. Low-Light Image Enhancement Using Hybrid Deep-Learning and Mixed-Norm Loss Functions. *Sensors*, September 2022, No. 22(18), pp. 6904. DOI:10.3390/s22186904. URL: Low-Light Image Enhancement Using Hybrid Deep-Learning and Mixed-Norm Loss Functions.

7. Ma L., Liu R., Zhang J., Fan X., Luo Zh. Learning Deep Context-Sensitive Decomposition for Low-Light Image Enhancement. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, December, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2112.05147. URL: https://www.researchgate.net/publication/356985690_Learning_Deep_Context-Sensitive_Decomposition_for_Low-Light_Image_Enhancement.

8. Wu J., Ding B., Zhang B., Ding J. A Retinex-Based Network for Image Enhancement in Low-Light Environments. *eCollection*, May 24, 2024, No. 19 (5), pp. e0303696. DOI: 10.1371/journal.pone.0303696.

9. Guo C., Li L., Shen H., Guo J., Loy C.C., Hou L., Kwong S., Cong R. Zero-Reference Deep Curve Estimation for Low-Light Image Enhancement. Arxiv.org: [Website]. March 22, 2022. URL: <https://arxiv.org/pdf/2001.06826>.

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 16.04.2025; принята к публикации 23.04.2025.

The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 16.04.2025; accepted for publication 23.04.2025.

Научная статья

УДК 004.942

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-123-132

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ МАРШРУТИЗАЦИОННОГО И КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Эрик Русланович Хакимов****Erik R. Khakimov**

магистрант Высшей школы информационных и социальных технологий,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

**Игорь Нугуманович Сулейманов****Igor N. Suleymanov**

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Информационные технологии и прикладная математика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

Актуальность

Данная работа посвящена вопросу оценки и расчёта надёжности продукции в сфере сетевого оборудования, а именно вопросам моделирования и анализа при помощи математической теории надёжности и закона Колмогорова-Чепмена.

Современные сетевые устройства имеют на своём борту все большее количество разных компонентов, протоколов, модулей, блоков и обширный список функций, что требует очень досконального изучения каждого отдельного компонента и всего устройства или системы в целом, поскольку одними из наиболее важных факторов являются надёжность и стабильность работы. Моделирование разрабатываемой продукции позволит сократить возможные издержки, выявить и переработать слабые места, повысить надёжность как отдельных компонентов и модулей, так и устройства в целом.

Цель исследования

Обзор методов с последующим моделированием устройства для маршрутизации и коммутации сетей. Анализ выборок результатов моделирования с последующим внедрением улучшений.

Методы исследования

В ходе проведения исследования использованы данные, которые основываются на характеристиках компонентов и настроек, используемых в разрабатываемом устройстве компании заказчика.

Результаты

Применение методов, описанных в статье, позволило смоделировать и привести разрабатываемое устройство к уровню надёжности, который удовлетворяет требованиям заказчика. Все возможные состояния устройства отображены в графе, результаты расчётов вероятностных характеристик отображены в табличном виде.

Ключевые слова

моделирование, теория надёжности, уравнение Колмогорова, маршрутизационное оборудование, коммутационное оборудование, графы, показатели надёжности

Для цитирования: Хакимов Э. Р., Сулейманов И. Н. Моделирование надёжности маршрутизационного и коммутационного оборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 123-132. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-123-132>.

Original article

RELIABILITY MODELING FOR ROUTING AND SWITCHING EQUIPMENT

Relevance

This paper is devoted to the issue of assessing and calculating the reliability of products in the field of networking equipment, namely modeling and analysis using the mathematical theory of reliability and the Kolmogorov-Chapman law.

Modern network devices have on its board an increasing number of different components, protocols, modules, blocks and an extensive list of functions that requires a very thorough study of each individual component and the entire device or system as a whole, as one of the most important factors is the reliability and stability of operation. Modeling of the developed products will allow to reduce possible costs, to identify and rework weak points, to increase reliability of both individual components and modules, and the device as a whole.

Aim of research

Review of methods followed by modeling of the device for routing and switching networks. Sample analysis of simulation results with subsequent implementation of improvements.

Research methods

In the course of the research were used data that are based on the characteristics of components and settings used in the developed device of the customer's company.

Results

Application of methods described in the article allowed to model and bring the developed device to the level of reliability, which satisfies the customer's requirements. All possible states of the device are shown in graph schemes, and the results of calculations of probabilistic characteristics are shown in tabular form.

Keywords

modeling, reliability theory, Kolmogorov equation, routing equipment, switching equipment, graphs

For citation: Khakimov E. R., Suleymanov I. N. Modelirovaniye nadozhnosti marshrutizatsionnogo i kommutatsionnogo oborudovaniya [Reliability Modeling for Routing and Switching Equipment]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 123-132 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-123-132>.

Введение

Объектом моделирования и исследования является маршрутизационное и коммутационное сетевое устройство. Отличительными особенностями данного устройства является модульность и архитектура работы, привязанная к машинным циклам и тактам. Данная реализация устройства позволяет очень

точно и наглядно моделировать процессы и циклы работы устройства с помощью различных математических теорий, таких как теория систем массового обслуживания [1, 2] и рассматриваемая в данной статье теория надёжности. Также особенности архитектуры и строения конкретного рассматриваемого устройства позволяют исправить многие

недочёты путём изменения программного обеспечения, избежав дорогостоящих модернизаций физической конструкции.

Основной задачей данной работы является создание математической модели устройства на этапе разработки для выявления ненадёжных мест, модулей и узлов, которые приводят к выходу из режима штатной работы и различным поломкам. Выбор метода, на котором строится дальнейшая работа, обоснован простотой и скоростью расчётных действий, приемлемой точностью результатов и модели, а также лёгкостью в изменении и внесении корректировок в уже существующую модель [3].

Уравнения Колмогорова-Чепмена

Для нахождения вероятности безотказной работы системы или компонента в течение определённого временного отрезка в теории надёжности используется закон Колмогорова-Чепмена или

чаще называемый просто уравнениями Колмогорова. Для определения состояний системы необходимо построить граф, по которому можно определить вероятности безотказной работы (рисунок 1). На рисунке 1 отображено:

— *состояния системы*. В контексте надёжности система может находиться в разных состояниях, таких как полная работоспособность, частичная работоспособность, когда вышел из строя один из компонентов, но устройство может продолжать работу со снижением рабочей нагрузки или с потерей части функциональности, а также полностью неработоспособное состояние. На графе обозначаются в круглом поле с буквой S и соответствующим индексом [4];

— *вероятности перехода*. Уравнение основывается на вероятностях перехода системы из одного состояния в другое, к примеру, из стартового состояния полной работоспособности в состояние отказа системы охлаждения, и через

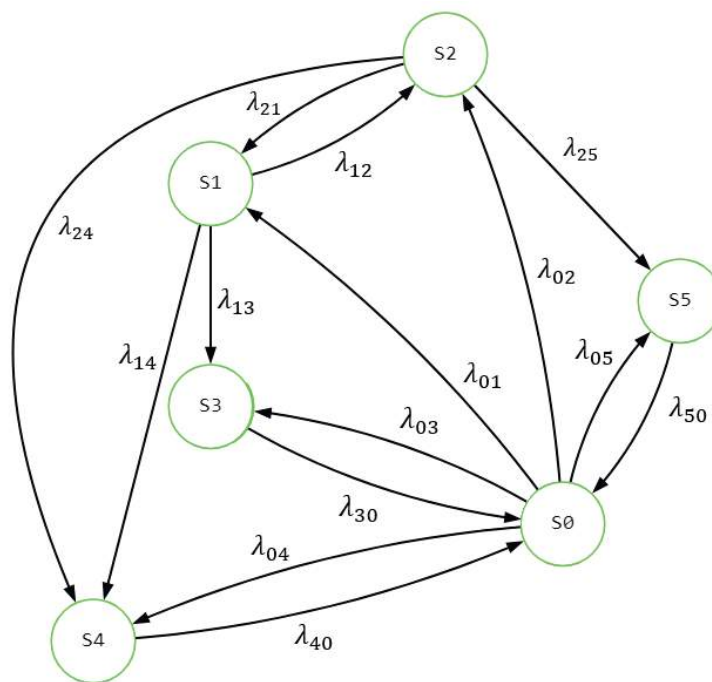


Рисунок 1. Граф состояний и переходов устройства системы № 1

Figure 1. State and transition graph of the device of system No. 1

некоторое время переход в состояние полной остановки работы из-за перегрева. Вероятности перехода могут быть обусловлены надёжностью отдельных элементов системы (к примеру, надёжность электро- и радиокомпонентов, заложенных производителем), условиями эксплуатации, особенностями конструкции и устройства системы, а также многими другими факторами. На графе отображаются в виде стрелок с направлением перехода и подписью буквой с соответствующим указанием перехода от начального состояния к новому, где:

S_0 — состояние штатной работы устройства;

S_1 — состояние аварии на линии питания;

S_2 — состояние аварии модуля управления;

S_3 — состояние аварии центрального процессора (головного блока);

S_4 — состояние аварии модуля охлаждения и телеметрии;

S_5 — состояние аварии на шине передачи данных.

На основе полученного графа и вероятностных характеристик системы необходимо составить систему дифференциальных уравнений, которая содержит уравнение для каждой из вершин графа, а также условие нормировки.

$$\begin{aligned} p_0(0) &= 1, p_1(0) = 0, p_2(0) = 0, \\ p_3(0) &= 0, p_4(0) = 0, p_5(0) = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04} + \lambda_{05})p_0(t) + \lambda_{40}p_4(t) + \lambda_{50}p_5(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_{01}p_0(t) - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})p_1(t) + \lambda_{21}p_2(t), \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{25} + \lambda_{24})p_2(t), \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= \lambda_{03}p_0(t) + \lambda_{13}p_1(t) - \lambda_{30}p_3(t), \\ \frac{dp_4(t)}{dt} &= \lambda_{04}p_0(t) + \lambda_{14}p_1(t) + \lambda_{24}p_2(t) - \lambda_{40}p_4(t), \\ \frac{dp_5(t)}{dt} &= \lambda_{05}p_0(t) + \lambda_{25}p_2(t) - \lambda_{50}p_5(t), \\ p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) + p_5(t) &= 1. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Ниже рассматриваются моделирование и анализ работы системы в стационарном режиме.

Моделирование и анализ надёжности работы системы

В таблице 1 представлены значения для системы в стационарном режиме работы, когда система провела все инициализации и стартовые настройки, а также вышла на полную рабочую частоту [5]. Подставляя табличные значения в ранее представленную систему уравнений, решим её методом Гаусса и получим искомые вероятностные характеристики ($P_0 = 0,15$; $P_1 = 0,11$; $P_2 = 0,07$; $P_3 = 0,13$; $P_4 = 0,30$; $P_5 = 0,23$).

Для анализа системы и выявления слабых мест, которые мешают работе системы, необходимо составить полный цикл работы системы. Помимо стационарного режима работы в рассматриваемой системе присутствует процедура старта и инициализации, которые являются динамическими режимами работы [6].

Для расчёта характеристик в зависимости от времени при работе в динамическом режиме использованы данные из таблиц 2–4 и уравнения из системы (1), (2).

Таблица 2 отображает запуск устройства, после которого на протяжении первого временного промежутка у устройства функционируют только модули питания и управления ($P_0 = 0$; $P_1 = 0,67$; $P_2 = 0,33$; $P_3 = 0$; $P_4 = 0$; $P_5 = 0$).

Таблица 1. Частотные характеристики переходов состояний системы № 1**Table 1.** Frequency characteristics of state transitions of system No. 1

λ_{ij}	0	1	2	3	4	5
0		2	2	1	4	6
1			1	1	2	
2		2			1	3
3	2					
4	3					
5	5					

Таблица 2. Частотные характеристики переходов состояний системы № 2**Table 2.** Frequency characteristics of state transitions of system No. 2

λ_{ij}	0	1	2	3	4	5
0		1	1	0	0	0
1			1	0	0	
2		2			0	0
3	0					
4	0					
5	0					

Следующий временной интервал обусловлен включением шины и протокола передачи данных. После инициализации и настройки интерфейса устанавливается связь между модулями устройства и проверка линии через отправку пустых сообщений. Каждое сообщение имеет вероятность ошибки приёма и отправки, поскольку принимающее устройство

может быть занято в конкретный момент времени [7]. Для решения данной проблемы есть множество способов, к примеру. функции для проверки статусов или повторной отправки сообщения ($P_0 = 0,16$; $P_1 = 0,16$; $P_2 = 0,08$; $P_3 = 0$; $P_4 = 0,35$; $P_5 = 0,24$). Частотные характеристики переходов состояний системы представлены в таблице 3.

Таблица 3. Частотные характеристики переходов состояний системы № 3**Table 3.** Frequency characteristics of system state transitions No. 3

λ_{ij}	0	1	2	3	4	5
0		2	2	0	0	1
1			1	0	0	
2		2			0	1
3	0					
4	0					
5	2					

После установления протокола связи в прошлом временном отрезке модуль охлаждения и телеметрии выходит из автономного режима и передаёт контроль управляющему блоку ($P_0 = 0,15$; $P_1 = 0,11$; $P_2 = 0,07$; $P_3 = 0,13$; $P_4 = 0,30$; $P_5 = 0,23$). Частотные характеристики переходов состояний системы представлены в таблице 4.

На основе сформированных показаний построен график зависимости вероятности перехода состояний от времени (рисунок 2.)

Из графика (рисунок 2) явно видно, что система имеет проблемы со стабильной работой, и отдельные элементы слишком часто выходят из строя или нарушают обычный цикл работы. Для решения этих проблем существуют множество способов решения, однако в данной ситуации подойдут только некоторые из них:

— *резервирование*. Использование нескольких одинаковых компонентов одновременно или в режиме ожидания. В случае, если один или несколько ком-

Таблица 4. Частотные характеристики переходов состояний системы № 4

Table 4. Frequency characteristics of state transitions of system No. 4

λ_{ij}	0	1	2	3	4	5
0		2	2	0	4	6
1			1	0	2	
2		2			1	3
3	0					
4	3					
5	5					

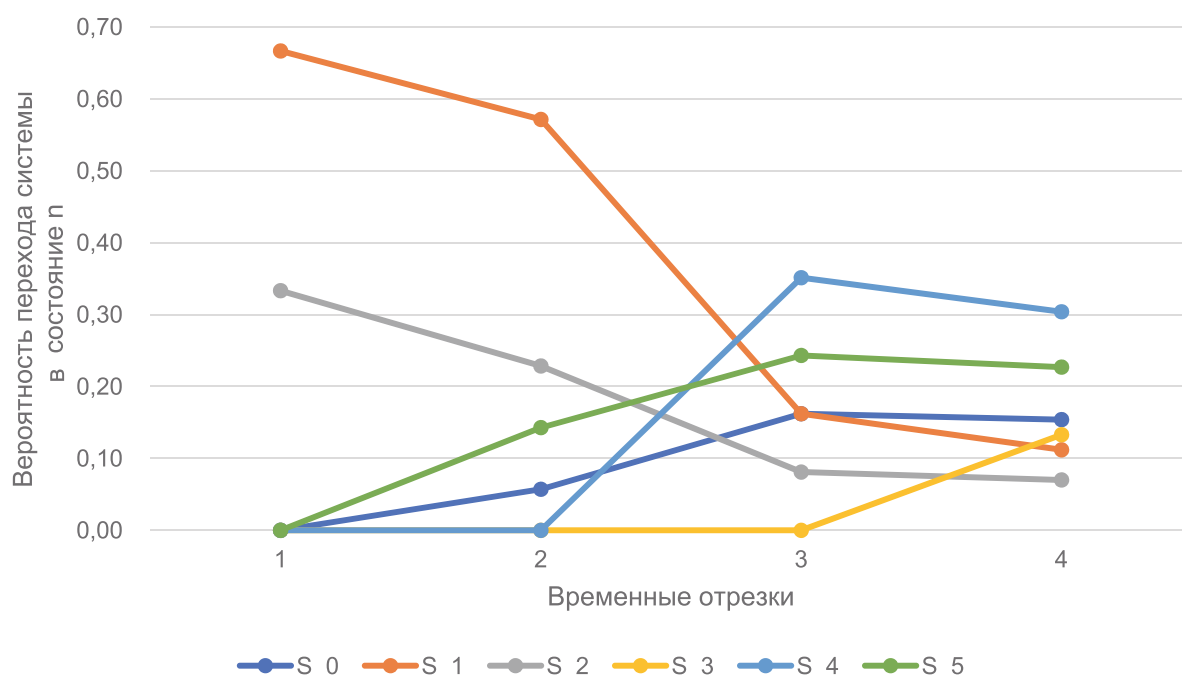


Рисунок 2. Зависимость вероятности перехода системы № 1 с течением времени

Figure 2. Dependence of the transition probability of system No. 1 over time

понентов выйдут из строя, система сможет продолжить своё дальнейшее функционирование, хотя и с возможной потерей производительности [8];

— *модульность*. Разделение системы на независимые модули позволит локализовать отказы и ошибки, а также предотвратить распространение на всю оставшуюся систему. Этот способ широко применим в практике, однако он не подходит для рассматриваемой системы, поскольку она изначально представлена в виде модульной системы, однако при создании новой модульной архитектуры применение этого метода возможно и может быть достаточно эффективным [9];

— *восстановление*. Применение различных средств автоматического восстановления после отказа, без участия человека. К примеру, повторная инициализация отказавшего компонента или повтор-

ная отправка пакета данных при сбое транзакции на шине данных;

— *замена компонентов и их совместимость*. Каждый отдельный компонент имеет свой уровень надёжности и может быть несовместим с теми или иными фрагментами системы. В случае, если возникают такие конфликты, единственным выходом является замена проблемных деталей на подходящие аналоги. Наглядным примером данного метода является различные радио-, электротехника, машино- и станкостроение [10, 11].

Результатом применения перечисленных способов является новая система № 2 и математическая модель устройства (рисунок 3) и изменённые частотные характеристики перехода состояний:

$$\begin{aligned} p_0(0) &= 1, p_1(0) = 0, p_2(0) = 0, \\ p_3(0) &= 0, p_4(0) = 0, p_5(0) = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

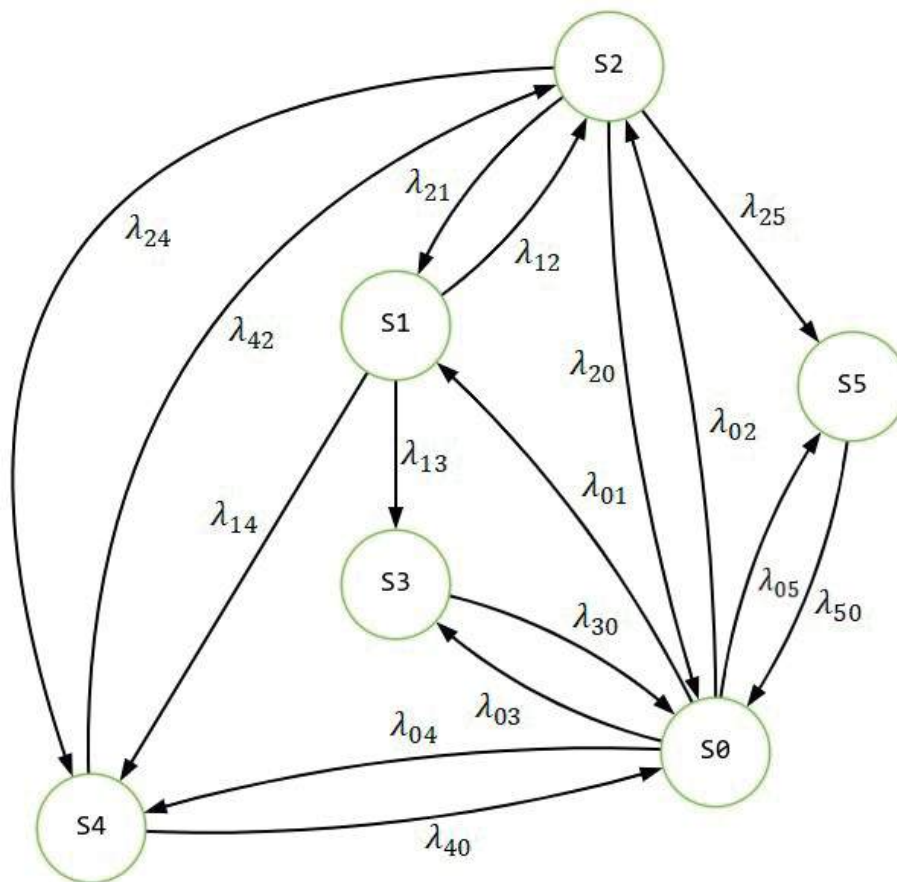


Рисунок 3. Граф состояний и переходов устройства системы № 2

Figure 3. State and transition graph of the device of system No. 2

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_0(t)}{dt} = -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04} + \lambda_{05})p_0(t) + \lambda_{20}p_2(t) + \lambda_{30}p_3(t) + \lambda_{40}p_4(t) + \lambda_{50}p_5(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_{01}p_0(t) - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})p_1(t) + \lambda_{21}p_2(t), \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) - (\lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{24} + \lambda_{25})p_2(t) + \lambda_{42}p_4(t), \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda_{03}p_0(t) + \lambda_{13}p_1(t) - \lambda_{30}p_3(t), \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = \lambda_{04}p_0(t) + \lambda_{14}p_1(t) + \lambda_{24}p_2(t) - (\lambda_{40} + \lambda_{42})p_4(t), \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \lambda_{05}p_0(t) + \lambda_{25}p_2(t) - \lambda_{50}p_5(t), \\ p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) + p_5(t) = 1. \end{array} \right. \quad (4)$$

Дальнейшие этапы работы и расчёт характеристик надёжности полностью схожи с описанными ранее, также рассматриваемые временные промежутки не отличаются от первой модели.

Частотные характеристики переходов состояний системы в стационарном

режиме работы представлены в таблице 5.

На графике, основанном на расчётной выборке данных модели (рисунок 4), отображены результаты применения методов повышения надёжности, которые были описаны ранее. При сравнении

Таблица 5. Частотные характеристики переходов состояний системы в стационарном режиме работы

Table 5. Frequency characteristics of system state transitions in steady-state operation mode

λ_{ij}	0	1	2	3	4	5
0		1	1	1	2	3
1			1	1	1	
2	4	1			1	1
3	4					
4	7		1			
5	10					

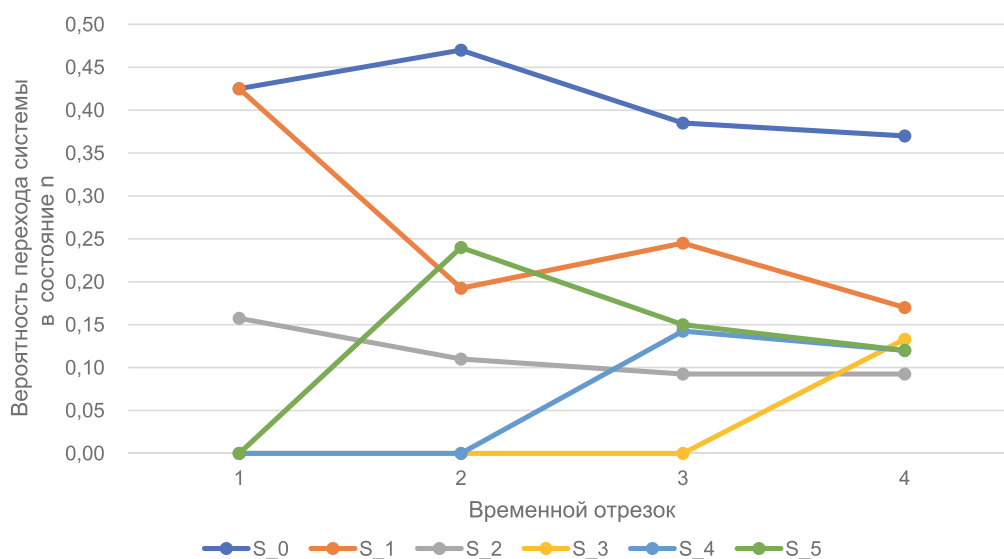


Рисунок 4. Зависимость вероятности перехода системы № 2 с течением времени

Figure 4. Dependence of the transition probability of system No. 2 over time

с графиком, приведённым для первой модели (рисунок 3), явно видно, что вероятность состояния нормальной работы устройства кратно увеличилась, а остальные показатели отказов и сбоев системы снизились. Данная ситуация свидетельствует о том, что применённые методы справились с поставленной задачей и привели рассматриваемые параметры устройства к приемлемым для использования в работе величинам.

Рассматриваемое в данной работе устройство имеет дальнейший потенциал для улучшения характеристик надёжности, однако применение других методов, которые не упоминались в данной работе, ограничено материально и конструктивно.

Выводы

В результате проведённой работы получены две математических модели надёжности устройства.

Первая исходная модель представляет устройство на начальном этапе разработки, устройство имеет низкий показатель стабильной работы и высокие показатели выхода из строя и отказов, что явно видно из графика (рисунок 1). Анализ первой модели позволил выя-

вить наиболее уязвимые места в устройстве, которые чаще всего прерывают свой цикл штатной работы и наносят ущерб устройству.

Во второй модели к проблемным местам применены различные методы для повышения надёжности и стабильной работы устройства. Сравнение двух полученных моделей явно показывает преимущества второго варианта, поскольку показатель штатной работы устройства в данном случае кратно выше, а вероятности отказов отдельных модулей устройства снижены до приемлемых значений.

Таким образом, результаты работы демонстрируют, что моделирование сетевых и телекоммуникационных устройств с использованием математических методов и теории надёжности позволяет значительно повысить стабильность работы, обеспечить приемлемое соотношение отказоустойчивости и стоимости используемых компонентов. Однако в данной статье рассмотрены не все возможные методы расчёта и повышения характеристик надёжности, что обусловлено ограничениями конкретного рассматриваемого устройства и условий заказчика.

Список источников

1. Ховансков С.А. Моделирование телекоммуникационных систем и сетей. М.: ЛитРес, 2020. 118 с. ISBN 978-5-9275-3606-1.
2. Попков Г.В., Попков В.К., Величко В.В. Математические основы моделирования сетей связи. М.: Горячая линия–Телеком, 2012. 183 с. ISBN 978-5-9912-0266-7.
3. Смирнова Е.В., Пролетарский А.В., Ромашкина Е.А., Суоров А.М., Федотов Р.А. Технологии коммутации и маршрутизации в локальных компьютерных сетях. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 42 с. ISBN 978-5-7038-3733-7.
4. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Научно-техническое издательство «Горячая

линия – Телеком», 2003. 512 с. ISBN 5-94836-011-3.

5. Чесалов А.Ю. Методология построения распределенных сетей передачи, обработки и хранения данных: анализ и выбор рациональной структуры. Монография. Т. 1. М.: ЛитПортал, 2023. 290 с. ISBN 978-5-0060-1444-2.

6. Благодаров А.В., Пылькин А.Н., Скудннев Д.М., Шибанов А.П. Моделирование и синтез оптимальной структуры сети Ethernet. М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия — Телеком», 2011. 112 с. ISBN 978-5-9912-0184-1.

7. Поршневец С.В. Математические модели информационных потоков в высокоскоростных магистральных интернет-каналах. М.: Научно-

техническое издательство «Горячая линия — Телеком», 2016. 232 с. ISBN 978-5-9912-0508-5.

8. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций. СПб.: РГГМУ, 2012. 135 с. ISBN 978-5-86813-325-1.

9. Робачевский А. Интернет изнутри: Архитектура экосистемы Интернета. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Серпантин Эдженси, 2024. 300 с. ISBN 978-5-6052033-0-8.

10. Кузнецов А.В., Петров Б.Г. Моделирование и анализ сетевых протоколов. СПб.: Питер, 2019.

11. Иванов Д.Н., Сидоров Е.П. Системы массового обслуживания в телекоммуникациях. М.: Горячая линия — Телеком, 2018.

References

1. Khovanskov S.A. *Modelirovanie telekommunikatsionnykh sistem i setei* [Modeling of Telecommunication Systems and Networks]. Moscow, LitRes Publ., 2020. 118 p. ISBN 978-5-9275-3606-1. [in Russian].

2. Popkov G.V., Popkov V.K., Velichko V.V. *Matematicheskie osnovy modelirovaniya setei svyazi* [Mathematical Foundations of Communication Network Modeling]. Moscow, Goryachaya liniya—Telekom Publ., 2012. 183 p. ISBN 978-5-9912-0266-7. [in Russian].

3. Smirnova E.V., Proletarskii A.V., Romashkina E.A., Surovov A.M., Fedotov R.A. *Tekhnologii kommutatsii i marshrutizatsii v lokal'nykh komp'yuternykh setyakh* [Switching and Routing Technologies in Local Area Networks]. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2013. 42 p. ISBN 978-5-7038-3733-7. [in Russian].

4. Vishnevskii V.M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setei* [Theoretical Foundations of Computer Network Design]. Moscow, Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo «Goryachaya liniya — Telekom», 2003. 512 p. ISBN 5-94836-011-3. [in Russian].

5. Chesalov A.Yu. *Metodologiya postroeniya raspredelennykh setei peredachi, obrabotki i khraneniya dannykh: analiz i vybor ratsional'noi struktury* [Methodology for Building Distributed Networks for Data Transmission, Processing, and Storage: Analysis and Selection of Rational Structure]. Vol. 1. Moscow, LitPortal, 2023. 290 p. ISBN 978-5-0060-1444-2. [in Russian].

6. Blagodarov A.V., Pyl'kin A.N., Skudnev D.M., Shibarov A.P. *Modelirovanie i sintez optimal'noi struktury seti Ethernet* [Modeling and Synthesis of Optimal Ethernet Network Structure]. Moscow, Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo «Goryachaya liniya — Telekom», 2011. 112 p. ISBN 978-5-9912-0184-1. [in Russian].

7. Porshnev S.V. *Matematicheskie modeli informatsionnykh potokov v vysokoskorostnykh magistral'nykh internet-kanalakh* [Mathematical Models of Information Flows in High-Speed Backbone Internet Channels]. Moscow, Nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo «Goryachaya liniya — Telekom», 2016. 232 p. ISBN 978-5-9912-0508-5. [in Russian].

8. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Modelirovanie sistem i setei telekommunikatsii* [Modeling of Telecommunication Systems and Networks]. Saint-Petersburg, RGGMU Publ., 2012. 135 p. ISBN 978-5-86813-325-1. [in Russian].

9. Robachevskii A. *Internet iznutri: Arkhitektura ekosistemy Interneta* [The Internet from the Inside: Architecture of the Internet Ecosystem]. 3d Ed., Revised and Expanded. Moscow, Serpantin Edzhensi Publ., 2024. 300 p. ISBN 978-5-6052033-0-8. [in Russian].

10. Kuznetsov A.V., Petrov B.G. *Modelirovanie i analiz setevykh protokolov* [Modeling and Analysis of Network Protocols]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2019. [in Russian].

11. Ivanov D.N., Sidorov E.P. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya v telekommunikatsiyakh* [Queueing Systems in Telecommunications]. Moscow, Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2018. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 04.04.2025; одобрена после рецензирования 17.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.

The article was submitted 04.04.2025; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 29.04.2025.

Научная статья

УДК 004.94

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-133-141

КОМПОЗИЦИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ КИНЕТИКИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

**Сергей Вячеславович Слепнев****Sergei V. Slepnev**

магистрант Высшей школы информационных и социальных технологий,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

**Камила Феликсовна Коледина****Kamila F. Koledina**

доктор физико-математических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории математической химии,
Институт нефтехимии и катализа Федерального государственного бюджетного
научного учреждения Уфимский федеральный исследовательский центр
Российской академии наук;
профессор кафедры информационных технологий и прикладной математики,
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, 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

Анализ кинетики термостимулированной люминесценции (ТСЛ) важен для изучения материалов с особыми оптическими свойствами, применяемых в датчиках и системах визуализации. Традиционные методы анализа ТСЛ часто неэффективны при работе со сложными данными. Комбинирование алгоритмов кластеризации и регрессии повышает точность прогнозов и помогает выявить скрытые закономерности.

Цель исследования

Целью данной работы является создание системы прогнозирования кинетики ТЛС полиарилефталидов с использованием методов машинного обучения. Для достижения этой цели предусматривается разработка методологии обработки экспериментальных данных, включающей кластеризацию и композицию моделей регрессии.

Ключевые слова

полиарилефталиды, люминесценция, методы машинного обучения, алгоритмы кластеризации, MAE, обработка данных, KMeans, XGBRFR, линейная регрессия

Методы исследования

Для обработки данных и выделения закономерностей применялся метод кластеризации KMeans, который позволил разделить экспериментальные данные на группы с различными особенностями поведения.

Для моделирования зависимости интенсивности люминесценции от параметров температуры и времени использовались различные методы регрессии, включая линейную регрессию и ансамблевые подходы, такие как XGBRFRegressor.

Для определения оптимального количества кластеров применялись такие подходы, как метод локтя, силуэтный анализ и метод Davies-Bouldin, которые обеспечили надежное разбиение данных.

Результаты

Разработана система прогнозирования кинетики ТЛС полиарилефталидов на основе машинного обучения. Подход разделил данные на группы с разными характеристиками, позволив создать индивидуальные модели регрессии для каждого кластера и повысить точность прогноза.

Для цитирования: Слепнев С. В., Коледина К. Ф., Коледин С. Н. Композиция методов машинного обучения в анализе кинетики термостимулированной люминесценции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 133-141. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-133-141>

Original article

COMPOSITION OF MACHINE LEARNING METHODS IN THE ANALYSIS OF THERMALLY STIMULATED LUMINESCENCE KINETICS

Relevance

Thermally stimulated luminescence (TSL) kinetics analysis is important for studying materials with special optical properties used in sensors and imaging systems. Traditional TSL analysis methods are often ineffective when dealing with complex data. Combining clustering and regression algorithms increases the accuracy of forecasts and helps to identify hidden patterns.

Aim of research

Aim of this work is to create a system for predicting the kinetics of polyarylene phthalides using machine learning methods. To achieve this goal, it is planned to develop a methodology for processing experimental data, including clustering and composition of regression models.

Research methods

To process the data and identify patterns, the KMeans clustering method was used, which made it possible to divide the experimental data into groups with different behavioral features.

Various regression methods, including linear regression and ensemble approaches such as XGBRFRegressor, were used to model the dependence of luminescence intensity on temperature and time parameters.

To determine the optimal number of clusters, approaches such as the elbow method, silhouette analysis, and the Davies-Bouldin method were used, which provided reliable data partitioning.

Keywords

polyarylene phthalides, luminescence, machine learning methods, clustering algorithms, MAE, data processing, KMeans, XGBRFR, linear regression

Results

A system for predicting the kinetics of polyarylene phthalides based on machine learning has been developed. The approach divided the data into groups with different characteristics, making it possible to create individual regression models for each cluster and improve the accuracy of the forecast.

For citation: Slepnev S. V., Koledina K. F., Koledin S. N. Kompozitsiya metodov mashinnogo obucheniya v analize kinetiki termostimulirovannoy lyuminestsentsii [Composition of Machine Learning Methods in the Analysis of Thermally Stimulated Luminescence Kinetics]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 133-141 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-133-141>.

Введение

На сегодняшний день органические полимерные материалы находят широкое применение в оптоэлектронике. Одной из разновидностей полимеров, пригодных для этих целей, могут быть полиарилефталиды (ПАФ). ПАФ отличаются высокой термо- и хемостойкостью, высокими плёнообразующими свойствами. При этом ПАФ обладают люминесценцией, хорошими оптическими и электрофизическими свойствами [1].

Так как реакции, протекающие при синтезе полиарилефталидов, имеют сложный характер, совершенно очевидна необходимость подробных исследований в этой практически неизученной области. В связи со сложностью расчета кинетики интенсивности свечения полиарилефталидов с помощью известных математических моделей [2, 3], была поставлена цель — построить с помощью методов машинного обучения систему, прогнозирующую значения люминесценции в зависимости от температуры и времени нагретия.

Определение количества кластеров

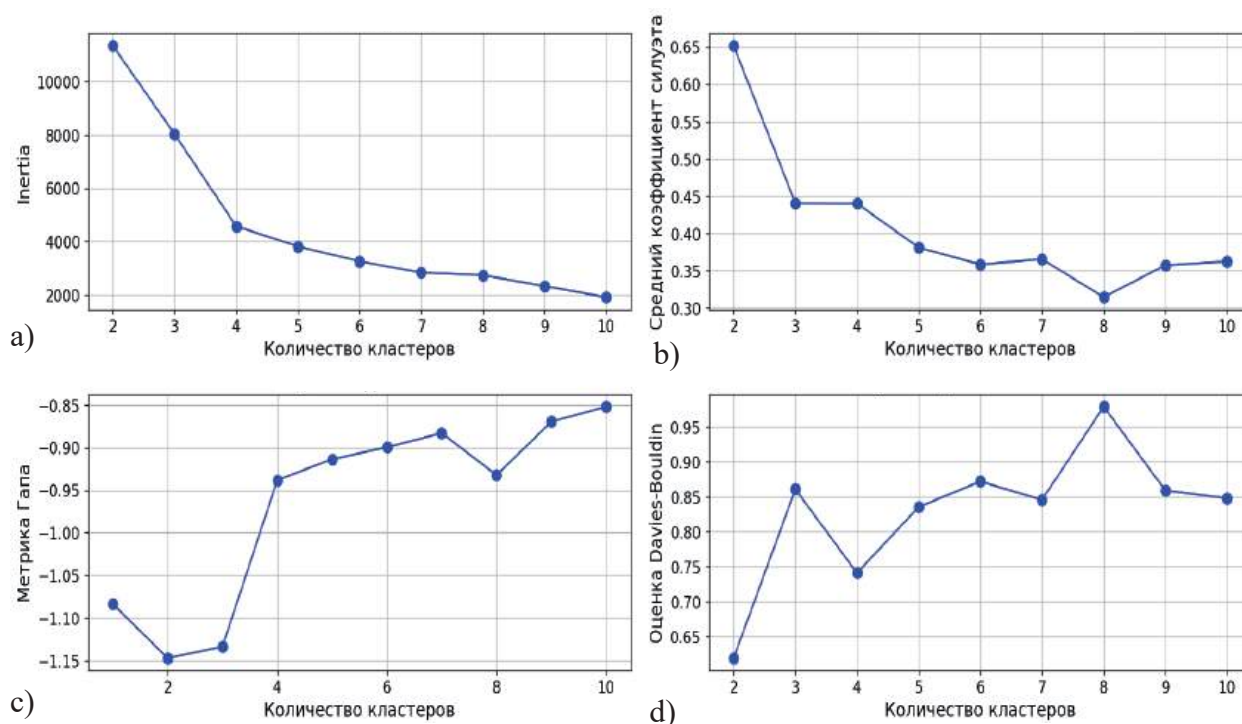
Для оптимального выбора количества кластеров в процессе кластеризации данных была проведена оценка с использованием нескольких методов: метода локтя, коэффициента силуэта, метрики Гапа и оценки Davies-Bouldin [3]. Эти

методы позволяют оценить качество разделения данных на кластеры по различным критериям (рисунок 1).

Метод локтя основан на измерении инерции (внутрикластерного разброса данных). На графике (рисунок 1, а) видно, что при увеличении количества кластеров инерция уменьшается. Однако после четырех кластеров снижение инерции замедляется, что свидетельствует о том, что добавление большего числа кластеров не даёт значительного улучшения. Этот эффект известен как «локоть», и его наличие на уровне четырех кластеров указывает на оптимальное количество кластеров для данной задачи.

В методе силуэта (рисунок 1, б) коэффициент показывает, насколько хорошо каждый объект соответствует своему кластеру по сравнению с соседними кластерами. На графике метода силуэта (рисунок 1, б) максимальное значение наблюдается при двух кластерах, что также указывает на лучшую структуру кластеров при таком разделении. Значение снижается при увеличении числа кластеров, что говорит о снижении четкости границ между кластерами.

Метрика Гапа (рисунок 1, в) показывает, как сильно модель отличается от случайной кластеризации. На графике видно, что максимальная разница (значение метрики Гапа) также наблюдается при двух кластерах. Это означает, что два кластера лучше всего описывают



a) метод локтя; b) метод силуэта; c) метод Гапа; d) метод Davies-Bouldin

a) elbow method; b) silhouette method; c) Gap method; d) Davies-Bouldin method

Рисунок 1. Определение числа кластеров

Figure 1. Determining the number of clusters

структуру данных по сравнению со случайной моделью.

Method Davies-Bouldin (рисунок 1, d) минимизирует количество ошибок внутри кластеров и максимизирует различия между кластерами. Низкие значения оценки Davies-Bouldin указывают на хорошую кластеризацию. Как видно из графика (рисунок 1, d), минимальные значения также достигаются при двух кластерах, что подтверждает выводы, сделанные на основе других методов.

Анализ всех методов подтверждает, что оптимальное количество кластеров для текущего набора данных — это два кластера. Этот выбор основан на результатах методов силуэта, Гапа и Davies-Bouldin. Такое разделение позволяет обеспечивать высокие значения коэффициента силуэта, максимальную метрику Гапа и минимальную оценку Davies-

Bouldin, что указывает на наиболее чёткую и качественную кластеризацию данных.

При исследовании интенсивности свечения полиарилефталидов было выявлено, что поведение материала существенно меняется при определенных температурных и временных условиях. Например, при низких температурах интенсивность люминесценции имела более линейную зависимость от времени, в то время как при высоких температурах наблюдались резкие колебания и пики интенсивности.

Разделение данных на два кластера позволяет более точно учитывать эти различия. Один кластер охватывает наблюдения, характеризующиеся плавными изменениями интенсивности свечения, а второй — наблюдения с более выраженными нелинейными эффектами.

Это подтверждается и литературными источниками, в которых описываются аналогичные явления для других люминесцирующих материалов при разных внешних условиях.

Метод кластеризации KMeans

Для анализа зависимости интенсивности свечения полиарилеифталидов от времени и температуры применялся алгоритм кластеризации KMeans [3]. Алгоритм KMeans — популярный метод кластеризации, который используется для разделения набора данных на K кластеров на основе их признаков. Суть алгоритма заключается в итеративном процессе, где объекты группируются таким образом, чтобы минимизировать внутрикластерные расстояния. На каждой итерации KMeans обновляет центры кластеров, выбирая точки, которые минимизируют сумму квадратов расстояний между точками и центрами кластеров.

Этот метод позволил разделить данные на группы (кластеры) с похожими характеристиками, что дало возможность выделить различные закономерности в поведении материала. Алгоритм KMeans был выбран из-за его эффективности при обработке больших объемов данных и возможности четкого разделения данных на заданное количество кластеров. Из графика (рисунок 2) следует, что изначальная теория о том, что непредсказуемые «пики» интенсивности свечения являются отдельным кластером, подтверждается.

Теоретическая часть алгоритма KMeans заключается в следующем: для каждого объекта в выборке мы присваиваем его к ближайшему центру кластера. После этого центры кластеров пересчитываются как средние значения всех объектов, принадлежащих этому кластеру. Процесс продолжается до тех пор, пока центры кластеров не перестанут изменяться.

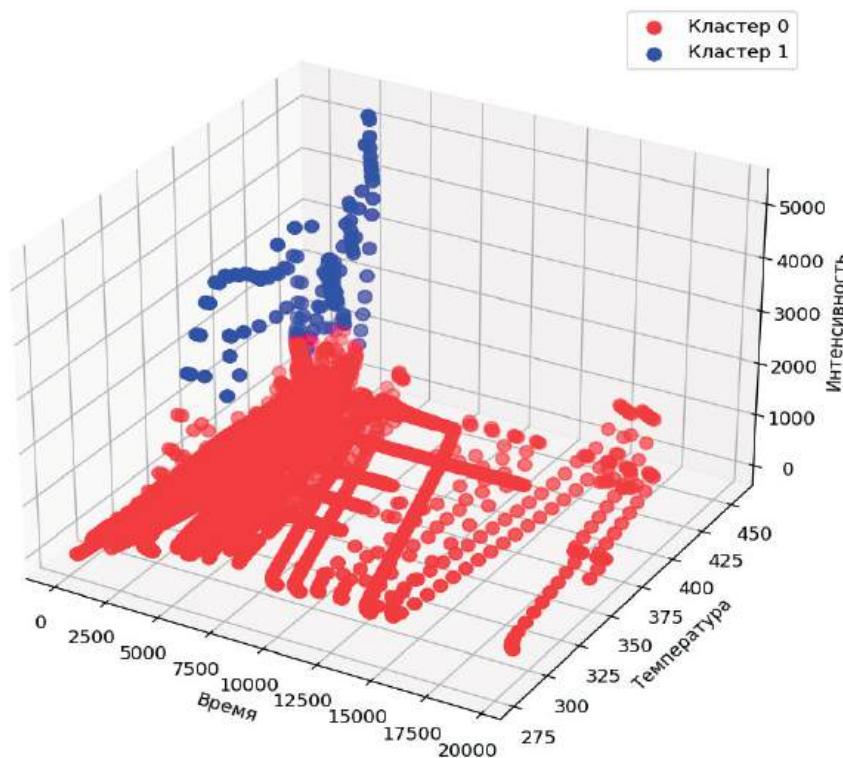


Рисунок 2. Визуализация кластеров

Figure 2. Visualization of clusters

Несмотря на свою простоту и популярность KMeans имеет несколько значительных недостатков, таких как:

- необходимость предварительного задания числа кластеров K ;
- чувствительность к выбросам и шуму в данных;
- зависимость от начального выбора центров кластеров, что может приводить к получению различных результатов на разных запусках;
- алгоритм не работает должным образом с кластерами, имеющими произвольные формы, так как основывается на эвристике минимизации расстояний.

Система методов машинного обучения

Для прогнозирования интенсивности свечения на основе новых данных была разработана функция, которая использует уже обученные модели для каждого кластера и метод кластеризации для разделения новых данных на группы.

Функция принимает новые данные (например, таблицу с параметрами времени и температуры) и с помощью обученной модели KMeans определяет, к какому кластеру относится каждая запись. Для этого данные стандартизируются, а затем каждому новому наблюдению присваивается метка кластера [4].

После того, как новый набор данных разделён по кластерам, функция обращается к соответствующей модели для каждого кластера. Для каждого наблюдения вызывается метод предсказания соответствующей модели (линейной регрессии, XGBRFRegressor и т.д.), и вычисляется предсказание интенсивности свечения.

В результате функция возвращает массив предсказанных значений интенсивности свечения для каждого временного и температурного значений в новых данных.

Также важным элементом проверки на переобучение модели является пред-

сказание на данных, которые модель никогда раньше не видела [5]. Поэтому в тестовой выборке оказываются эксперименты, на которых не производилось обучение модели.

Этот подход обеспечивает высокую точность прогнозирования, поскольку каждая модель обучена на данных своего кластера, что позволяет лучше учитывать сложные зависимости внутри каждой группы данных.

Метод машинного обучения XGBRF

Алгоритм Extreme Gradient Boosting with Random Forest (XGBRF) — это мощный метод машинного обучения, который объединяет принципы градиентного бустинга и случайного леса для улучшения предсказательной способности модели [6]. В отличие от традиционного градиентного бустинга, который строит модели последовательно, XGBRF использует параллельное построение множества деревьев решений, что значительно ускоряет процесс обучения и позволяет обрабатывать большие объёмы данных.

Теоретическая основа XGBRF заключается в использовании ансамбля решающих деревьев, где каждое дерево обучается на случайной подвыборке данных и со случайными подвыборками признаков. Итоговое предсказание модели получается путем усреднения результатов всех деревьев, что помогает уменьшить переобучение и повышает устойчивость модели к шуму в данных.

Несмотря на высокую эффективность XGBRF также имеет несколько недостатков [7, 8]:

- требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при больших объёмах данных;
- чувствительность к выбору гиперпараметров, что может потребовать тщательной настройки для достижения оптимальных результатов;

— может быть сложен для интерпретации, так как использует сложные ансамбли деревьев решений, что делает затруднительным понимание вклада отдельных признаков.

Результаты применения методов машинного обучения

Решение задачи регрессии осуществлялось с помощью языка программирования Python, а оценка точности реше-

ния через метрику MSE (среднеквадратичная ошибка), которая рассчитывается по формуле:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (1)$$

где $\tilde{y}_i$ — вычисленные значения;

y_i — экспериментальные значения.

На рисунках 3, 4 приведены результаты моделирования кинетики интенсивности свечения ПАФ в зависимости от

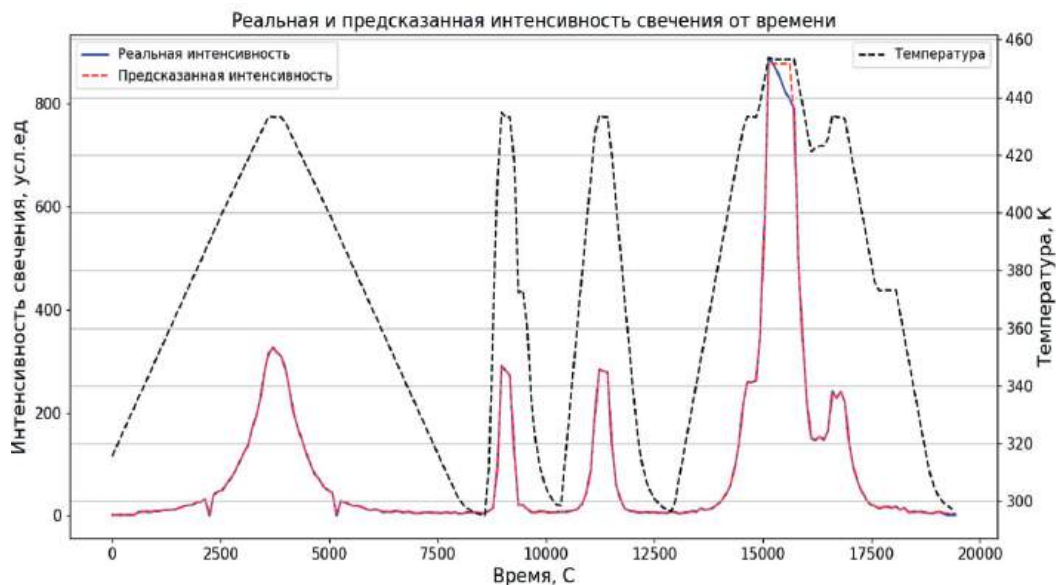


Рисунок 3. Предсказание для эксперимента

Figure 3. Prediction for the experiment

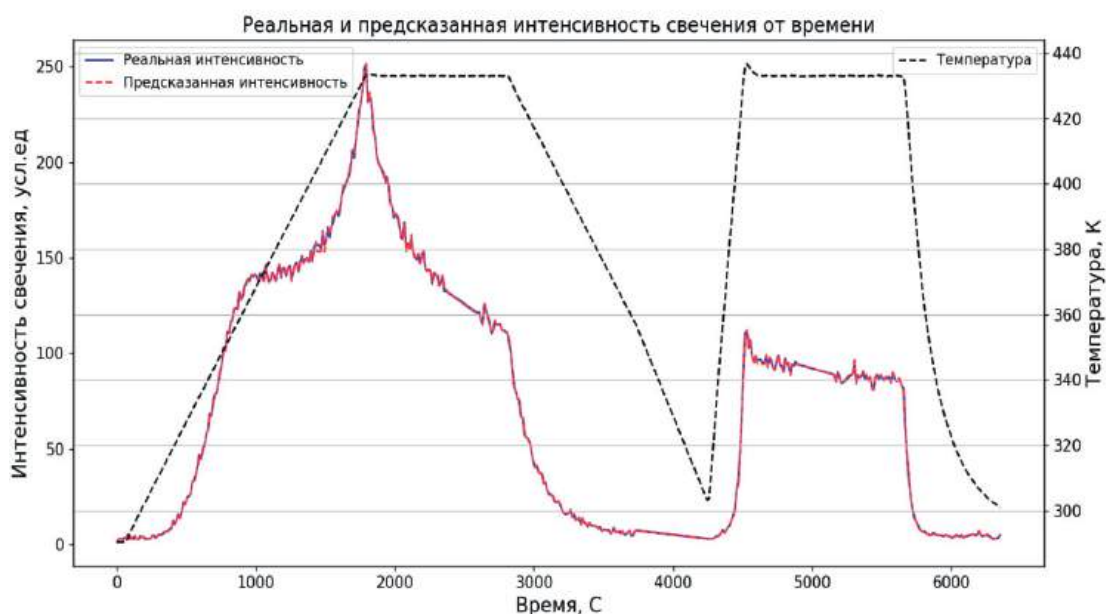


Рисунок 4. Прогноз интенсивности для нового эксперимента

Figure 4. Intensity forecast for a new experiment

изменения температуры. Синей кривой показаны экспериментальные данные интенсивности свечения после воздействия температуры (черная пунктирная кривая по вспомогательной вертикальной оси). Красная пунктирная линия показывает результаты предсказания модели.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная модель справляется с определением «пиков» и предсказывает интенсивность свечения со средней ошибкой 50 условных единиц по каждому эксперименту.

Вывод

В данной работе рассмотрены методы машинного обучения для предсказания интенсивности свечения полиарилефталидов на основе времени и температуры.

Использование алгоритма кластеризации KMeans позволило разделить данные на группы с различной динамикой зависимости интенсивности свечения от времени и температуры. Для каждого кластера были выбраны соответствующие модели: линейная регрессия для

простых зависимостей и XGBRFRegressor для более сложных. Это обеспечило высокую точность предсказаний.

Применение кросс-валидации и оценка моделей с помощью средней квадратической ошибки показали, что модели хорошо справляются с задачей предсказания и минимально отклоняются от реальных данных.

Разработанная модель может быть использована для прогнозирования свойств материалов, таких как интенсивность свечения в зависимости от температуры и времени, что имеет важное значение в химической промышленности и материаловедении. Применение таких моделей может ускорить процессы разработки новых материалов, предсказания их свойств при различных условиях эксплуатации и оптимизации технологических процессов. Модель может быть полезна для автоматизации прогнозирования характеристик материалов в реальных условиях, позволяя заранее планировать температурные режимы и продолжительность процессов на основе предсказанных данных.

Список источников

1. Овчинников М.Ю., Антипин В.А., Хурсан С.Л. Кинетическая модель термостимулированной люминесценции пленок полидифениленфталата // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 5. С. 547–554. DOI: 10.1134/S0453881119050046. EDN: SGNMPD.
2. Koledina K.F., Alexandrova A.A. Solving the Problem of Multi-Criteria Optimization of the Synthesis Reaction of Benzylalkyl Esters by the method of «Ideal» Point and Lexicographic Ordering // Computational Mathematics and Information Technologies. 2022. Vol. 1. No. 1. P. 12-19. DOI: 10.23947/2587-8999-2022-1-1-12-19.
3. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. 1-е изд. М.: ДМК Пресс, 2015. ISBN 978-5-97060-273-7.

4. Sun S., Huang R. An Adaptive k-Nearest Neighbor Algorithm // IEEE 2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. 2010. Vol. 1. P. 91-94. DOI: 10.1109/fskd.2010.5569740.
5. Брантон С.Л., Куц Дж.Н. Анализ данных в науке и технике: пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2021. 574 с. ISBN 978-5-97060-910-1.
6. Чистяков С.П. Случайные леса: обзор // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 1. С. 117-136. EDN: PZBGBL.
7. Chistyakov S.P. Random Forests: an Overview // Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. № 1. P. 117-136.
8. Müller A., Guido S. Introduction to Machine Learning using Python. O'Reilly, 2016. 340 p.
9. Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow.

М.: Диалектика, 2018. 690 с. ISBN 978-5-907203-33-4.

References

1. Ovchinnikov M.Yu., Antipin V.A., Khursan S.L. Kineticheskaya model' termostimulirovannoi lyuminestsentsii plenok polidifenilentalida [Kinetic Model of thermally Stimulated Luminescence of Polydiphenylene Phthalide Films]. *Kinetika i kataliz — Kinetics and Catalysis*, 2019, Vol. 60, No. 5, pp. 547–554. DOI: 10.1134/S0453881119050046. EDN: SGNMPD. [in Russian].
2. Koledina K.F., Alexandrova A.A. Solving the Problem of Multi-Criteria Optimization of the Synthesis Reaction of Benzylalkyl Esters by the Method of «Ideal» Point and Lexicographic Ordering. *Computational Mathematics and Information Technologies*, 2022, Vol. 1, No. 1, pp. 12-19. DOI: 10.23947/2587-8999-2022-1-1-12-19.
3. Flakh P. *Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotorye izvlekayut znaniya iz dannykh* [Machine Learning. The Science and Art of Building Algorithms That Extract Knowledge from Data]. 1st ed. Moscow, DMK Press Publ., 2015. ISBN 978-5-97060-273-7. [in Russian].
4. Sun S., Huang R. An Adaptive k-Nearest Neighbor Algorithm. *IEEE 2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2010, Vol. 1, pp. 91-94. DOI: 10.1109/fskd.2010.5569740.
5. Branton S.L., Kuts Dzh.N. *Analiz dannykh v nauke i tekhnike: per. s angl. A.A. Slinkina* [Data Analysis in Science and Technology: Transl. from Engl.]. Moscow, DMK Press Publ., 2021. 574 p. ISBN 978-5-97060-910-1. [in Russian].
6. Chistyakov S.P. Sluchainye lesa: obzor [Random Forests: an Overview]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN — Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, No 1, pp. 117-136. EDN: PZBGBL. [in Russian].
7. Müller A., Guido S. *Introduction to Machine Learning using Python*. O'Reilly, 2016. 340 p.
8. Zheron O. *Prikladnoe mashinnoe obuchenie s pomoshch'yu Scikit-Learn i TensorFlow* [Applied Machine Learning Using Scikit-Learn and TensorFlow]. Moscow, Dialektika, 2018. 690 p. ISBN 978-5-907203-33-4. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 10.04.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.

The article was submitted 10.04.2025; approved after reviewing 18.04.2025; accepted for publication 29.04.2025.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. Т. 21, № 2. С. 142–151. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2025. Vol. 21. No. 2. P. 142–151. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 621.396

doi: 10.17122/1999-5458-2025-21-2-142-151

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ И РАДИОФОТОННОЕ УСТРОЙСТВО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ



Ирина Леонидовна Виноградова

Irina L. Vinogradova

доктор технических наук,
профессор кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия



Азат Ринатович Гизатулин

Azat R. Gizatulin

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Телекоммуникационные системы»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия



Иван Константинович Мешков

Ivan K. Meshkov

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Телекоммуникационные системы»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия



Аида Рамиловна Ахметханова

Aida R. Ahmethanova

магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

Актуальность

Исследование направлено на изучение квадратично-нелинейных оптических материалов и структур, которые могут быть использованы для генерации разностной частоты в терагерцовом и субтерагерцовом диапазонах частот. Использование таких материалов открывает новые возможности для создания эффективных оптико-радиочастотных преобразователей.

Цель исследования

Разработать принцип построения нелинейного оптико-радиотехнического преобразователя на основе оптического фокона.

Ключевые слова

радиофотоника,
радио-по-волокну,
оптико-радиотехническое
преобразование,
квадратично-нелинейная
структура, генерация
разностной частоты

Методы исследования

Используется математическое моделирование процесса распространения и нелинейного взаимодействия волн внутри фокона.

Результаты

Представлен анализ материалов и структур с квадратично-нелинейными оптическими свойствами. Предложен принцип построения нелинейного оптико-радиотехнического преобразователя на основе оптического фокона.

Для цитирования: Виноградова И. Л., Гизатулин А. Р., Мешков И. К., Ахметханова А. Р. Способы получения квадратичной нелинейности и радиофотонное устройство преобразования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2025. № 2. Т. 21. С. 142-151. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-142-151>.

Original article

METHODS OF OBTAINING QUADRATIC NONLINEARITY AND RADIO-PHOTONIC CONVERSION DEVICE

Relevance

The research is devoted to the analysis of quadratic nonlinear optical materials and structures suitable for generating difference frequencies in the terahertz and subterahertz ranges. The use of such materials opens up new possibilities for the creation of efficient optical-radio converters.

Aim of research

To propose the principle for constructing a nonlinear optical-radio converter based on an optical focon.

Research methods

The mathematical model of the process of propagation and nonlinear interaction of waves inside the focon is used.

Results

The article analyzes materials with quadratic nonlinear optical properties. A principle for creating a nonlinear optical-radio converter using an optical focon has been developed.

Keywords

radio photonics, radio-over-fiber, optical-radio conversion, quadratic-nonlinear structure, difference frequency generation

For citation: Vinogradova I. L., Gizatulin A. R., Meshkov I. K., Ahmethanova A. R. Sposoby polucheniya kvadrachnoy nelineynosti i radiofotonnoye ustroystvo preobrazovaniya [Methods of Obtaining Quadratic Nonlinearity and Radio-Photonic Conversion Device]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2025, No. 2, Vol. 21, pp. 142-151 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2025-21-2-142-151>.

Введение

Одной из стратегических задач развития и внедрения сетей нового поколения является разработка новых информационных технологий, позволяющих повысить битовые скорости передачи данных (до 1 Тбит/с) и спектральную эффективность (60 бит/с/Гц) используемых радиочастотных каналов, а также использовать сверхширокополосные каналы связи (до 100 ГГц), высокую энергетическую эффективность при ультракоротких

задержках при распространении в сети до 1 мкс. Решение поставленных задач может быть достигнуто за счет исследования и разработки технологии обработки данных, основанных на новых принципах доступа к физическому уровню сети, новых схем модуляции и канального кодирования, новых форм сигналов, множественного доступа и защищенности как в беспроводном, так и оптическом канале связи. Согласно документу «White Paper on Broadband

Connectivity in 6G», который регламентирует различные пути по внедрению широкополосного доступа в беспроводных сетях поколения 6G, предполагается, что субтерагерцовые радиочастоты будут эффективны для Интернета вещей (IoT) и Промышленного интернета (IIoT). В этих задачах требуется обеспечивать работу непротяженных радиоканалов, но со значительной информационной ёмкостью, не только между людьми, человеком и устройством, но и между smart-устройствами.

Все это неизбежно предполагает использование как новых форматов модуляции, так и новых технологий физического уровня, которые обеспечивают бесшовность оптико-радиотехнического преобразования. Для обеспечения подобной бесшовности, в частности, для оптико-радиотехнического преобразования в двухчастотных (λ_1, λ_2) RoF-сетях, передающих ОАМ-сигналы, был разработан конвертер с нелинейным преобразованием [1].

Анализ оптических квадратично-нелинейных материалов и структур, потенциально пригодных для проектирования нелинейного преобразователя

Основным функциональным элементом в [1] является нелинейный оптический сегнетоэлектрический кристалл ниобата лития (LiNbO_3), обеспечивающий квадратичное ($\chi^{(2)}$) взаимодействие поступающих на него оптических пучков. На выходе кристалла генерируется электромагнитный пучок с разностной частотой. При этом в [1] доказано, что характер модуляции от входных пучков передается выходному пучку, а именно, для ОАМ-модулированных входных пучков с топологическими зарядами соответственно l_1 и l_2 на выходе также получаем ОАМ с $l_3 = |l_1 - l_2|$. Все это вызы-

вает интерес к дальнейшей разработке и продвижению бесшовного принципа оптико-радиотехнического преобразования на нелинейном элементе, представленном в [1].

Однако теоретические оценки в [1] показали, что эффективность генерации η вихревого радиопучка для нелинейной среды протяженностью порядка нескольких миллиметров является чрезвычайно низкой, а именно, имеет порядок $\eta \sim 10^{-17}$ (для входных оптических частот и выходной субтерагерцовой радиочастоты). В [1] показано также, что η существенно зависит от соотношения частот: генерируемой (разностной) ω_3 и входной ω_1 , т.е.

$$\eta \approx \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2, \quad (1)$$

где $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$.

Принцип получения разностной частоты с использованием квадратично-нелинейного элемента для входного оптического излучения на близких частотах, обеспечивающий передачу на выход модуляции, исследовался и другими авторами. Так, в [2] исследовалось преобразование ОАМ-сигнала из оптической в терагерцовую спектральные области. Там же получены и соотношения для параметров выходного сигнала, в частности, топологического заряда ОАМ ($\ell_{\text{ТГЦ}}$) и эффективности преобразования η^{DFG} :

$$\ell_{\text{ТГЦ}} = (\ell_{\text{ОРА1}} - \ell_{\text{ОРА2}}) \frac{\ell_{\text{ОРА2}} - \ell_{\text{ОРА1}}}{|\ell_{\text{ОРА2}} - \ell_{\text{ОРА1}}|}, \quad (2)$$

$$\eta_{0,l}^{DFG}(\omega_1, \omega_2) = \left| \iint u^{LG}(r, \phi, \omega_{DFG})^* \times \right. \\ \left. \times u_{DFG}(r, \phi, \omega_1, \omega_2) r dr d\phi \right|^2. \quad (3)$$

При этом эффективность преобразования, по мнению авторов [2], значительно зависит от области взаимодействия пучков, а на ее возможную зависимость вида (1) внимание не акцентируется. Авторы работ [3, 4] также считают, что квадратичный сегнетоэлектрический кристалл вполне применим для процесса параметрической генерации частот:

терагерцовой разностной, половинной равно, как и удвоенной, и суммарной. При этом эффективность выходного пучка зависит от параметров системы и пропорциональна длине прохождения z :

$$I_2 = \frac{w^4 \pi^2}{4} \beta_2^2 I_1^2 z^2 \sin^2 c^2 \left[(k_2 - 2k_1) \frac{z}{2} \right]. \quad (4)$$

Авторы работы [5] представили результаты экспериментальной апробации рассматриваемого принципа преобразования частотного состава излучения. Согласно результатам в [5], квадратично-нелинейный кристалл применим для решения поставленной задачи, однако эффективность преобразования была невысокой — не превышала 0,1 % от интенсивности входного излучения.

Действительно, сегнетоэлектрические кристаллы, такие как LiNbO_3 , LiTaO_3 , KNbO_3 , KTaO_3 , PbTiO_3 и подобные, обладают такими достоинствами, как: 1) слабая зависимость светопропускания от частоты в области видимого и ближнего ИК-излучения; 2) низкая стоимость и доступность [6]. Но при этом им присущи недостатки с точки зрения рассматриваемой задачи: 1) значение $\chi^{(2)}$ находится в диапазоне $\cong (0,5, \dots, 45) \cdot 10^{-12}$ м/В, т.е. является весьма небольшим в сравнении с другими существующими сегодня квадратично-нелинейными материалами; 2) не допускают исполнения в виде направляющей либо оптоволоконной структуры (ОВ-структуры), что и приводит к расходимости пучков, нарушению одномодового и резонансного режимов распространения.

В сегнетоэлектрических кристаллах задействован механизм электронной нелинейности [7, 8], что обеспечивает весьма быстрый отклик, но совсем скромные значения $\chi^{(2)}$. С точки зрения поиска материалов с гораздо более высокими коэффициентами нелинейности, в настоящее время можно говорить о некоторых органических материалах [9], у которых значение $\chi^{(2)}$ может находиться

в диапазоне $\cong 10^{-6}, \dots, 10^{-7}$ м/В, что представляется колоссальными величинами. Однако механизм достижения таких рекордных значений $\chi^{(2)}$ относится к молекулярной переориентации, время установления которой весьма продолжительное и может составлять величины $\approx 10^{-10}$ до 10^{-3} с.

С точки зрения рассматриваемой задачи, кроме длительного времени установления нелинейного режима существенным недостатком указанных материалов служит еще и невозможность их формирования в виде протяженных направляющих либо оптоволоконных структур. Интересным подклассом рассмотренной категории материалов с точки зрения достижения квадратично-нелинейных оптических свойств являются так называемые металлоорганические «каркасы» Metal-Organic Frameworks (MOF) [10–13]. При этом за макроскопические свойства отвечает не только органический наполнитель, но и металлическая структура, которая кроме прочностных характеристик может формировать еще и полевой потенциал при облучении электромагнитным полем соответствующего частотного диапазона [10, 14].

Согласно публикациям [11, 13], MOF могут использоваться для формирования оптической квадратичной нелинейности в задачах генерации, например второй гармоники:

$$I_{2\omega} = \frac{32\pi^3 \omega^2 s^2 \theta_{2\omega}}{c^3} |e_{2\omega} \times \chi^{(2)} e_{\omega}^2|^2 I_{\omega}^2 \propto (\chi^{(2)})^2 I_{\omega}^2. \quad (5)$$

К основным свойствам MOF можно отнести:

1) слабую зависимость светопропускания от частоты в области видимого и ближнего ИК;

2) значение $\chi^{(2)}$ находится в диапазоне $\cong 10^{-3}, \dots, 10^{-9}$ м/В, что следует признать достаточно большой величиной;

3) время установления нелинейного режима $\approx 10^{-14}$ до 10^{-3} с (время зависит от влияния металлического каркаса, включая активное влияние);

4) допускают управление свойствами внешним полем/потенциалом;

5) не могут выполняться в виде протяженных направляющих/оптоволоконных структур.

С точки зрения решения поставленной задачи MOF при определенных условиях могут использоваться в качестве основы квадратично-нелинейного элемента. А именно, в случае уменьшения времени установления нелинейного режима (до величин 10^{-14} , ..., 10^{-13} с) благодаря применению плазмонно-полевых эффектов. Существует множество разновидностей MOF, предназначенных как для нелинейной оптики, так и для микроволнового излучения [15].

Еще одним вариантом для построения квадратично-нелинейного элемента с подходящими для решаемой задачи свойствами является применение фотонно-кристаллической оптоволоконной структуры (ФК-ОВ). Здесь следует упомянуть, что ФК-ОВ обладают широчайшим набором макроскопических оптических свойств: в одних случаях их нелинейность практически сводят к нулю за счет распространения светового поля в областях, заполненных воздухом [16], а в других случаях наоборот получают существенную макроскопическую нелинейность [15–21]. Последнее может достигаться, например, за счет канализации светового поля в областях сверхмалого диаметра, что обеспечивает значительное повышение интенсивности в них и соответствующее увеличение эффективного нелинейного отклика. В качестве примера — последний вариант применяется в задачах уширения спектра действием нелинейности на короткие импульсы (с длительностями $\approx 10^{-12}$ с).

Опубликованы результаты, касающиеся получения квадратичной нелинейности в ФК-ОВ [15, 18, 19]. Так, в [19] говорится, что могут быть получены коэффициенты $\chi^{(2)}$ в диапазоне $\cong 10^{-3}$, ..., 10^{-10} м/В, что многократно превышает соответствующие значения для сегнетоэлектрических кристаллов. Могут быть задействованы и дополнительные механизмы получения нелинейности [18], связанные с дополнительно инжектируемыми носителями, которые включаются в работу при нелинейном смещении фотонной запрещенной зоны [18]. При этом данный механизм по своей сути сродни электронной нелинейности, а значит, характеризуется малым временем установления режима. Следовательно, в квадратично-нелинейных ФК-ОВ, построенных вышеперечисленным образом, можно ожидать получения значительных $\chi^{(2)}$ наряду с малыми временами вхождения в указанный режим. Очевидно также, что ФК-ОВ традиционно выполняются в виде протяженных направляющих оптоволоконных структур, что, несомненно, представляет интерес для решаемой задачи.

В [20, 21] упоминается, что квадратично-нелинейные ФК-ОВ могут успешно использоваться для генерации второй гармоники. Однако, если высокая нелинейность достигается разнесением входного светового пучка по высокоинтенсивным узким световым «нитям», то это фактически приведет к мультипольному [22] генерированию и радиочастотной волны и, вполне возможно, к искажению переносимого ею сигнала.

Согласно представленному выше анализу материалов и структур, обладающих квадратично-нелинейными оптическими свойствами, можно сделать вывод о том, что для решаемой задачи могут использоваться MOF и/или ФК-ОВ. В первом случае, т.е. для MOF можно воспользоваться либо параметрами

какой-либо известной структуры (материала) для разработки нелинейного элемента генерирования разностной частоты либо изучить влияние металлического каркаса и тем самым сформировать новые (оптимизированные) параметры MOF. Во втором случае, т.е. для ФК-ОВ при проектировании элемента генерирования необходимо учитывать свойства фотонно-кристаллической структуры, определяющие механизм нелинейности и, соответственно, механизм генерирования радиоволны, а вообще говоря, сформировать последнюю под рассматриваемую задачу.

Предлагаемое устройство преобразования и постановка задачи моделирования его параметров

Поэтому наиболее простым случаем следует признать применение MOF, например такой, как представлено в [13]. В связи с этим для минимизации потерь и повышения КПД радиофотонного устройства преобразования, предназначенного для генерирования радиочастоты, необходимо выполнить нелинейный элемент в виде направляющей структуры, сохраняющей резонансные свойства как для входного оптического, так и выходного радиоизлучения. Это может быть выполнено при изменении диаметра указанной направляющей структуры $D(z)$ вдоль оси распространения z . При этом для входного оптического излучения (λ_1, λ_2) желательно поддерживать одномодовый режим распространения на всей длине нелинейного элемента L . Или, во всяком случае, провести оптимизацию параметров нелинейного элемента так, чтобы одномодовый режим распространения для входного излучения сохранялся как можно дольше ($H_{\max}$) в случае $H < L$. Последнее может быть достигнуто при изменении радиального профиля показателя пре-

ломления материала на протяжении длины нелинейного элемента, т.е. при обеспечении соответствующего $n(z, r)$.

Таким образом, предлагаемое радиофотонное устройство преобразования должно иметь следующий вид (рисунок 1). На его вход подается оптическое излучение на двух близких длинах волн, разность которых и будет соответствовать длине генерируемой радиоволны. Обе входные длины волны вполне могут подаваться по единому входному световоду из набора стандартных оптоволокон. А в случае, когда потребуется использовать дополнительное (корректирующее) излучение (λ_{pump}), то входной световодный канал может быть выполнен, например, в виде двухсердцевинного концентрического оптоволоконка. Выходная область этого радиофотонного устройства должна иметь существенно больший диаметр, чем входная область, что необходимо для обеспечения эффективных резонансных свойств для генерируемой радиоволны. Ввиду линейности соотношений, связывающих геометрические параметры направляющей структуры с длиной волны моды, можно в качестве оценки записать:

$$\frac{D_{\text{вых}}}{D_{\text{вх}}} \approx \frac{\Lambda}{\lambda}, \quad (6)$$

где Λ — длина генерируемой радиоволны;

λ — одна из входных оптических длин волн.

Все это позволяет говорить о нелинейном элементе как о фоконе, геометрический профиль которого $D(z)$ может быть как непрерывно возрастающей функцией, так и иметь минимум в случае значительного входного диаметра. Материалом, из которого должен быть выполнен такой фокон, может быть MOF. Задача расчета параметров фокона сводится к нахождению $D(z)$ и $n(z, r)$ при известных $\lambda_1, \lambda_2, \chi^{(2)}, D_{\text{вх}}, D_{\text{вых}}$, возможно, L (может находиться в заданном диапа-

зоне) при условии получения амплитуды выходной волны свыше заданного порога: $A_\Omega \geq A^*$. Дополнительным физическим условием, обеспечивающим $A_\Omega \geq A^*$, как уже упоминалось выше, является требование о поддержании одномодового режима для входного излучения на длине H , которая в пределе $H \rightarrow L$. Акцентируем внимание на том факте, то в случае выполнения данного фокона из ФК-ОВ, к представленным выше искомым параметрам следует отнести и параметры ФК-структуры, которые не могут быть заменены усредненным $\chi^{(2)}$.

На основе изложенного выше, ставится задача о моделировании величины напряженности электрической составляющей поля для входных (с индексами 1 и 2) и выходной (3) волн с целью определения пространственного распределения показателя преломления фокона и его геометрического профиля. Введены в рассмотрение следующие параметры:

— для профиля фокона справедливо: $x^2 + y^2 = r^2 = f_1(z)$, где $f_1(z)$ — гладкая функция;

— линейный коэффициент преломления для $r^2 < f_1(z)$, внутри фокона $n(r, z)$. При этом будем считать, что $n(r, z) = n_0 + \Delta n(r, z)$, а $\Delta n(r, z)$ определяет градиент показателя и в относительном представлении одинаков для каждой из волн: $n(r, z) = n_0 + \frac{\theta(r, z)}{100\%} n_0$, где n_0 — его изначальное (невозмущенное градиентом) значение. Т.е. искомой функцией для всех волн является $\theta(r, z)$;

— параметр материала $\chi^{(2)}$ является однородным по объему фокона, что связано с его малым изменением, обусловленным наличием градиента линейного показателя преломления. Данное предположение связано с тем, что влияние изменения линейного показателя преломления из-за градиента на фазу в процессе интерференции гораздо существеннее, чем влияние изменения $\chi^{(2)}$ на нелинейный процесс. Также пренебрегаем зависимостью $\chi^{(2)}$ от частоты (длины волны) для рассматриваемых волн;

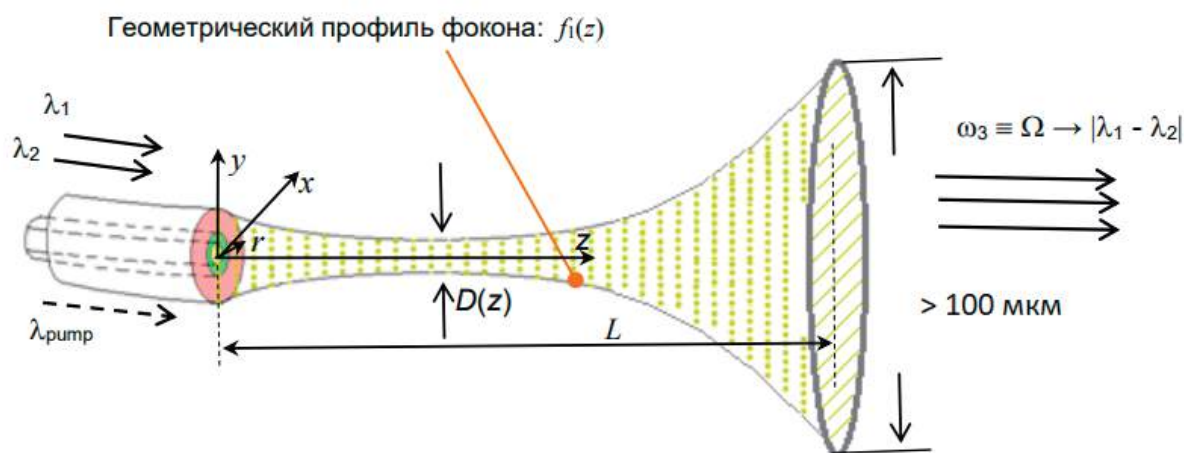


Рисунок 1. Структура предлагаемого радиофотонного устройства преобразования, обеспечивающего генерацию разностного радиоизлучения при подаче на вход оптического излучения на двух близких длинах волн

Figure 1. The structure of the proposed radio-photon conversion device that provides the generation of differential radio signal when optical radiation is supplied to the input at two close wavelengths

— коэффициент преломления вне фокона $n(r, z) = n_{об}$ для $r^2 > f_1(z)$, примем $n_{об} = 1,46$.

Выводы

В данной статье представлен анализ известных на сегодняшний день материалов и структур с квадратично-нелинейными оптическими свойствами. Данные

материалы и структуры могут быть использованы в процессе нелинейной параметрической генерации разностной частоты в оптико-радиочастотном преобразователе. Предложен принцип построения нелинейного оптико-радиочастотного преобразователя на основе оптического фокона.

Список источников

1. Багманов В.Х., Султанов А.Х., Гизатулин А.Р., Мешков И.К., Кук И.А., Грахова Е.П., Абдрахманова Г.И., Виноградова И.Л. Конвертирование вихревых пучков оптического диапазона в радиодиапазон на основе нелинейной генерации разностной частоты // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 6. С. 983-991. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-983-991. EDN: IEFTOC.
2. Miyamoto K., Sano K., Miyakawa T., Niinomi H., Toyoda K., Vallés A., Omatsu, T. Generation of High-Quality Terahertz OAM Mode Based on Soft-Aperture Difference Frequency Generation // Optics Express. 2019. Vol. 27. P. 31840. DOI: 10.1364/OE.27.031840.
3. Zhang, I., Zhao X., Zheng Y., Li H., Chen X. Universal Modeling of Second-Order Nonlinear Frequency Conversion in Three-Dimensional Nonlinear Photonic Crystals // Optics Express. 2018. Vol. 26. P. 15675-15682. DOI: 10.1364/OE.26.015675
4. Suizu K., Shibuya T., Nagano S., Akiba T., Edamatsu K., Ito H., Kawase K. Pulsed High Peak Power Millimeter Wave Generation via Difference Frequency Generation Using Periodically Poled Lithium Niobate // Japanese Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 46. P. L982-L984. DOI: 10.1143/JJAP.46.L982.
5. Wei D., Wang C., Wang H., Hu X., Wei D., Fang X., Zhang Y., Wu D., Hu Y., Li J. Experimental Demonstration of a Three-Dimensional Lithium Niobate Nonlinear Photonic Crystal // Nature Photonics. 2018. P. 596-600. DOI: 10.1038/s41566-018-0240-2.
6. Sungwon K. Optical, Electrical and Elastic Properties of Ferroelectric Domain Walls in LiNbO₃ and LiTaO₃ // A Thesis in Materials. The Pennsylvania State University, State College, PA, USA, 2003. 230 p.
7. Жаботинский М.Е. Квантовая электроника // Физическая энциклопедия. М., 1969. Т. 2. С. 319-320.
8. Koch S.W., Peyghambarian N., Gibbs H.M. Band-Edge Nonlinearities in Direct-Gap Semiconductors and Their Application to Optical Bistability and Optical Computing // Journal of Applied Physics. 1988. No. 63. R1. <https://doi.org/10.1063/1.340098>.
9. Jazbinsek M., Puc U., Abina A., Zidansek A. Organic Crystals for THz Photonics // Applied Sciences. 2019. No. 9. P. 882. DOI: 10.3390/app9050882.
10. Marder S., Tiemann B., Perry J.W. New Organic and Organometallic Salts for Second-Order Nonlinear Optics // Proceedings of the 33rd Annual Technical Symposium, San Diego, CA, USA, 1990. 1990. DOI: 10.1117/12.962113.
11. Calabrese J.C., Lap-Tak C., Green J.C., Marder S.R., Tamt W. Molecular Second-Order Optical Nonlinearities of Metallocenes // J. Am. Chem. Soc. 1991. Vol. 113. P. 7227-7232. URL: <https://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch612/documents/calabrese.pdf>.
12. Hierlinger C., Cordes D.B., Slawin A., Colombo A., Dragonetti C., Righetto S., Roberto D., Jacquemin D., Zysman-Colman E., Guerchais V. An Investigation on the Second-Order Nonlinear Optical Response of Cationic Bipyridine or Phenanthroline Iridium (III) Complexes Bearing Cyclometallated 2-Phenylpyridines with a Triphenylamine Substituent // Dalton Trans. 2018. Vol. 47. P. 8292-8300. DOI: 10.1039/c8dt00754c.
13. Mendiratta S., Lee C.-H., Usman M., Lu K.-L. Metal-Organic Frameworks for Electronics: Emerging Second Order Nonlinear Optical and Dielectric Materials // Sci. Technol. Adv. Mater. 2015. Vol. 16. P. 54204. DOI: 10.1088/1468-6996/16/5/054204.
14. Майер С.А. Плазмоника: теория и приложения. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 296 с. ISBN 978-5-93972-875-1.
15. Du S., Zhang H. Metal-Organic Frameworks for Second-Order Nonlinear Optics // Metal-Organic Frameworks for Photonics Applications

Struct. Bond. 2013. Vol. 157. P. 145-165. DOI: 10.1007/430_2013_107.

16. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press: Princeton, New Jersey, USA, 2008. 283 p. ISBN 978-0-691-12456-8.

17. Tzankov P., Petrov V. Effective Second-Order Nonlinearity in Acentric Optical Crystals with Low Symmetry // *Applied Optics*. 2005. Vol. 44. P. 6971-6985. DOI: 10.1364/AO.44.006971.

18. Feigel A., Kotler Z., Sfez B. Artificial Second Order Non-Linearity in Photonic Crystals // *Materials Research Society*. 2011. Vol. 694. P. 709-713. DOI: 10.1557/PROC-694-K9.5.

19. Dumeige Y., Sagnes I., Monnier P., Vidakovic P., Abram I., Mériadec C., Levenson A. Phase-Matched Frequency Doubling at Photonic Band Edges: Efficiency Scaling as the Fifth Power of the Length // *Phys. Rev. Lett.* 2002. No. 89. P. 043901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.043901.

20. Centini M., Sibilia C., Scalora M., D'Aguanno G., Bertolotti M., Bloemer M.J., Bowden C.M., Nefedov I. Dispersive Properties of Finite, One-Dimensional Photonic Band Gap Structures: Applications to Nonlinear Quadratic Interactions // *Phys. Rev.* 1999. Vol. E60. P. 4891. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.60.4891>.

21. D'Aguanno G., Centini M., Scalora M., Sibilia C., Dumeige Y., Vidakovic P., Levenson J.A., Bloemer M.J., Bowden C.M., Haus J.W., e.a. Photonic Band Edge Effects in Finite Structures and Applications to $\chi(2)$ Interactions // *Phys. Rev.* 2001. Vol. E64. P. 016609. DOI: 10.1103/PhysRevE.64.016609.

22. Meshkov I.K., Gizatulin A.R., Kuk I.A., Grakhova E.P., Abdrakhmanova G.I., Voronkova A.V., Vinogradova I.L., Bagmanov V.K., Sultanov A.K. The Principle of Constructing Antenna Arrays for Generating OAM Radio Waves Based on Multipole Decomposition of Electromagnetic Field. *TELFOR*, 2018, pp. 8611889. DOI: 10.1109/TELFOR.2018.8611889.

References

1. Bagmanov V.Kh., Sultanov A.Kh., Gizatulin A.R., Meshkov I.K., Kuk I.A., Grakhova E.P., Abdrakhmanova G.I., Vinogradova I.L. Konvertirovanie vikhrevykh puchkov opticheskogo diapazona v radiodiapazon na osnove nelineinoy generatsii raznostnoy chastoty [Optics-To-Thz Conversion of Vortex Beams Using Nonlinear Difference Frequency]. *Komp'yuternaya optika — Computer Optics*, 2019, Vol. 43, No. 6, pp. 983-991. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-983-991. EDN: IEFTOC. [in Russian].

2. Miyamoto K., Sano K., Miyakawa T., Niinomi H., Toyoda K., Vallés A., Omatsu T. Generation of High-Quality Terahertz OAM Mode Based on Soft-Aperture Difference Frequency Generation. *Optics Express*, 2019, Vol. 27, pp. 31840. DOI: 10.1364/OE.27.031840.

3. Zhang, I., Zhao X., Zheng Y., Li H., Chen X. Universal Modeling of Second-Order Nonlinear Frequency Conversion in Three-Dimensional Nonlinear Photonic Crystals. *Optics Express*, 2018, Vol. 26, pp. 15675-15682. DOI: 10.1364/OE.26.015675.

4. Suizu K., Shibuya T., Nagano S., Akiba T., Edamatsu K., Ito H., Kawase K. Pulsed High Peak Power Millimeter Wave Generation via Difference Frequency Generation Using Periodically Poled Lithium Niobate. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, Vol. 46, pp. L982-L984. DOI: 10.1143/JJAP.46.L982.

5. Wei D., Wang C., Wang H., Hu X., Wei D., Fang X., Zhang Y., Wu D., Hu Y., Li J. Experimental Demonstration of a Three-Dimensional Lithium Niobate Nonlinear Photonic Crystal. *Nature Photonics*, 2018, pp. 596-600. DOI: 10.1038/s41566-018-0240-2.

6. Sungwon K. Optical, Electrical and Elastic Properties of Ferroelectric Domain Walls in LiNbO_3 and LiTaO_3 . *A Thesis in Materials*, The Pennsylvania State University, State College, PA, USA, 2003. 230 p.

7. Zhabotinskii M.E. Kvantovaya elektronika [Quantum Electronics]. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Physical Encyclopedia]. Moscow, 1969, Vol. 2, pp. 319-320. [in Russian].

8. Koch S.W., Peyghambarian N., Gibbs H.M. Band-Edge Nonlinearities in Direct-Gap Semiconductors and Their Application to Optical Bistability and Optical Computing. *Journal of Applied Physics*, 1988, No. 63, R1. <https://doi.org/10.1063/1.340098>.

9. Jazbinsek M., Puc U., Abina A., Zidansek A. Organic Crystals for THz Photonics. *Applied Sciences*, 2019, No. 9, pp. 882. DOI: 10.3390/app9050882.

10. Marder S., Tiemann B., Perry J.W. New Organic and Organometallic Salts for Second-Order Nonlinear Optics. *Proceedings of the 33rd Annual Technical Symposium, San Diego, CA, USA, 1990*. 1990. DOI: 10.1117/12.962113.

11. Calabrese J.C., Lap-Tak C., Green J.C., Marder S.R., Tamt W. Molecular Second-Order Optical Nonlinearities of Metallocenes. *J. Am. Chem. Soc.*, 1991, Vol. 113, pp. 7227-7232. URL: <https://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch612/documents/calabrese.pdf>.

12. Hierlinger C., Cordes D.B., Slawin A., Colombo A., Dragonetti C., Righetto S., Roberto D., Jacquemin D., Zysman-Colman E., Guerchais V. An Investigation on the Second-Order Nonlinear Optical Response of Cationic Bipyridine or Phenanthroline Iridium (III) Complexes Bearing Cyclometallated 2-Phenylpyridines with a Triphenylamine Substituent. *Dalton Trans.*, 2018, Vol. 47, pp. 8292-8300. DOI: 10.1039/c8dt00754c.
13. Mendiratta S., Lee C.-H., Usman M., Lu K.-L. Metal-Organic Frameworks for Electronics: Emerging Second Order Nonlinear Optical and Dielectric Materials. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2015, Vol. 16, pp. 54204. DOI: 10.1088/1468-6996/16/5/054204.
14. Maier S.A. *Plazmonika: teoriya i prilozheniya* [Plasmonics: Theory and Applications]. Moscow-Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2011. 296 p. ISBN 978-5-93972-875-1. [in Russian].
15. Du S., Zhang H. Metal-Organic Frameworks for Second-Order Nonlinear Optics. *Metal-Organic Frameworks for Photonics Applications Struct. Bond.*, 2013, Vol. 157, pp. 145-165. DOI: 10.1007/430_2013_107.
16. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press: Princeton, New Jersey, USA, 2008. 283 p. ISBN 978-0-691-12456-8.
17. Tzankov P., Petrov V. Effective Second-Order Nonlinearity in Acentric Optical Crystals with Low Symmetry. *Applied Optics*, 2005, Vol. 44, pp. 6971-6985. DOI: 10.1364/AO.44.006971.
18. Feigel A., Kotler Z., Sfez B. Artificial Second Order Non-Linearity in Photonic Crystals. *Materials Research Society*, 2011, Vol. 694, pp. 709-713. DOI: 10.1557/PROC-694-K9.5.
19. Dumeige Y., Sagnes I., Monnier P., Vidakovic P., Abram I., Mériadec C., Levenson A. Phase-Matched Frequency Doubling at Photonic Band Edges: Efficiency Scaling as the Fifth Power of the Length. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, No. 89, pp. 043901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.043901.
20. Centini M., Sibilica C., Scalora M., D'Aguanno G., Bertolotti M., Bloemer M.J., Bowden C.M., Nefedov I. Dispersive Properties of Finite, One-Dimensional Photonic Band Gap Structures: Applications to Nonlinear Quadratic Interactions. *Phys. Rev.*, 1999, Vol. E60, pp. 4891. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.60.4891>.
21. D'Aguanno G., Centini M., Scalora M., Sibilica C., Dumeige Y., Vidakovic P., Levenson J.A., Bloemer M.J., Bowden C.M., Haus J.W., e.a. Photonic Band Edge Effects in Finite Structures and Applications to $\chi(2)$ Interactions. *Phys. Rev.*, 2001, Vol. E64, pp. 016609. DOI: 10.1103/PhysRevE.64.016609.
22. Meshkov I.K., Gizatulin A.R., Kuk I.A., Grakhova E.P., Abdrakhmanova G.I., Voronkova A.V., Vinogradova I.L., Bagmanov V.K., Sultanov A.K. *The Principle of Constructing Antenna Arrays for Generating OAM Radio Waves Based on Multipole Decomposition of Electromagnetic Field*. TELFOR 2018, pp. 8611889. DOI: 10.1109/TELFOR.2018.8611889.

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 07.03.2025; принята к публикации 26.03.2025.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 07.03.2025; accepted for publication 26.03.2025.

ОБ АВТОРАХ

Афлятунов Радмир Рифович

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

Ахметханова Аида Рамиловна

магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Бадамшин Алексей Эдуардович

студент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Баязитов Фанур Анурович

ассистент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Васильев Пётр Игоревич

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

Виноградова Ирина Леонидовна

доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Воронин Сергей Григорьевич

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

Габидуллина Зульфия Газинуровна

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

Гизатулин Азат Ринатович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Демин Алексей Юрьевич

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

Димукашева Гульназ Ержановна

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

Клиначев Николай Васильевич

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

Коледин Сергей Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и прикладной математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Коледина Камила Феликсовна

доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории математической химии, Институт нефтехимии и катализа Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук; профессор кафедры информационных технологий и прикладной математики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Коловертнов Геннадий Юрьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, телекоммуникация и метрология», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Кондрашова Юлия Николаевна

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

Краснов Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, телекоммуникации и метрологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Кулёва Надежда Юрьевна

старший преподаватель кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Лосев Федор Алексеевич

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

Мешков Иван Константинович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Мухаметшин Андрей Валерьевич

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

Нигматуллин Ильшат Ришатович

кандидат технических наук, главный специалист ООО «Химмотолог», Уфа, Россия

Нурлыгаянов Тимур Робертович

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

Нурлыгаянова Екатерина Фарагатовна

старший преподаватель кафедры электронной инженерии, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Павлов Александр Дмитриевич

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

Прахова Марина Юрьевна

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

Ревякин Егор Евгеньевич

ассистент кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Рузанов Максим Евгеньевич

студент кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Слепнев Сергей Вячеславович

магистрант Высшей школы информационных и социальных технологий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Сулейманов Игорь Нугуманович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии и прикладная математика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Сухачев Илья Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий базовой кафедрой АО «СУЭНКО», Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Сушков Валерий Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетика», Нижневартовский государственный университет, Нижневартовск, Россия

Третьяков Андрей Максимович

магистрант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, 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 Высшей школы информационных и социальных технологий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Хакимьянов Марат Ильгизович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Росси

Чулкова Полина Дмитриевна

магистрант, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Шабуров Павел Олегович

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

Шалимов Алексей Витальевич

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

Шумихин Андрей Юрьевич

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

Федоров Сергей Николаевич

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

Филиппова Екатерина Владимировна

студент кафедры «Корпоративные финансы и учетные технологии», 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

Aflyatunov Radmir R.

Assistant of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Ahmethanova Aida R.

Undergraduate Student of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Badamshin Alexey E.

Student of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Bayazitov Fanur A.

Assistant of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Chulkova Polina D.

Undergraduate Student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Demin Aleksei Yu.

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Dimukasheva Gulnaz Ye.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Fedorov Sergey N.

Senior Lecturer of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Filippova Ekaterina V.

Student of Corporate Finance and Accounting Technologies 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

Gizatulin Azat R.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Telecommunication Systems Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Gizatullin Farit A.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khakimov Erik R.

Undergraduate Student of Higher School of Information and Social Technologies, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khakimyanov Marat I.

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khazieva Regina T.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Department of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Klinachev Nikolay V.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Aircraft Department, South Ural State University, Chelyabinsk, 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

Koledina Kamila F.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Laboratory of Mathematical Chemistry, Institute of Petrochemistry and Catalysis, Federal State Budgetary Scientific Institution Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences; Professor of Information Technologies and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kolovertnov Gennady Yu.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation Department, Telecommunication and Metrology, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kondrashova Yulia N.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department «Power Supply of Industrial Enterprises», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Krasnov Andrey N.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation, Telecommunications and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kuleva Nadezhda Yu.

Senior Lecturer of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Losev Fedor A.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Meshkov Ivan K.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Telecommunication Systems Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Mukhametshin Andrey V.

Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Nigmatullin Ilshat R.

Candidate of Engineering Sciences, Chief Specialist of Khimmotolog LLC, Ufa, Russia

Nurlygayanov Timur R.

Postgraduate Student of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Nurlygayanova Ekaterina F.

Senior Lecturer of Electronic Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Pavlov Alexander D.

Student of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Prakhova Marina Yu.

Assistant Professor of Automation, Telecommunication and Metrology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Revyakin Egor E.

Assistant of Electric Power Engineering Department, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Ruzanov Maxim E.

Student of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Shaburov Pavel O.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Aircraft Department, Assistant Professor of Electronic Computers Departments, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Shalimov Aleksey V.

Postgraduate Student of the Department «Power Supply of Industrial Enterprises», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Shumikhin Andrey Yu.

Undergraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Slepnev Sergei V.

Undergraduate Student of Higher School of Information and Social Technologies, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Sukhachev Ilya S.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Base Department at SUENKO JSC, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Suleymanov Igor N.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Information Technologies and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Sushkov Valery V.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Power Engineering Department, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia

Tretiakov Andrey M.

Postgraduate Student of the Department «Power Supply of Industrial Enterprises», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Vasiliev Petr I.

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Vinogradova Irina L.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Computer Science and Engineering Cybernetics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Voronin Sergey G.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Researcher of Advanced Engineering School «Motors of the Future», Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Yashin Anton N.

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc. (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 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.