

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 4, т. 20, 2024

Electrical and data processing facilities and systems

№ 4, т. 20, 2024

Подписной индекс ПБ092 в каталоге «Почта России».

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

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



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

№ 4, т. 20, 2024

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

Учредитель

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

Международный стандартный серийный
номер ISSN 1999-5458

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

Журнал включен:

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

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

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

Свободная цена. **12+**

Дата выхода в свет: 20.01.2025 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19.53.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 02.

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. 4, Vol. 20, 2024

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

Founder

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

International standard serial number
ISSN 1999-5458

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

The journal is included:

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

Subscription through Russian Post. Subscription Index ПБ092.

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

Price is free. **12+**

Date of publication 20.01.2025. Paper format 60×84/8.
Offset printing. 19.53 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 02.

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

Шабанов В. А., Хазиева Р. Т., Хакимьянов М. И.

КАФЕДРЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЙ УГНТУ 70 ЛЕТ

9

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Портнягин Н. Н., Головин М. М.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДЕРЖКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

21

Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Рогинская Л. Э., Бакиров А. А., Хакимьянов М. И.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ
МОЩНОСТИ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

31

Шабо К., Ляпушкин С. В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО
ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ
ТОКА РОТОРА

50

Сираев Ф. Ф., Хазиева Р. Т.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ
РЕГУЛЯТОРОМ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

59

Яшин А. Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БАЛАНСИРНОГО
УРАВНОВЕШИВАЮЩЕГО КОНТРГРУЗА НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ШТАНГОВОГО
ГЛУБИННОГО НАСОСА

73

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Баширов М. Г., Крышко К. А., Хафизов А. М.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ГИДРИРОВАНИЯ АЦЕТИЛЕНА

84

Баширов М. Г., Крышко К. А., Хафизов А. М.

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ГИДРИРОВАНИЯ АЦЕТИЛЕНА

92

Жаринов Ю. А., Латыпов Р. Р.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ПРЕДПОЛЕТНОЙ ПОДГОТОВКИ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

100

Лысенко О. А.

НАБЛЮДАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ
С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ 109

Сафиев Д. А., Туктаров Р. Р., Хазиева Р. Т.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ СОЛНЕЧНОЙ
ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 118

Шишеников М. А.

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА
НЕФТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ 130

Хлюпин П. А., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И.

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ
ИНДУКЦИОННОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ПЛОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ 143

Об авторах 154

Список статей, изданных в 2024 году 160

CONTENT

Shabanov V. A., Khazieva R. T., Khakimyanov M. I.

70th ANNIVERSARY OF THE ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRICAL EQUIPMENT OF ENTERPRISES DEPARTMENT OF USPTU	9
---	---

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

Portnyagin N. N., Golovin M. M.

ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF THE DYNAMIC MAGNETIZATION DELAY OF ELECTRICAL STEEL IN ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS	21
--	----

Gorbunov A. S., Karimov R. D., Roginskaya L. E., Bakirov A. A., Khakimyanov M. I.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF LOW-POWER ELECTRIC GENERATORS FOR WIND POWER PLANTS	31
--	----

Shabo K., Lyapushkin S. V.

OPTIMIZATION OF DYNAMIC MODES OF AN ASYNCHRONOUS POSITIONAL ELECTRIC DRIVE WITH A THYRISTOR ROTOR CURRENT REGULATOR	50
--	----

Siraev F. F., Khazieva R. T.

DESIGN OF A VARIABLE FREQUENCY DRIVE WITH A PROPORTIONAL- INTEGRAL-DIFFERENTIAL CONTROLLER FOR A MAIN PUMP UNIT	59
--	----

Yashin A. N.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE BALANCED COUNTER-LOAD ON THE OUTPUT PARAMETERS OF THE ELECTRICAL COMPLEX OF A SUCKER RODS PUMP UNIT	73
---	----

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

Bashirov M. G., Kryshko K. A., Khafizov A. M.

ALGORITHMIC SUPPORT OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE ACETYLENE HYDROGENATION PROCESS	84
---	----

Bashirov M. G., Kryshko K. A., Khafizov A. M.

SOFTWARE AND TECHNICAL IMPLEMENTATION OF THE INFORMATION MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE ACETYLENE HYDROGENATION PROCESS	92
--	----

Zharinov Yu. A., Latypov R. R.

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL SIMULATOR FOR PREFLIGHT TRAINING OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE	100
--	-----

<i>Lysenko O. A.</i>	
PUMPING UNIT PRESSURE OBSERVER WITH ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE	109
<i>Tuktarov R. R., Safiev D. A., Khazieva R. T.</i>	
PREDICT AND MANAGE SOLAR ENERGY PRODUCTION WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE	118
<i>Shishenkov M. A.</i>	
INFORMATION MODELING OF OIL TRANSPORT OBJECTS USING SEMANTIC TECHNOLOGIES	130
<i>Khlopun P. A., Aflyatunov R. R., Vasiliev P. I.</i>	
MICROPROCESSOR POWER CONTROL SYSTEM FOR INDUCTION HEATING SYSTEM BASED ON PULSE-DENSITY MODULATION	143
About the Authors	154
List of Articles Published in 2024	160

Научная статья

УДК 621.317.7.087.6

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-9-20

КАФЕДРЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ УГНТУ 70 ЛЕТ



Виталий Алексеевич Шабанов
Vitaliy A. Shabanov

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



Регина Тагировна Хазиева
Regina T. Khazieva

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



Марат Ильгизович Хакимьянов
Marat I. Khakimyanov

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

В статье рассматривается история кафедры электротехники и электрооборудования предприятий УГНТУ с момента образования до наших дней. Перечислены основные этапы в развитии кафедры, достижения в учебной и научной деятельности.

Свое будущее кафедра электротехники и электрооборудования предприятий связывает с молодежью, которая после окончания магистратуры ведет учебную нагрузку и активно занимается наукой в аспирантуре. Будучи еще студентами старших курсов, они начинают работать на кафедре, выигрывают гранты для финансирования своих исследований, которые впоследствии становятся их диссертациями.

Ключевые слова

кафедра, электротехника
и электрооборудование
предприятий,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
история кафедры
электротехники
и электрооборудования
предприятий

Для цитирования: Шабанов В. А., Хазиева Р. Т., Хакимьянов М. И. Кафедре электротехники и электрооборудования предприятий УГНТУ 70 лет // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 9–20. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-9-20>.

70TH ANNIVERSARY OF THE ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRICAL EQUIPMENT OF ENTERPRISES DEPARTMENT OF USPTU

The article examines the history of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department of Ufa State Petroleum Technological University from its foundation to the present day. The main stages in the development of the department, achievements in educational and scientific activities are listed.

The Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department associates its future with young people who, after completing their master's degree, carry out teaching work and are actively involved in science in graduate school. While being still senior students, they begin working at the department, win grants to finance their research, which later becomes their dissertations.

Keywords

Department, Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University, History of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises

For citation: Shabanov V. A., Khazieva R. T., Khakimyanov M. I. Kafedre elektrotekhniki i elektrooborudovaniya predpriyatiy UGNTU 70 let [70th Anniversary of the Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department of USPTU]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 9-20 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-9-20>.

Кафедра электротехники и электрооборудования предприятий (ЭЭП) является одной из старейших кафедр Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ). Кафедра была организована в составе Уфимского нефтяного института (УНИ) в 1954 г. при разделении кафедры нефтяной энергетики. Основателем и первым заведующим кафедрой был кандидат технических наук, доцент Владимир Антонович Кочинашвили (рисунок 1). Активно участвовал в организации учебного процесса, особенно в части курсового проектирования, руководитель проекта института «Башнефтепроект» С. И. Бак [1, 2].

Кафедра размещалась в подвальном помещении на улице Л. Толстого. Под руководством доцента В. А. Кочинашвили проводились исследования диэлектрической проницаемости обводненных нефтей, на основании которых был разработан автоматический влагомер нефти.



Рисунок 1. Первый заведующий кафедрой В. А. Кочинашвили

Figure 1. First Head of Department V. A. Kochinashvili

Совместно с институтом «Башнефтепроект» исследовались проблемы перехода кабельных линий через большие препятствия, а также вопросы автоматизации технологических установок нефтегазовой отрасли. В 1962–1963 гг. в Уфимском нефтяном институте началась подготовка студентов по специальности «Электрификация и автоматизация горных работ». В качестве выпускающей кафедры в 1960 г. была создана кафедра автоматизации производственных процессов (АПП), выделившаяся из кафедры электротехники. Совместно с кафедрой АПП кафедра электротехники обеспечивала подготовку студентов по новой специальности.

В 70-х гг. XX в. на кафедре после окончания УНИ остались В. И. Бабакин (1970 г.), В. А. Шабанов (1971 г.), С. В. Чигвинцев (1973 г.), из Ташкентского политехнического института перевелся К. М. Фаттахов (1976 г.), с кафедры АПП перешел Б. В. Гузеев (1977 г.) (рисунок 2). В 1970 г. заведующим кафедрой стал доцент Анвар Мухамедович Валеев [3, 4]. Обладая редкими организаторскими способностями, А. М. Валеев

за короткое время переоборудовал лабораторию электротехники, которая стала одной из лучших в стране среди аналогичных вузовских лабораторий, организовал новую лабораторию по релейной защите и автоматике. Большой вклад в создание лабораторий внес учебный мастер Ф. И. Семенов.

А. М. Валеев стал одним из инициаторов активного внедрения технических средств обучения (ТСО) в учебный процесс. По его инициативе в институте были оборудованы ТСО лекционные аудитории 1-432 и 1-326. На кафедре активно разрабатывались перспективные научные направления: разработка односистемных дистанционных защит (научный руководитель А. М. Валеев), разработка регулируемого электропривода погружных центробежных насосов (научный руководитель доцент К. М. Фаттахов). В 1976 г. А. М. Валеев был награжден Почетной грамотой Верховного Совета БАССР. В 1979 г. по инициативе А. М. Валеева в УНИ на базе кафедры электротехники проводится расширенное заседание Президиума НТС Минвуза РФ по электротехнике.



Рисунок 2. Коллектив кафедры электротехники в 1970-е гг.

Figure 2. The staff of Electrical Engineering Department in the 1970s

В 1986 г. защитил докторскую диссертацию доцент Салаватского филиала Алексей Алексеевич Абакумов. В начале 1986 г. он был избран заведующим кафедрой электротехники. Под его руководством в 1986–1987 гг. на кафедре развернулись научно-исследовательские работы по электромагнитным методам неразрушающего контроля. Активное участие в научных исследованиях принимали доцент К. М. Фаттахов, старшие преподаватели В. И. Бабакин и Р. А. Башаров. За короткое время был разработан магнитотелевизионный дефектоскоп, успешно прошедший опытные испытания.

В 1987 г. заведующим кафедрой был избран доцент Виталий Алексеевич Шабанов, выпускник кафедры 1971 г. (рисунок 3). В первые годы основное внимание в своей работе он сконцентрировал на организации новой специальности на базе кафедры.

С 1989 г. на кафедре электротехники началась подготовка студентов по специ-



Рисунок 3. В. А. Шабанов

Figure 3. V. A. Shabanov

альности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». С этого момента начался новый этап в развитии кафедры. Кафедра электротехники из общетехнической превратилась в выпускающую и была переименована, получив название «Электротехника и электрооборудование предприятий» (рисунок 4).

Определяющим мотивом создания выпускающей кафедры явилась постоянно растущая потребность нефтегазовой отрасли в высококвалифицированных инженерах-электриках, способных решать задачи проектирования и эксплуатации систем электроснабжения, электропривода и релейной защиты электротехнических комплексов и на этой основе обеспечивать повышение эффективности и надежности работы технологических установок и промышленных предприятий. На кафедре были созданы новые лаборатории микропроцессорной техники и автоматизированного электропривода, переоборудованы лаборатории релейной защиты и электрических машин. Наряду с подготовкой лабораторной базы разрабатывалось методическое обеспечение для новой специальности, создавались программы производственных практик и тематика заданий на дипломное проектирование. Большую помощь в организации производственных практик оказали НГДУ «Уфанефть» (главный энергетик Р. Ф. Шагалеев), нефтеперерабатывающий завод УНХ (главный энергетик в начале 90-х гг. А. К. Бовин, затем И. П. Берген) и др.

В 1994 г. состоялся первый выпуск (16 специалистов) по специальности 21.05.06 (группа АЭ-89). Основную тяжесть нагрузки по организационному и методическому обеспечению первого выпуска приняли на себя опытные преподаватели: заведующий кафедрой В. А. Шабанов, доценты В. А. Кочинашвили, В. И. Бабакин, С. В. Чигвинцев,



Рисунок 4. Лаборатория общей и теоретической электротехники (начало 1990-х)

Figure 4. General and Theoretical Electrical Engineering Laboratory (early 1990s)

К. М. Фаттахов и Б. В. Гусев. Большой вклад в подготовку первого выпуска принадлежит и молодым преподавателям: кандидату технических наук, доценту А. Г. Капустину, ассистентам А. К. Зиннову, Т. Г. Аязяну, С. К. Степанову.

В 1996 г. по инициативе доцента С. В. Чигвинцева при кафедре открыта аспирантура. Первыми кандидатами наук из выпускников кафедры стали О. В. Кирюшин (группа АЭ-92), В. В. Багижев (АЭ-91), З. Х. Павлова (АЭ-90), М. И. Хакимьянов (АЭ-94).

Наряду с подготовкой по дневной форме обучения кафедра большое внимание уделяет подготовке высококвалифицированных инженеров-электриков по заочной форме обучения. Подготовка по заочной форме обучения была начата на кафедре в 1995 г., первый выпуск — в 2001 г.

Напряженная работа кафедры по организации выпуска молодых специалистов привела к активизации учебно-методической и научной работы. С начала 90-х гг. преподавателями кафедры почти ежегодно издавались учебные пособия и курсы лекций. Всего за последние годы издано более 100 учебных пособий, 6 из которых с грифом «УМО» по образованию в области энергетики и электротехники, 12 монографий. Большую помощь в подготовке учебно-методических работ и научных сборников оказывала специалист по методической работе Е. В. Бикинеева. Сотрудниками кафедры опубликовано в различных научно-технических журналах и сборниках более 800 статей и получено более 200 авторских свидетельств и патентов.

В 2001–2002 гг. годовой объем хозяйственных работ кафедры превысил мил-

лион рублей. В 2004 г. на кафедру был принят Конесев Сергей Геннадьевич — выпускник и преподаватель Уфимского авиационного института. С его приходом развиваются новые направления научных разработок, связанные с электротехнологическими устройствами и системами, источниками вторичного электропитания [5]. По инициативе доцента С. Г. Конесева в 2005 г. кафедра провела Первую Республиканскую научно-техническую конференцию, был выпущен первый кафедральный сборник трудов. С 2007 г. сборники трудов кафедры выпускаются ежегодно. Раз в два года кафедра проводит Всероссийские научно-технические конференции. В 2013 г. проведена первая международная конференция. Активное участие в подготовке сборников и проведении конференций принимают П. А. Хлюпин, М. И. Хакимьянов, З. Х. Павлова, Р. Т. Хазиева и др.

Появление научных сборников межвузовских трудов и всероссийских конференций способствовало росту публикационной активности преподавателей и сотрудников кафедры. С 2007 г. было проведено 9 научно-технических конференций, 2 из которых имеют статус всероссийских, 1 всероссийской с международным участием и 8 международных. На 2024 г. общее количество выпущенных сборников равно 18.

Научная работа в 2000-х гг. проводилась по следующим основным направлениям: исследование и разработка многофазных реле сопротивления и оптимизация характеристик дистанционных защит линий электропередачи, исследование по разработке устройств для определения места повреждения в электрических сетях, исследование импульсных источников электродинамических сил. В настоящее время основные научные направления на кафедре: частотно-регулируемый электропривод на предприя-

тиях нефтегазовой отрасли, релейная защита и автоматика, электротехнологии на базе использования индукционного нагрева.

С 2006 г. кафедра начинает прием бакалавров по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю подготовки: «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений». В дальнейшем направление успешно проходит аккредитацию, а в 2009 г. состоялся первый прием в магистратуру того же направления по программе «Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем» (МАЭ-09). Первыми магистрантами стали С. Ф. Шарипова, Ю. З. Хасанова, Л. Н. Шарипова, Э. М. Янышева, которые в 2011 г. успешно защитили магистерские диссертации.

В 2000-х гг. на кафедру пришли работать несколько профессоров из других вузов Уфы: М. А. Ураксеев, В. М. Сапельников, Л. П. Андрианова, позже Р. Р. Саттаров, Ф. А. Гизатуллин и В. Н. Ефанов (рисунок 5). Это повысило острепенность кафедры, способствовало повышению уровня магистерских и кандидатских диссертаций.

В 2010 г. кафедра ЭЭП совместно с Чебоксарским электроаппаратным заводом выиграла конкурс проектов, проводимый Министерством образования РФ. По результатам конкурса был заключен договор с Минобрнауки России на разработку высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов для тяжелых условий эксплуатации, в первую очередь для предприятий АК «Транснефть» (на общую сумму 284 млн руб.). После завершения договора результаты исследований легли в основу регламента АК «Транснефть» по выбору мест установки и определения оптимального числа частотно-регулируемых приводов маги-



Рисунок 5. Коллектив кафедры ЭЭП, 2007 г.

Figure 5. Staff of the Department, 2007

стральных насосов по трассе нефтепровода. По результатам выполнения проекта были подготовлены две кандидатские диссертации (В. Ю. Алексеев и О. В. Бондаренко) и две докторские диссертации (З. Х. Павлова и М. И. Хакимьянов). Результаты договора были одобрены в Минобрнауки России и докладывались в Москве на комиссии при Президенте РФ в декабре 2013 г.

С 2012 г. по 2024 г. кафедрой выполнялся ряд научно-исследовательских работ для НПО «Мир», АК «Транснефть», НИИ «Транснефть», ГК «Квантор», ООО «Нефтепромавтоматика».

Сотрудники кафедры регулярно получают гранты: стипендия Президента РФ для молодых ученых, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (доцент Р. Т. Хазиева), грантовая программа Фонда содействия инновациям «Старт» (доценты Р. Т. Хазиева, П. А. Хлюпин), грантовая программа Фонда содействия инновациям «Студенческий стартап» (ассистенты А. С. Боды-

лев, М. Д. Иванов, Б. А. Соловьев), грантовая программа Фонда содействия инновациям «УМНИК» (ассистенты П. И. Васильев, Р. Р. Афлятунов).

На сегодняшний день на кафедре активно развиваются и функционируют две научные школы. Первая, под началом профессора В. А. Шабанова, ведет активное исследование применения частотно-регулируемого привода в нефтегазовой отрасли и определения мест повреждения на линиях электропередачи. Результаты публикуются в ведущих научных журналах как в России, так и за рубежом. Развитие школы подтверждается защитой семи диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук А. Г. Капустиным, В. Ю. Алексеевым, О. В. Никулиным, О. В. Бондаренко, Э. Р. Байбуриным, Р. Р. Галиевым, В. В. Пашкиным. Готовится к защите кандидатская диссертация А. В. Сорокина, аспиранты Д. А. Кузьмич и А. Р. Фатхуллин занимаются исследованиями в области цифровых защит энергосистем.

Вторая научная школа, основанная доцентом С. Г. Конесевым, занимается исследованием и разработкой источников вторичного электропитания, систем индукционного нагрева, систем диагностирования электрооборудования. По результатам деятельности получено более трех десятков патентов на изобретения и полезные модели, ведется создание прототипов и промышленных образцов разрабатываемых систем. Защищены несколько диссертаций на соискание степени кандидата технических наук: П. А. Хлюпин (2015 г.), Р. Т. Хазиева (2019 г.), Э. Ю. Кондратьев (2018 г.). В настоящее время исследования продолжают аспиранты кафедры М. Д. Иванов, Б. А. Соловьев, Р. Р. Афлятунов, Т. Р. Хабибуллин, П. И. Васильев и другие.

С 2020 г. заведующим кафедрой является доктор технических наук М. И. Хакимьянов. Выпускник кафедры 1999 г. М. И. Хакимьянов после обучения в докторантуре УГАТУ в 2019 г. защитил докторскую диссертацию. Под его руководством подготовлена и защищена кандидатская диссертация И. Н. Шафиковым (2020 г.), в настоящее время готовят диссертации аспиранты: А. Н. Яшин, А. С. Бодылев, А. В. Зайниев, В. Ф. Шайдуллин. С 2020 г. М. И. Хакимьянов является главным редактором журнала «Электротехнические и информационные комплексы и системы». Под его руководством была организована подготовка по новым направлениям магистратуры: «Альтернативные и возобновляемые источники и накопители энергии» (МАЭ-03), «Электрооборудование и автоматизация процессов нефтепереработки и нефтегазохимии» (МАЭ-05), «Интеллектуальные средства и системы управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов» (МАЭ-09).

Начиная с 2023 г. кафедра активно сотрудничает с зарубежными вузами. На кафедру приезжают студенты из Ляонинского нефтехимического университета для обучения на английском языке, а преподаватели кафедры выезжают читать лекции в университеты Китая (Р. Р. Саттаров, М. И. Хакимьянов, А. Р. Калимгулов, П. А. Хлюпин) (рисунков 6).

На протяжении многих лет кафедра активно сотрудничает с предприятиями нефтегазового и энергетического комплексов. Студенты проходят практику на объектах АК «Транснефть», ПАО «Газпром», ПАО «Лукойл», ПАО «Роснефть», АНК «Башнефть», АО «БЭСК», НПЦ «УралЭнергоРесурс», ООО «СНЭМА-СЕРВИС», НИЦ «Энергодиагностика» и др.

Индустриальные партнеры кафедры участвуют в ремонте и оснащении лабораторий кафедры. Так, в 2020 г. компанией ООО «СНЭМА-СЕРВИС» был выполнен ремонт лаборатории релейной защиты (аудитория 1–104), в 2023 г. Холдинг ERSO отремонтировал и оснастил компьютерной техникой лабораторию общей электротехники (аудитория 1–241), а компания АО «БЭСК» — лабораторию электрических машин и электропривода (аудитория 1–144) (рисунки 7, 8).

Следует отметить, что на протяжении 25 лет, с 1987 г. до 2012 г., бессменным заместителем декана факультета автоматизации производственных процессов был доцент Валерий Иванович Бабакин, внесший вклад в развитие не только кафедры, но и факультета. Учебную работу кафедры до 2019 г. с огромной ответственностью и знанием дела вели заместители заведующего кафедрой по учебной работе доценты В. А. Кочинашвили, В. П. Лопатин, работавший в этой должности более 15 лет, и



Рисунок 6. Профессор Р. Р. Саттаров читает лекцию в Ляонинском нефтехимическом университете, 2023 г.

Figure 6. Professor R. R. Sattarov gives a lecture at Liaoning Petrochemical University, 2023



Рисунок 7. Исследование защитных характеристик микропроцессорных блоков в лаборатории релейной защиты

Figure 7. Study of the operation of microprocessor units in the relay protection laboratory



Рисунок 8. Лабораторный комплекс по возобновляемым источникам энергии

Figure 8. Laboratory complex for renewable energy sources

Л. А. Рябишина. Начиная с 2020 г. эту работу ведет доцент кафедры Регина Тагировна Хазиева.

С особой душевной теплотой хочется вспомнить добросовестный и выдающийся труд старейшего сотрудника кафедры и УГНТУ — учебного мастера Фёдора Игнатьевича Семёнова. Профессионализм сотрудников кафедры по достоинству оценен руководством университета. Деканом факультета, а позже директором ИТ-института с 2012 г. является профессор кафедры З. Х. Павлова,

заместителями директора назначены доцент кафедры А. Р. Калимгулов, ассистенты А. Н. Яшин и П. И. Васильев. По итогам 2012 г. кафедра была признана самой быстроразвивающейся кафедрой, а по итогам 2023 г. кафедра заняла второе место в рейтинге структурных подразделений УГНТУ. В настоящее время кафедра располагает квалифицированным преподавательским составом и имеет хорошую учебно-методическую и лабораторную базу. В юбилейном для кафедры 2024 г. профессорско-преподавательский и учебно-вспомогательный коллектив работает дружно и сплочённо в составе: профессора: З. Х. Павлова, М. И. Хакимьянов, В. А. Шабанов, Р. Р. Саттаров, Э. Р. Байбурын, Ф. А. Гизатуллин, В. Н. Ефанов; доценты: Р. Т. Хазиева, О. В. Бондаренко, П. А. Хлюпин, В. Ю. Алексеев, С. В. Чигвинцев, Б. М. Гайсин, А. Р. Калимгулов, Р. В. Кириллов, Р. Д. Каримов; доцент базовой кафедры А. В. Мухаметшин; старшие преподаватели: И. А. Макулов, Е. С. Резник, А. В. Сорокин, Т. Р. Хабибуллин, Р. Р. Шарипов, Р. З. Юсупов, А. Н. Яшин, П. И. Васильев; ассистенты: Р. Р. Афлятунов, А. С. Бодылев, И. И. Хайдаров, Г. Е. Димукашева, М. Д. Иванов, И. Д. Каекбирдина, А. В. Махиянов, Б. А. Соловьев; заведующий лабораториями В. В. Александров; инженеры: О. В. Файрушина, А. Ю. Шумихин, учебный мастер Ф. Ф. Сираев, техники: Б. И. Загидуллин, Д. А. Коломеец (рисунок 9).

Свое будущее кафедра ЭЭП связывает с молодежью, которая после окончания магистратуры ведет учебную нагрузку и активно занимается наукой в аспирантуре. Будучи еще студентами старших курсов, они начинают работать на кафедре, выигрывают гранты для финансирования своих исследований, которые впоследствии становятся их диссертациями.



Рисунок 4. Коллектив кафедры ЭЭП, 2023 г.

Figure 4. The staff of the Department, 2023

Список источников

1. Кочинашвили В.А., Шабанов В.А. Кафедре электротехники (ЭЭП) — 50 лет (1954-2004 — годы становления и развития) // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: межвузовск. сб., посвященный 50-летию кафедры ЭЭП УГНТУ / Ред. колл.: В.А. Шабанов (отв. редактор), С.Г. Конесев (зам. отв. редактора), В.И. Бабакин, К.М. Фаттахов, С.В. Чигвинцев, А.П. Капустина. 2005. С. 5-15. EDN: VBAMVT.

2. Шабанов В.А. Научная жизнь кафедры электротехники в 1954-2004 гг. // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: межвузовск. сб., посвященный 50-летию кафедры ЭЭП УГНТУ / Ред. колл.: В.А. Шабанов (отв. редактор), С.Г. Конесев (зам. отв. редактора), В.И. Бабакин, К.М. Фаттахов, С.В. Чигвинцев, А.П. Капустина. 2005. С. 15-18. EDN: VBAMWN.

3. Дрейман В.А. «Кафедральный» этап жизненного пути // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: межвузовск. сб., посвященный 50-летию кафедры ЭЭП УГНТУ / Ред. колл.: В.А. Шабанов (отв. редактор), С.Г. Конесев (зам. отв. редактора), В.И. Бабакин, К.М. Фаттахов, С.В. Чигвинцев, А.П. Капустина. 2005. С. 19-20. EDN: VBAMWX.

4. Шабанов В.А., Башаров Р.А. Выпускники кафедры электротехники 1994-2004 годов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: межвузовск. сб., посвященный 50-летию кафедры ЭЭП УГНТУ /

Ред. колл.: В.А. Шабанов (отв. редактор), С.Г. Конесев (зам. отв. редактора), В.И. Бабакин, К.М. Фаттахов, С.В. Чигвинцев, А.П. Капустина. 2005. С. 235-244. EDN: VBANGD.

5. Шабанов В.А. Кафедре электротехники и электрооборудования предприятий 60 лет // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: Межвузовск. сб. науч. тр. / редкол.: В.А. Шабанов и др. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. С. 6-8.

References

1. Kochinashvili V.A., Shabanov V.A. Kafedre elektrotekhniki (EEP) — 50 let (1954-2004 — gody stanovleniya i razvitiya) [Electrical Engineering Department (EED) — 50 Years (1954-2004 — Years of Formation and Development)]. *Mezhvuzovskiy sbornik «Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii», posvyashchennyi 50-letiyu kafedry EEP UGNTU* [Interuniversity Collection «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of Enterprises» Dedicated to the 50th Anniversary of the EED Department of USPTU]. 2005, pp. 5-15. EDN: VBAMVT [in Russian].

2. Shabanov V.A. Nauchnaya zhizn' kafedry elektrotekhniki v 1954–2004 gg. [Scientific Life of Electrical Engineering Department in 1954–2004]. *Mezhvuzovskiy sbornik «Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii», posvyashchennyi 50-letiyu kafedry EEP UGNTU* [Interuniversity Collection «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of

Enterprises» Dedicated to the 50th Anniversary of the EED Department of USPTU]. 2005, pp. 15-18. EDN: VBAMWN. [in Russian].

3. Dreiman V.A. «Kafedral'nyi» etap zhiznennogo puti [«Departmental» Stage of Life]. *Mezhvuzovskiy sbornik «Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii», posvyashchenniy 50-letiyu kafedry EEP UGNTU* [Interuniversity Collection «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of Enterprises» Dedicated to the 50th Anniversary of the EED Department of USPTU]. 2005, pp. 19-20. EDN: VBAMWX [in Russian].

4. Shabanov V.A., Basharov R.A. Vypuskniki kafedry elektrotekhniki 1994–2004 godov [Graduates of Electrical Engineering Department 1994–2004]. *Mezhvuzovskiy sbornik «Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie*

predpriyatii», posvyashchenniy 50-letiyu kafedry EEP UGNTU [Interuniversity Collection «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of Enterprises» Dedicated to the 50th Anniversary of the EED Department of USPTU]. 2005, pp. 235-244. EDN: VBANGD [in Russian].

5. Shabanov V.A. Kafedre elektrotekhniki i elektrooborudovaniya predpriyatii 60 let [Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department is 60]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2014, pp. 6-8. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 10.10.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 31.10.2024.

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 24.10.2024; accepted for publication 31.10.2024.

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-21-30

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДЕРЖКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Николай Николаевич Портнягин****Nikolay N. Portnyagin**

доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

**Максим Михайлович Головин****Maksim M. Golovin**

аспирант кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Актуальность

Динамическая задержка в цепях автоматики регулируемого электропривода играет существенную роль. Однако в моделях библиотеки расширения пакета MATLAB учитывается только динамическая задержка электрической цепи намагничивания магнитопровода. Процессы намагничивания и перемагничивания среды магнитопровода приводят к дополнительным видам задержки возникновения электромагнитного момента.

Цель исследования

В пакете MATLAB предлагается осуществить стандартным блоком библиотеки Simulink последовательным включением цепь управления якоря двигателя постоянного тока блока задержки при заторможенном роторе.

Методы исследования

Рассмотрена модель контура регулирования тока двигателя постоянного тока, показан интерфейс функции автоматической настройки пропорционально-интегрального регулятора, показаны графики переходных процессов.

Результаты

Показано, что при задержке образования вектора магнитного поля существенно меняются параметры сервиса настройки пропорционально-интегрального регулятора, которые необходимы для оптимизации процесса регулирования.

Ключевые слова

пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, оптимизация, электромагнитный момент, настройка контура автоматики электропривода, компьютерное моделирование регулируемого электропривода, магнитные цепи, переходные процессы, динамическая задержка, двигатель постоянного тока, MATLAB/Simulink

Для цитирования: Портнягин Н. Н., Головин М. М. Учет влияния динамической задержки намагничивания электротехнической стали в системах управления электроприводом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 21-30. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-21-30>.

Original article

ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF DYNAMIC MAGNETIZATION DELAY OF ELECTRICAL STEEL IN ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS

Relevance

The dynamic delay in the automation circuits of an adjustable electric drive plays an essential role. However, in the models of the MATLAB package extension library, only the dynamic delay of the electric magnetization circuit of the magnetic circuit is taken into account. The processes of magnetization and remagnetization of the magnetic circuit medium lead to additional types of delay in the occurrence of an electromagnetic moment.

Aim of research

In the MATLAB package, it is proposed to implement the standard block of the Simulink library by sequentially switching on the control circuit of the armature of the DC motor of the delay unit with the rotor braked.

Research methods

The model of the DC motor current control circuit is considered, the interface of the automatic adjustment function of the proportional integral regulator is shown, and graphs of transients are shown.

Results

It is shown that when the formation of a magnetic field vector is delayed, the parameters of the proportional-integral regulator adjustment service change significantly, which are necessary to optimize the control process.

Keywords

proportional integral (PI) regulator, optimization, electromagnetic torque, adjustment of the circuit of electric drive automation, computer simulation of an adjustable electric drive, magnetic circuits, transient processes, dynamic delay, DC motor, MATLAB/Simulink

For citation: Portnyagin N. N., Golovin M. M. Uchet vliyaniya dinamicheskoy zaderzhki namagnichivaniya elektrotekhnicheskoy stali v sistemakh upravleniya elektroprivodom [Accounting for the Influence of the Dynamic Magnetization Delay of Electrical Steel in Electric Drive Control Systems]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 21-30 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-21-30>.

Введение

Система автоматического управления электроприводом обеспечивает автоматическое поддержание заданной скорости. На вход регулятора тока подаются сигнал задания тока от регулятора скорости и сигнал обратной связи по току от датчика тока (ДТ). Регулятор тока принимается, как правило, пропорционально-интегрального типа (ПИ-регулятор), что необходимо для обеспечения лучших статических и динамических характеристик электропривода. На

выходе регулятора тока формируется сигнал управления силовым тиристорным преобразователем (ТП) якорной цепи. В системах с двигателями постоянного тока используется двухзонное регулирование скорости. В рамках данной работы для исследования влияния временной задержки сигнала управления рассмотрим первый контур с ПИ-регулятором тока и оценим влияние задержки на систему управления электроприводом [1].

В реальных системах управления электроприводом часто возникает задержка, связанная с намагничиванием магнитопровода электродвигателя. Эта задержка оказывает значительное влияние на динамику системы, особенно в режимах быстрого изменения управляющих сигналов. Для двигателей постоянного тока, как и для асинхронных двигателей, это может выражаться в виде временной инерции в отклике на изменения управляющих сигналов, что ухудшает точность и устойчивость работы системы.

Неучет динамической задержки намагничивания может привести к искажениям в регулировании скорости и тока, а также к нежелательным колебаниям и перегрузкам в электроприводе. Важно учитывать этот эффект при проектировании систем управления для двигателей, работающих в режиме с быстрыми изменениями нагрузки, частоты вращения, или в системах, где необходимо точное позиционирование положения электропривода.

Схема в программном комплексе MATLAB/Simulink изображена на рисунке 1.

Настройка параметров замкнутого контура тока

Параметры ПИ-регулятора вычисляются с помощью встроенной функции «PID Tuner App» [2]. Интерфейс функции Tune настройки ПИ-регулятора представлен на рисунке 2. Программой предлагаются следующие значения параметров регулятора: пропорциональная составляющая — 1,65; интегральная — 53,58.

Для оценки влияния времени на качество регулирования и переходных процессов добавим блок задержки «Variable Transport Delay» на вход управляемого источника напряжения [3]. Величину задержки установим в размере 1,5 мс. Данное значение задержки можно определить как задержку собственной индуктивности якоря, которая для данного двигателя находится в пределе 2 мГн. Также данное время, исходя из графика на рисунке 2, сопоставимо со временем пуска двигателя и его выходом на номинальный установившийся режим. Получим модель, изображенную на рисунке 3.

На рисунке 4 представлены графики тока при пуске двигателя без задержки

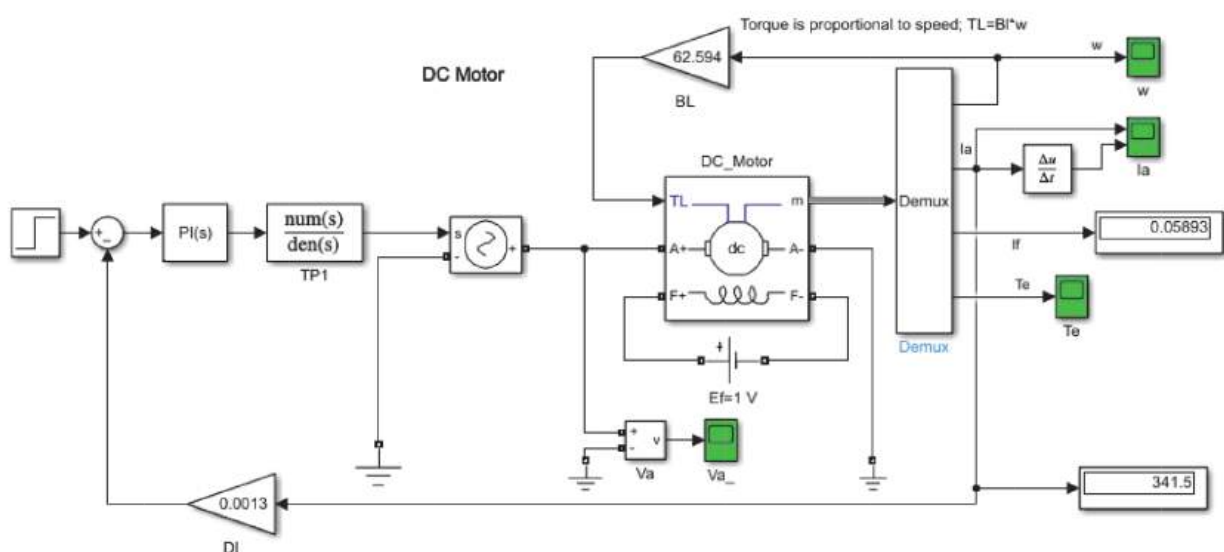


Рисунок 1. Модель замкнутого контура тока с ПИ-регулятором

Figure 1. Model of a closed current loop with a PI controller

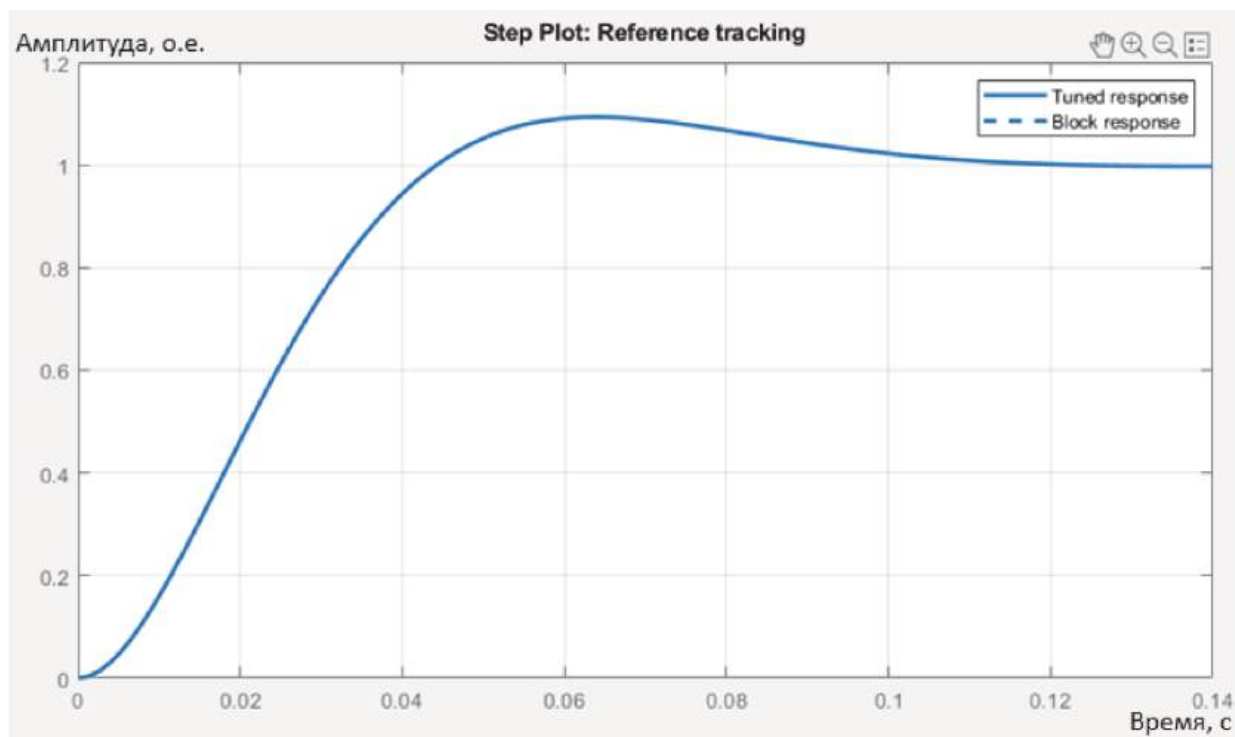


Рисунок 2. График переходного процесса по току при настройке ПИ-регулятора

Figure 2. Graph of the current transient process when setting the PI controller

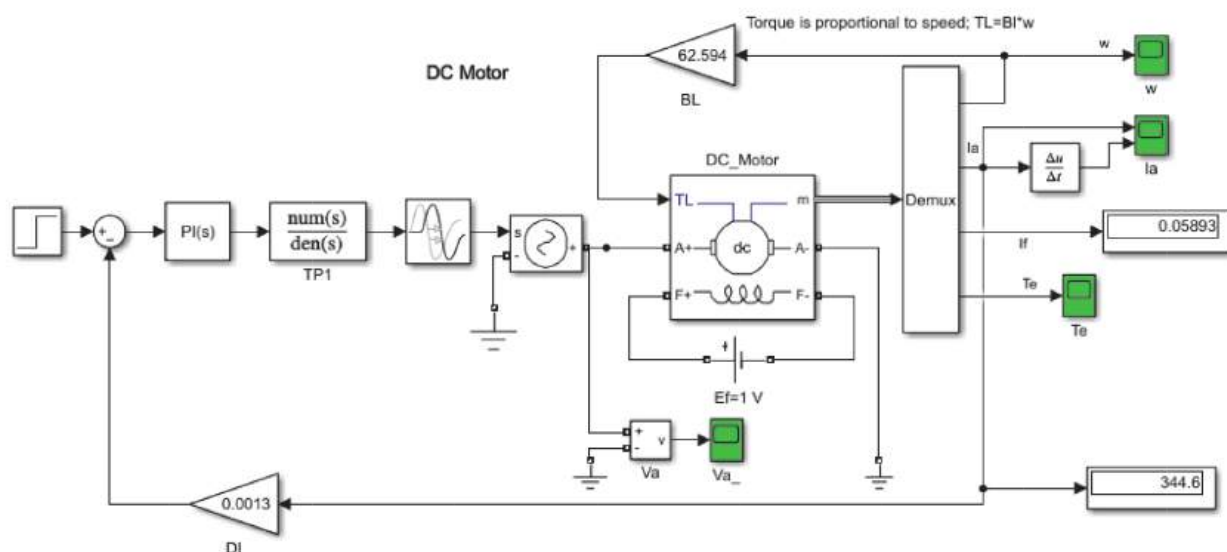


Рисунок 3. Модель замкнутого контура с ПИ-регулятором и задержкой

Figure 3. Closed loop model with PI controller and delay

(сплошная линия) и с задержкой (пунктирная линия) при одинаковых параметрах ПИ-регулятора. Для графика тока без задержки перерегулирование составило 9,4 %, время регулирования 0,1 с. Задержка внесла значительное изменение в график тока. Перерегулирование

составило 61 %, время регулирования составило 0,7 с. Таким образом, мы видим, что задержка значительно влияет на переходный процесс и качество регулирования. В начальном варианте собственная задержка цепи якоря никак не регламентировалась ввиду ее кажущейся

малости. Однако, как показал опыт, даже такая незначительная задержка кардинально влияет на процесс регулирования. Такой феномен связан с тем, что ток, протекающий через катушку, при коммутации подвергается экспоненциальному закону и не меняется мгновенно. Именно данный эффект необхо-

димо учитывать при проектировании систем управления. Оптимизируем параметры ПИ-регулятора при наличии задержки в системе управления.

На рисунке 5 представлен интерфейс настройки параметров ПИ-регулятора. Пунктиром обозначен текущий отклик системы при отсутствии коррекции пара-

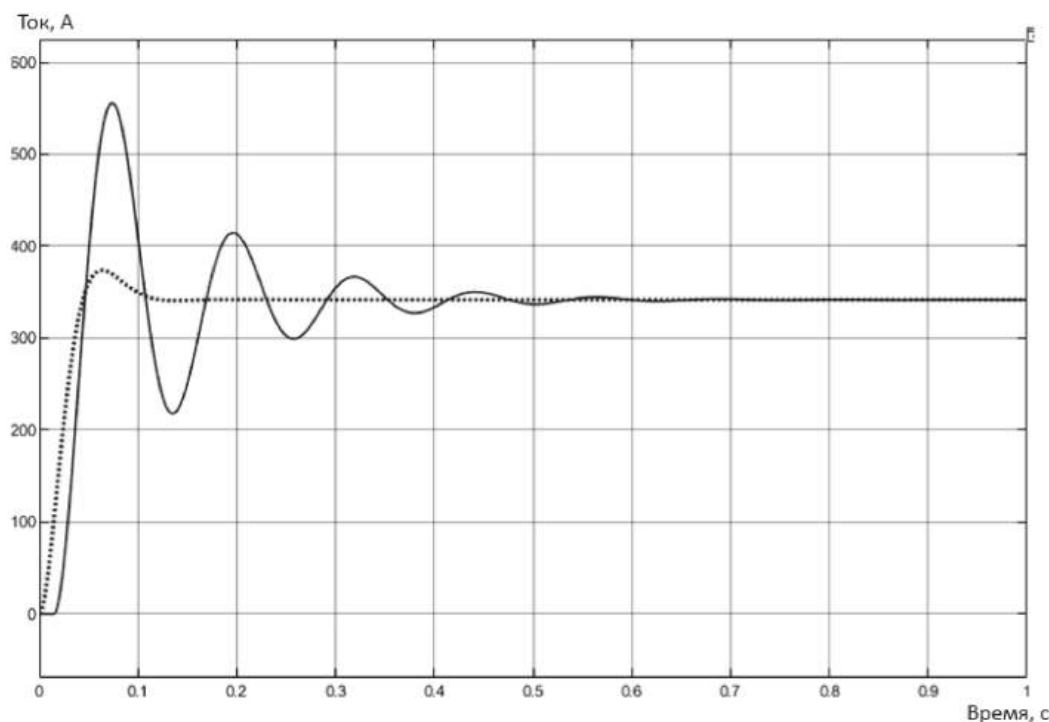


Рисунок 4. Графики тока с задержкой (пунктирная линия) и без задержки (сплошная)

Figure 4. Current graphs with delay (dotted line) and without delay (solid)

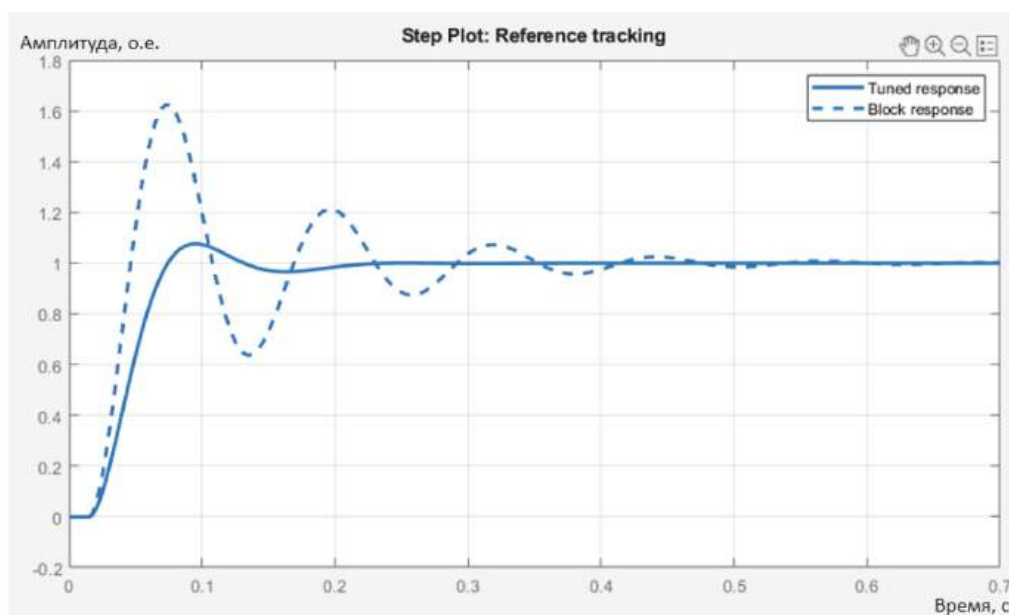


Рисунок 5. График переходного процесса по току при настройке ПИ-регулятора

Figure 5. Graph of the current transient process when setting the PI controller

метров регулятора; сплошной линией — желаемый оптимизируемый отклик системы.

После оптимизации параметров ПИ-регулятора его значения составили: пропорциональная составляющая — 1,05; интегральная — 22,9. График тока после оптимизации параметров представлен на рисунке 6.

Анализируя графики, видим, что оптимизация сохранила качество переходных процессов на прежнем уровне. Таким образом, можно сделать вывод, что даже незначительная задержка при управлении электроприводом может значительно сказаться на системе управления и работе электропривода. Необходимо ее учитывать и правильно настраивать параметры системы управления для бесперебойного технологического процесса.

Изучение влияния задержки на переходные процессы

Для полноты картины проведем моделирование работы двигателя с различными по величине задержками и прове-

дем анализ получившихся результатов с построением зависимостей. Возьмем за основу параметры ПИ-регулятора для модели с отсутствующей задержкой и получим графики переходного процесса для режима с введенной задержкой от 8 мс до 20 мс с шагом 3 мс.

На рисунке 7 изображены графики переходных процессов без оптимизации настроек ПИ-регулятора. Чем больше введенная задержка, тем большие возникают перерегулирование, колебательность и время регулирования [4]. Таким образом, видим влияние даже такой незначительной задержки на процесс регулирования, что важно учитывать при построении систем управления. Оптимизируем параметры регулятора тока и проведем анализ получившихся графиков.

Переходный процесс при различных задержках после оптимизации параметров приведен на рисунке 8.

После оптимизации параметров графики всех переходных процессов укладываются в 10 %-ное перерегулирование, а время регулирования не превы-

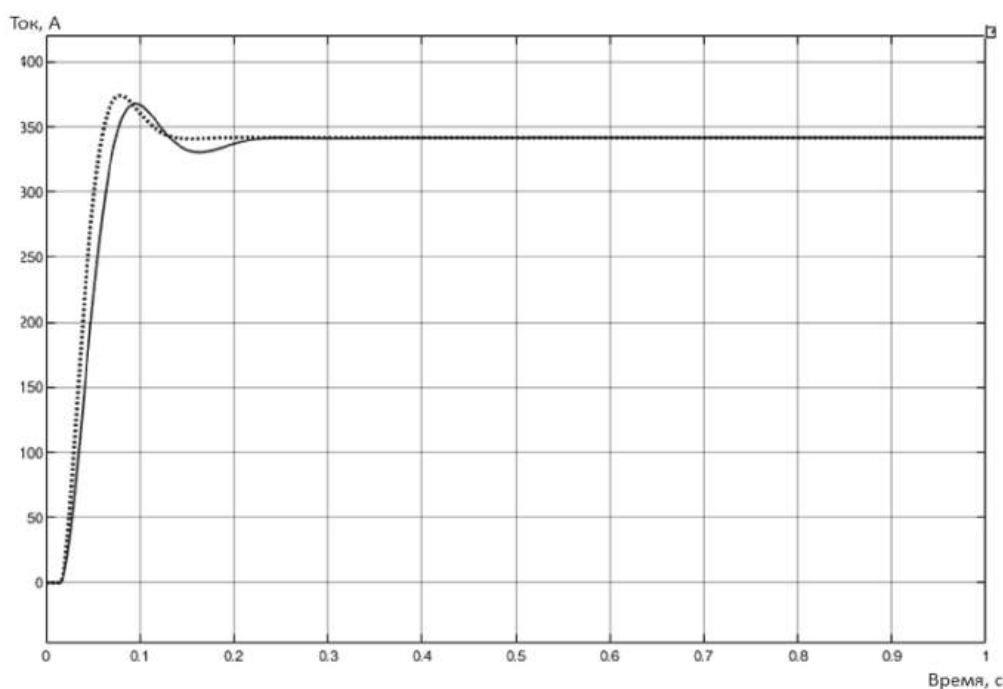


Рисунок 6. Графики тока после настройки ПИ-регулятора

Figure 6. Current graphs after setting up the PI controller

шает 0,3 с. На рисунках 9 и 10 изображены зависимости перерегулирования от времени задержки и времени регулирования от времени задержки. На данных графиках можем наблюдать ухудшение процессов регулирования с ростом времени задержки при отсутствии оптимизации параметров.

Все опыты проводились для двигателя постоянного тока с заторможенным ротором, ведь когда ротор заторможен, ток в якорных обмотках продолжает течь. Поскольку ротор неподвижен, изменение поля при вращении отсутствует, и результирующее магнитное поле остаётся практически неизменным [5].

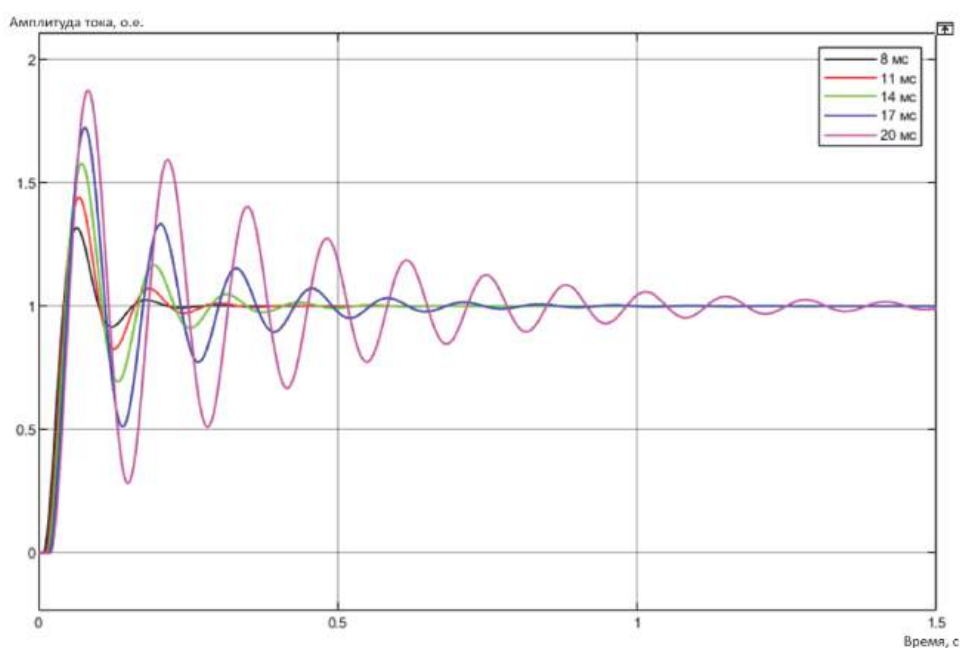


Рисунок 7. Переходный процесс при различных задержках

Figure 7. The transition process at various delays

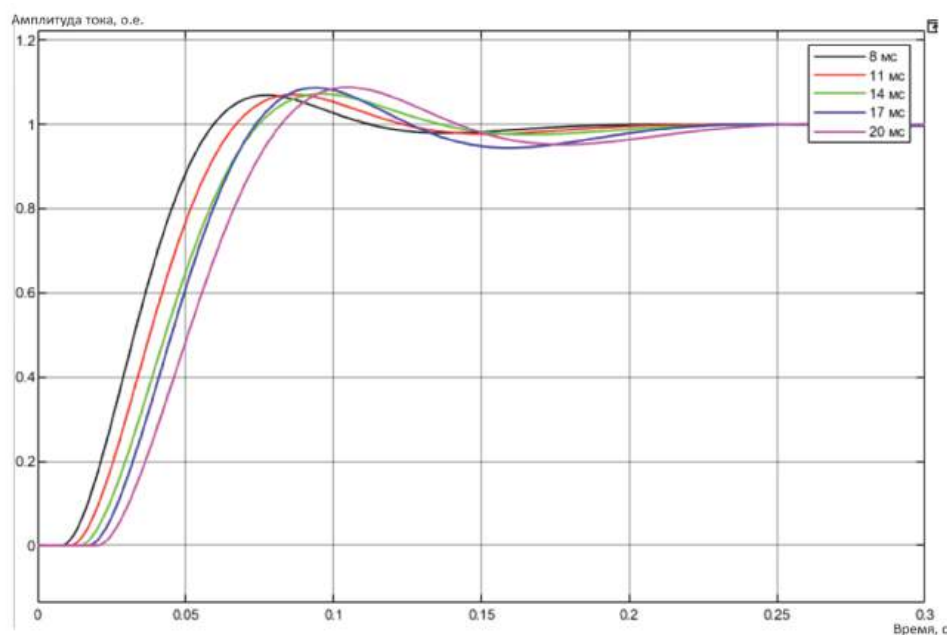


Рисунок 8. Переходный процесс при различных задержках после оптимизации параметров

Figure 8. Transient process at various delays after parameter optimization

Задержка или изменение магнитного поля в этом случае могут быть связаны с индуктивностью обмоток якоря. Когда напряжение подаётся, ток в обмотках не сразу достигает своего значения из-за индуктивности, которая препятствует быстрому изменению тока. Этот процесс может вызвать временную задержку формирования полного магнитного поля, хотя поле в двигателе постоянного тока стабилизируется относительно быстро.

Магнитное поле, создаваемое в якоре двигателя постоянного тока, является переменным относительно основного магнитного поля статора. В процессе вращения ротора ток в обмотках якоря постоянно меняет направление по мере того, как различные части якоря прохо-

дят через магнитные полюса. Коммутатор и щётки обеспечивают смену направления тока в обмотках якоря так, чтобы в каждый момент времени создавалась сила, направленная в нужную сторону для продолжения вращения.

Магнитное поле якоря перемещается относительно основного поля статора, создаваемого обмотками возбуждения. Таким образом, с точки зрения неподвижной системы координат магнитное поле якоря постоянно меняется.

Относительно самого якоря (то есть в его вращающейся системе координат) магнитное поле остаётся относительно постоянным. Это связано с тем, что коммутатор переключает направление тока в обмотках таким образом, чтобы резуль-

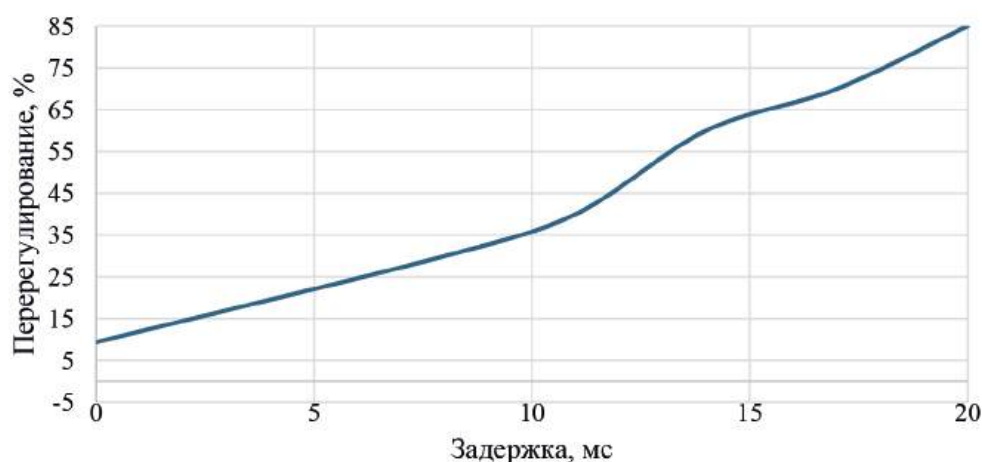


Рисунок 9. График зависимости перерегулирования

Figure 9. Overshoot dependence graph

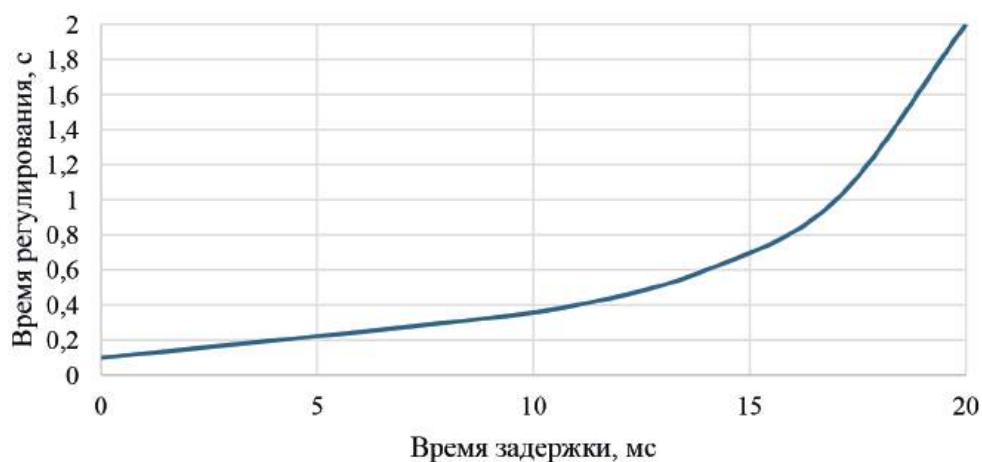


Рисунок 10. График зависимости времени регулирования

Figure 10. Graph of the dependence of the regulation time

тирующее магнитное поле якоря всегда было направлено в одну и ту же сторону относительно его конструкции. Но с точки зрения наблюдателя в неподвижной системе координат оно меняется по направлению.

Магнитное поле якоря переменное относительно статора, хотя коммутатор и делает его постоянным в некоторой степени относительно самого якоря.

Если провести аналогию стали, используемой в машинах постоянного и переменного тока, то есть как схожие, так и отличительные характеристики.

В обоих типах машин сталь служит магнитным материалом для формирования магнитных цепей. В машинах постоянного тока она используется для создания постоянного магнитного поля, тогда как в переменных машинах, таких как синхронные и асинхронные, сталь формирует изменяющиеся магнитные поля.

Магнитные свойства стали важны для обеих систем, но в переменном токе часто применяются ламинированные стали для снижения вихревых токов и потерь энергии. Механические требования также различаются: в машинах постоянного тока акцент делается на прочность, а в переменных — на легкость и динамические характеристики [6].

Выбор марки стали варьируется: для постоянного тока важны высокие магнитные свойства, а для переменного — низкие магнитные потери и хорошие изоляционные качества. Таким образом, хотя функции стали схожи, ее применение и свойства различаются в зависимости от типа машины [7].

Вышесказанное является подтверждением того, что важно начинать исследования временных задержек в цепях управления именно с двигателя постоянного тока. Он обладает меньшей инерционностью, у него отсутствует вращающееся поле, он подвержен легкому регулированию, более прост в математиче-

ском описании и подчиненном регулировании, имеет схожую по характеристикам сталь и ее предназначение.

В асинхронном двигателе с фазным ротором магнитное поле создается статором, который работает на переменном токе, и это поле вращается в пространстве с синхронной скоростью. Когда ротор заторможен, его скорость вращения равна нулю, что приводит к тому, что относительная скорость вращающегося магнитного поля статора и ротора максимальна. Это вызывает индукцию максимального ЭДС в обмотках ротора, которая, в свою очередь, создает ток в обмотках ротора [8].

В этом случае возникает задержка в формировании полного магнитного поля ротора из-за индуктивности ротора. Однако в отличие от двигателя постоянного тока здесь магнитное поле ротора не стационарно, так как оно индуцируется вращающимся полем статора и создается переменным током. Индукция токов в обмотках ротора вызывает замедленное нарастание магнитного поля из-за индуктивного сопротивления ротора, что создает аналогичную задержку в формировании результирующего магнитного поля.

Вывод

Если рассматривать взаимоотношение статора и ротора, как вращающейся и неподвижной части двигателя, то машина постоянного тока и асинхронный двигатель довольно-таки схожи по принципу взаимодействия полей. Ввиду отсутствия вращающегося поля у двигателя постоянного тока есть смысл начать изучение проблемы задержки в магнитных цепях с двигателя постоянного тока. В данной работе было выявлено значительное влияние задержки на процессы регулирования, что должно быть принято во внимание при построении систем управления электроприводом.

Список источников

1. Сидоров С.Н., Лунина Н.А. Теория автоматического управления в задачах электропривода. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 122 с. ISBN 978-5-9795-1193-1.
2. PID Tuner. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html> (дата обращения 20.10.2024).
3. Exponenta. Variable Transport Delay. URL: <https://docs.exponenta.ru/simulink/slref/variabletransportdelay.html> (дата обращения: 23.10.2024).
4. Качество работы систем автоматического управления. URL: <https://www.informio.ru/publications/id914/Kachestvo-raboty-sistem-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения: 23.10.2024).
5. Fundamentals of DC Motors. URL: https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/electric-motors/dc-motors/fundamentals?srsId=AfmBOookzzBj5fV7PDReu-yOfW-QBYvrI3vsJWpl9yQW_sHVjwzt92WW (дата обращения: 15.10.2024).
6. Свойства электротехнической стали. URL: <https://servomotors.ru/documentation/electromotor/book220/book220p15.html> (дата обращения: 25.10.2024).
7. Yun K. Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets with Motor Control Excitation // Journal of Electronic Materials. 2020. doi:10.1007/s11664-018-6804-6.
8. Сафронова Ю.Ф., Павлейно М.А. Асинхронный двигатель. Учебно-методическое пособие. Лабораторная работа по курсу «Лабораторный практикум по электрофизическим процессам и электротехническим устройствам». СПб., 2022. С. 4-16.

References

1. Sidorov S.N., Lunina N.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v zadachakh elektroprivoda* [Theory of Automatic Control in Electric Drive Problems]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2013. 122 p. ISBN 978-5-9795-1193-1. [in Russian].
2. *PID Tuner*. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html> (accessed 20.10.2024).
3. *Exponenta. Variable Transport Delay*. URL: <https://docs.exponenta.ru/simulink/slref/variabletransportdelay.html> (accessed 23.10.2024).
4. *Kachestvo raboty sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Quality of Operation of Automatic Control Systems]. URL: <https://www.informio.ru/publications/id914/Kachestvo-raboty-sistem-avtomaticheskogo-upravleniya> (accessed 23.10.2024). [in Russian].
5. *Fundamentals of DC Motors*. URL: https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/electric-motors/dc-motors/fundamentals?srsId=AfmBOookzzBj5fV7PDReu-yOfW-QBYvrI3vsJWpl9yQW_sHVjwzt92WW (accessed 15.10.2024).
6. *Svoistva elektrotekhnicheskoi stali* [Properties of Electrical Steel]. URL: <https://servomotors.ru/documentation/electromotor/book220/book220p15.html> (accessed 25.10.2024). [in Russian].
7. Yun K. Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets with Motor Control Excitation. *Journal of Electronic Materials*, 2020. doi: 10.1007/s11664-018-6804-6.
8. Safronova Yu.F., Pavleino M.A. *Asinkhronnyi dvigatel'. Uchebno-metodicheskoe posobie. Laboratornaya rabota po kursu «Laboratornyi praktikum po elektrofizicheskim protsessam i elektrotekhnicheskim ustroystvam»* [Asynchronous Motor. Study Guide. Laboratory Work on the Course «Laboratory Practical Training on Electro-physical Processes and Electrical Devices»]. Saint-Petersburg, 2022, pp. 4-16. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 20.11.2024; одобрена после рецензирования 27.11.2024; принята к публикации 06.12.2024.

The article was submitted 20.11.2024; approved after reviewing 27.11.2024; accepted for publication 06.12.2024.

Научная статья

УДК 621.31

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-31-49

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Антон Сергеевич Горбунов****Anton S. Gorbunov**

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроснабжение и автоматизация технологических
процессов», Башкирский государственный аграрный университет,
Уфа, Россия

**Руслан Динарович Каримов****Ruslan D. Karimov**

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Любовь Эммануиловна Рогинская****Lyubov E. Roginskaya**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электромеханика»,
Уфимский университет науки и технологий,
Уфа, Россия

**Аяз Азатович Бакиров****Ayaz A. Bakirov**

аспирант кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика»,
Уфимский университет науки и технологий,
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

Ветроэнергетика, как один из ведущих источников возобновляемой энергии, требует разработки эффективных и надёжных электрогенераторов для повышения производительности ветроэнергетических установок (ВЭУ). Современные экологические и экономические

Ключевые слова

ветроэнергетика,
электрогенератор,
генератор, постоянные
магниты, магнитная

требования стимулируют переход на генераторы с постоянными магнитами, которые отличаются высокой эффективностью и меньшими эксплуатационными затратами. Однако вопросы оптимизации конструктивных параметров, такие как количество полюсов, частота вращения и геометрия магнитной системы, остаются ключевыми в проектировании высокоэффективных генераторов для ВЭУ.

Цель исследования

Основной целью работы является разработка и исследование электрогенераторов мощностью 2 кВт для ВЭУ с акцентом на оптимизацию их конструктивных параметров. Задача состоит в повышении эффективности работы генераторов; снижении пульсаций момента, вибраций и улучшении теплового состояния машин.

Объекты исследования

Объектами исследования являются синхронные генераторы с постоянными магнитами мощностью 2 кВт, предназначенные для использования в ВЭУ. Рассматриваются различные варианты конструкций генераторов с изменением числа полюсов, скосом пазов, изменением типа магнитной системы и частоты вращения.

Методы исследования

В процессе исследования использовались методы компьютерного моделирования с применением программного комплекса Ansys для электромагнитного и теплового анализа. Были проведены расчёты потерь, КПД, теплового состояния активных элементов генераторов при разных частотах вращения ротора.

Результаты

В ходе исследования рассмотрено несколько вариантов электрогенераторов мощностью 2 кВт при частотах вращения 300 и 600 об/мин с различными конструктивными особенностями, такими как количество полюсов, форма магнитов, скос пазов статора и другие параметры.

Основные результаты включают в себя:

- *оптимизацию количества полюсов* — увеличение числа полюсов с 12 до 18 позволяет существенно снизить пульсации момента на валу, что улучшает стабильность работы генератора и уменьшает его вибрации. Это также привело к уменьшению необходимой толщины магнитопровода, что позволило снизить активную массу генератора без ухудшения его рабочих характеристик;

- *магнитные системы генераторов* — варианты с полукруглыми радиально намагниченными магнитами и диаметрально намагниченными магнитами показали близкие результаты с точки зрения эффективности генератора, однако такие конструкции более сложны в производстве. При моделировании на частоте вращения 600 об/мин наблюдалось значительное снижение массы генератора при сохранении или даже улучшении его рабочих характеристик. Масса генератора уменьшилась более чем в 2 раза, что снижает нагрузки на конструктивные элементы ВЭУ. Также было выявлено улучшение теплового состояния машины за счёт уменьшения активной длины и более эффективного охлаждения открытой конструкции ротора.

система, электрические машины, ветрогенератор, частота вращения, пульсации момента, проектирование электрических машин

Для цитирования: Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Рогинская Л. Э., Бакиров А. А., Хакимьянов М. И. Оптимизация параметров электрогенераторов малой мощности для ветроэнергетических установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 31-49. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-31-49>.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF LOW-POWER ELECTRIC GENERATORS FOR WIND POWER PLANTS

Relevance

Wind power, as one of the leading sources of renewable energy, requires the development of efficient and reliable electric generators to increase the productivity of wind power plants. Modern environmental and economic requirements stimulate the transition to generators with permanent magnets, which are characterized by high efficiency and lower operating costs. However, the issues of optimization of design parameters, such as the number of poles, rotation speed and geometry of the magnetic system, remain key in the design of highly efficient generators for wind power plants.

Aim of research

The main aim of the work is the development and study of 2 kW electric generators for wind power plants with an emphasis on the optimization of their design parameters. The task is to increase the efficiency of generators, reduce torque ripples, vibrations and improve the thermal state of the machines.

Objects of study

The objects of study are synchronous generators with permanent magnets with a capacity of 2 kW, intended for use in wind power plants. Various options for generator designs with a change in the number of poles, slot bevel, change in the type of magnetic system and rotation speed are considered.

Research methods

The study involved computer simulation methods using the Ansys software package for electromagnetic and thermal analysis. Calculations were made of losses, efficiency, and thermal state of the active elements of the generators at different rotor speeds.

Results

The study considered several variants of 2 kW electric generators at 300 and 600 rpm with different design features, such as the number of poles, magnet shape, stator slot bevel, and other parameters. The main results include:

- *optimization of the number of poles*: increasing the number of poles from 12 to 18 made it possible to significantly reduce torque ripples on the shaft, which improves the stability of the generator and reduces its vibrations. This also led to a decrease in the required thickness of the magnetic circuit, which made it possible to reduce the active mass of the generator without deteriorating its performance;

- *magnetic systems of generators*: variants with semicircular radially magnetized magnets and diametrically magnetized magnets showed similar results in terms of generator efficiency, but such designs are more complex to manufacture. When modeling at a rotation speed of 600 rpm, a significant decrease in the generator mass was observed while maintaining or even improving its performance characteristics. The generator mass was reduced more than twofold, which reduces the loads on the structural elements of the wind turbine. An improvement in the thermal state of the machine was also revealed due to a decrease in the active length and more efficient cooling of the open rotor structure.

Keywords

wind power, electric generator, generator, permanent magnets, magnetic system, electric machines, wind generator, rotation frequency, torque ripples, design of electric machines

For citation: Gorbunov A. S., Karimov R. D., Roginskaya L. E., Bakirov A. A., Khakimyanov M. I. Optimizatsiya parametrov elektrogeneratorov maloy moshchnosti dlya vetroenergeticheskikh ustanovok [Optimization of Parameters of Low-Power Electric Generators for Wind Power Plants]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 31–49 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-31-49>.

Введение

В настоящее время ветроэнергетические установки (ВЭУ) за счет использования возобновляемых энергетических ресурсов (ВЭР) относятся к экологически чистым источникам энергии ввиду отсутствия вредных выбросов при получении электрической энергии. Ведущими мировыми фирмами в области ВЭУ (Siemens (Германия), General Electric (США), Vestas (Дания), Nordex (Германия)) производятся установки мощностью от 1 кВт до 10 МВт. Ужесточение экологических, технических и экономических требований в отношении эксплуатируемых и проектируемых энергетических установок; требования по декарбонизации промышленности, сокращению энергоемкости валового внутреннего продукта, затрат топливных энергетических ресурсов, уменьшению уровня эмиссии по CO_2 , NO_x , снижению уровня шума и т.д. обуславливают актуальность разработки и применения энергоустановок, использующих возобновляемые источники энергии. Расширение применения ВЭУ также позволит повысить энергобезопасность стран, независимость от стран-экспортеров первич-

ных топливно-энергетических ресурсов, снизить стоимость электроэнергии для потребителей. В связи с этим в энергетических системах различных стран все большее внимание уделяется использованию возобновляемых источников энергии. Ветроэнергетика как направление использования ВЭР играет все большую роль в глобальной энергетической стратегии, особенно в странах с благоприятными ветровыми условиями как на суше, так и в зоне морей (оффшорные ВЭУ).

Структурная схема одного из вариантов ВЭУ показана на рисунке 1 [1] (в дальнейшем будем рассматривать ВЭУ с горизонтальной осью вращения). Регулирование механической мощности, отбираемой лопастями турбины от ветра, осуществляется изменением ориентации лопастей (угла лопастей) относительно потока ветра [2]. Одним из основных элементов ВЭУ является ветрогенератор, преобразующий механическую энергию от ветровой турбины в электрическую. От правильного выбора типа и параметров такого генератора зависят эффективность и долговечность работы всей ВЭУ. В связи с этим в настоящее

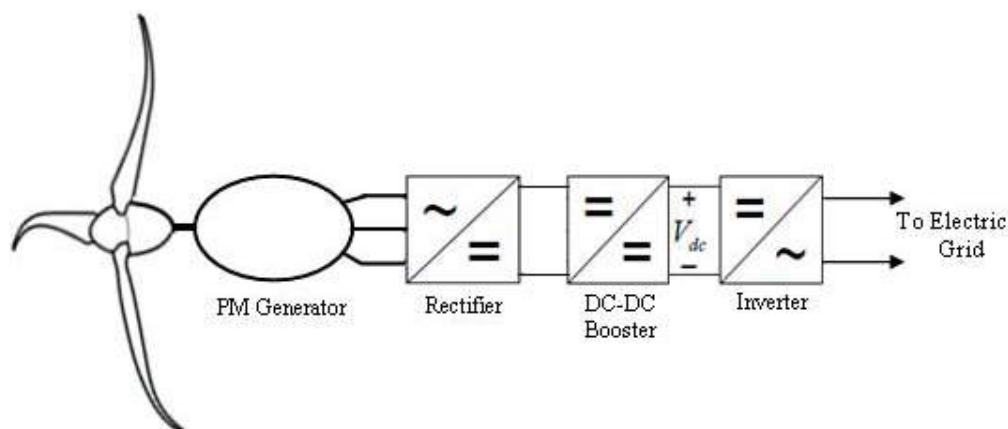


Рисунок 1. Структурная схема ВЭУ

Figure 1. Structural diagram of the wind turbine

время известно множество работ, посвященных предложению конструктивных и других решений по совершенствованию ветрогенераторов.

Актуальность.

Постановка проблемы

В ВЭУ, например, по рисунку 1, используется два основных способа передачи механической энергии от турбины к генератору: через редуктор (редукторный привод) или без редуктора — прямой привод (direct drive, DD). Передача через редуктор используется, например, в ВЭУ большой мощности, когда частота вращения турбины составляет 10–30 об/мин, а электрогенератор характеризуется высокой номинальной частотой вращения, например 1000–3000 об/мин. В этом случае механическая передача применяется для согласования номинальных частот вращения турбины и генератора.

Использование редукторных ВЭУ связано со следующими их недостатками [3, 4]:

1. Дополнительный шум и вибрации ВЭУ, вызванные механической зубчатой передачей. Это особенно следует учитывать при размещении ВЭУ вблизи жилых зон;
2. Необходимость более частого обслуживания ВЭУ (редукторов);
3. Наличие потерь мощности в редукторах;
4. Усложнение схемы ВЭУ, снижение надежности.

Влияние таких параметров, как мощность ВЭУ, размеры лопастей и частота вращения турбины друг на друга оценивается формулой [5]:

$$\omega_T \sim P_T^{-0,5}, \quad (1)$$

где ω_T — угловая частота вращения турбины, рад/с;

P_T — механическая мощность, получаемая турбиной от ветра, Вт.

В настоящее время для мощных ВЭУ все большее распространение получает прямой привод генератора от турбины, устраняющий отмеченные недостатки редукторного привода. Недостатком прямого привода является тот факт, что работа генератора при прямом приводе обуславливает необходимость его проектирования на низкую частоту вращения турбины и высокий вращающий момент, что приводит к росту габаритов и веса генератора [6].

До недавнего времени в ВЭУ широкое применение в качестве генераторов получали асинхронные генераторы с короткозамкнутым и фазным ротором [4]. Однако преимущества синхронных машин, совершенствование их активных элементов обуславливают все большее применение таких типов машин в ВЭУ. Наибольшие перспективы в ВЭУ имеет применение синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов (ГПМ) на основе редкоземельных элементов: NdFeB, SmCo. Благодаря применению таких магнитных систем достигается высокая удельная мощность ГПМ, высокий КПД и снижаются эксплуатационные затраты [1, 7, 8].

Другими способами совершенствования генераторов ВЭУ является применение машин с обмотками на основе сверхпроводников. Это позволяет достичь плотностей тока обмоток до сотен амперов на квадратный миллиметр и магнитных индукций в зазоре до 2 Тл [9, 10].

В связи с расширением применения ГПМ в ВЭУ важными задачами являются оптимизация их конструкций, повышение КПД и удельной мощности, улучшение теплового режима машины. Для этого в процессе исследования и расчета ГПМ необходимо производить оценку влияния основных конструктивных и электромагнитных решений (число пазов, частота вращения, размеры элементов магнитной системы и т.д. [3, 8, 11])

на показатели его работы, включая выходную мощность, КПД, потери энергии, массогабаритные параметры. Кроме того, ввиду работы генераторов ВЭУ малой и средней мощности при сравнительно небольших частотах вращения (десятки-сотни об/мин) важными параметрами, которые должны быть определены в расчетах, являются момент залипания и пульсации момента генераторов. Таким образом, можно выделить следующие основные направления улучшения ГПМ, применяющихся в ВЭУ:

1. Повышение надежности и снижение затрат на обслуживание;
2. Оптимизация массы и размеров генератора;
3. Снижение момента залипания и пульсаций момента на валу;
4. Эффективное управление тепловыми режимами генератора.

Особый интерес представляет проектирование генераторов для ВЭУ мощностью от 2–3 до 10 кВт, которые широко используются в наземных ВЭУ, в том числе в местах вблизи проживания и работы людей. Важными параметрами при проектировании подобных ВЭУ являются количество пар полюсов, конструкция ротора и частота вращения. Эти параметры существенно влияют на электрические и механические характеристики генератора, такие как электромагнитный момент, напряжение, КПД и вибрации. Современные исследования показывают, что оптимизация этих параметров позволяет значительно улучшить эффективность работы ВЭУ, снизить их уровень шума, что делает их более привлекательными для использования в энергетике. Таким образом, актуальность исследования электрогенераторов для ВЭУ продиктована необходимостью повышения эффективности, надёжности и уменьшения эксплуатационных расходов ВЭУ.

Цели и задачи

Основной целью данной работы являются разработка и исследование электрогенераторов мощностью 2 кВт для ВЭУ с акцентом на оптимизацию их конструктивных параметров. В процессе работы решаются следующие задачи:

1. Проведение анализа влияния количества пар полюсов ротора на эффективность генератора и его массогабаритные показатели;
2. Изучение конструкции ротора, магнитной системы и их влияния на электромагнитные параметры ГПМ;
3. Оценка влияния частоты вращения на тепловое состояние и показатели мощности генератора.

Исследование параметров ГПМ для ВЭУ

Проектирование представленных далее ГПМ производилось в программной среде Ansys, а также на основе методик и рекомендаций в [12–16]. Номинальная мощность ГПМ составляет 2 кВт при выходном выпрямленном напряжении 50 В (нагрузкой ГПМ является выпрямитель). В исследуемых ГПМ использовалась обмотка распределенного типа. Для такого типа машин потери в роторе (магниты и магнитопровод) малы по сравнению с потерями в обмотке. Это является существенным преимуществом с точки зрения охлаждения и положительно сказывается на ресурсе работы машины.

Первый вариант генератора

На рисунке 2 показан поперечный и продольный разрезы проектируемого генератора с числом пар полюсов 6.

В таблице 1 представлены номинальные данные спроектированного генератора и результаты его расчета при работе на выпрямительную нагрузку в ВЭУ. На рисунке 3 показан график момента на валу ГПМ.

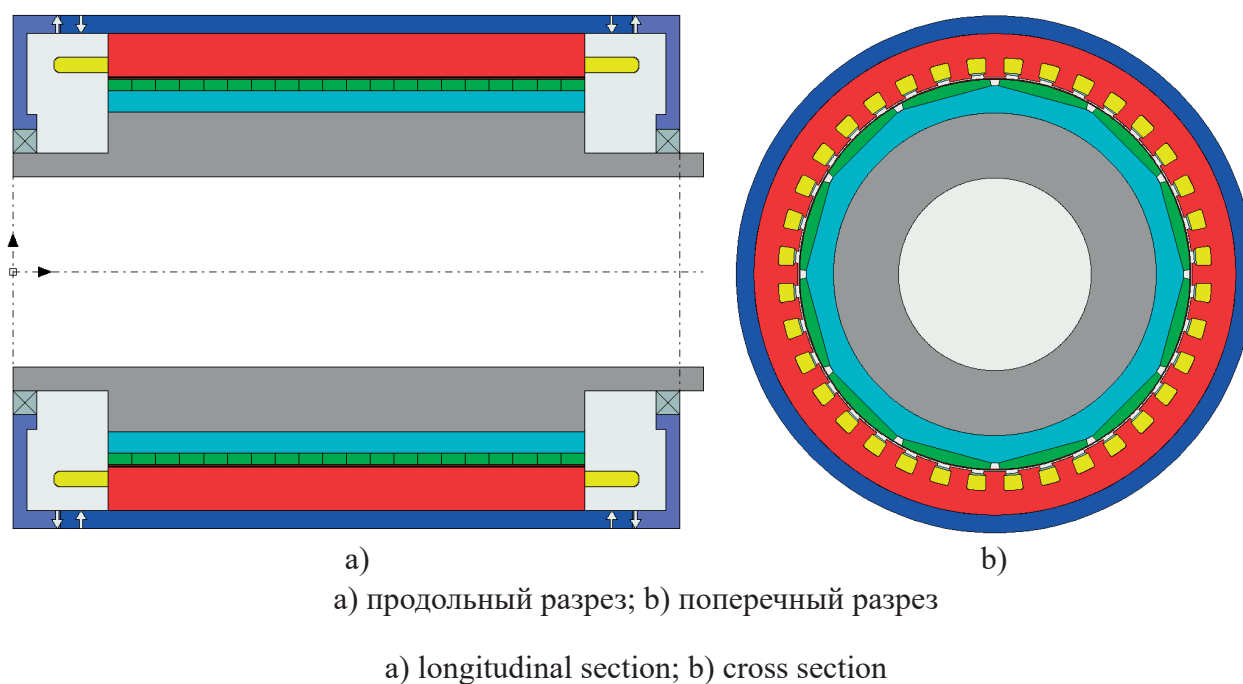


Рисунок 2. Конструкция генератора с числом пар полюсов 6

Figure 2. Generator design with 6 pole pairs

Таблица 1. Данные генератора с числом пар полюсов 6

Table 1. Generator data with 6 pole pairs

Параметры	Значение
Число полюсов	12
Активная длина, мм	200
Внешний диаметр статора, мм	197
Внутренний диаметр статора, мм	164
Внешний диаметр ротора по постоянным магнитам, мм	162
Внутренний диаметр ротора, мм	134
Число фаз	3
Число пазов статора	36
Шаг обмотки по пазам	3
Марка магнитов	NdFeB(N45UH)
Толщина магнитов, мм	5
Масса обмотки, кг	1,66
Масса постоянных магнитов, кг	2,9
Масса сердечника статора, кг	10,4
Масса сердечника ротора, кг	7
Активная масса, кг	21,96
Частота вращения, об/мин	300
Мощность на нагрузке, кВт	2,09
Напряжение на нагрузке, В	50
Частота тока, Гц	30

Параметры	Значение
Ток фазный, А	33,14
Плотность тока, А/мм ²	9,93
Линейная нагрузка, А/мм	13,9
Расчетная температура обмотки, °С	140
Расчетная температура ПМ, °С	90
Потери в обмотке статора, Вт	500
Потери в стали статора, Вт	36
Потери в стали ротора, Вт	0,1
Потери в постоянных магнитах, Вт	0,2
Потери в бандаже, Вт	3
КПД электромагнитный, %	79,4
Коэффициент мощности	0,97

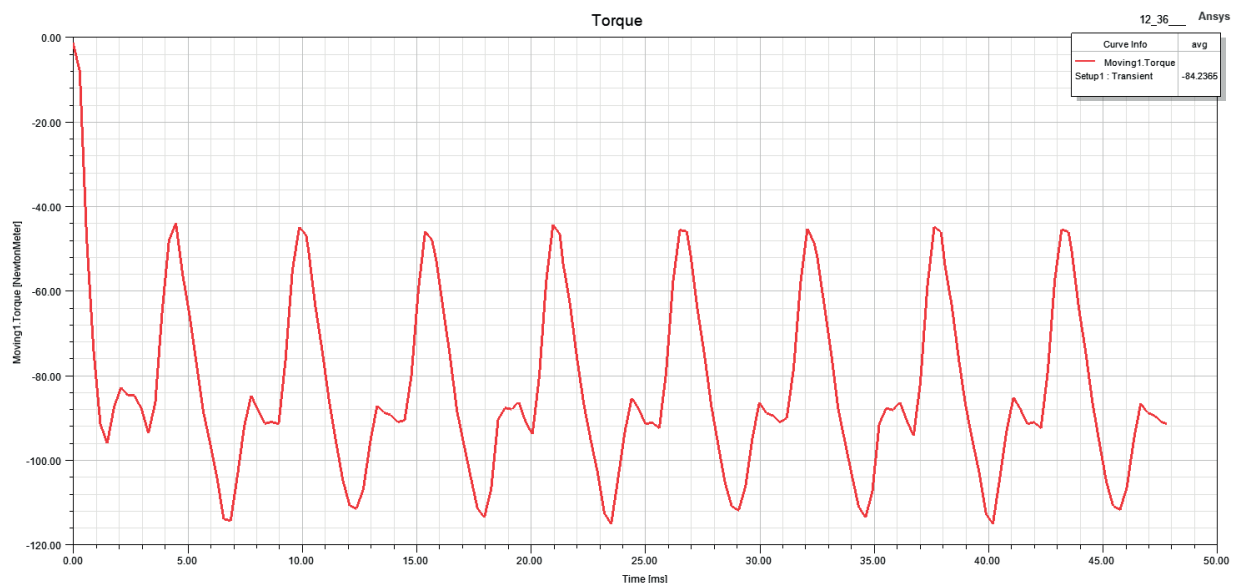


Рисунок 3. Момент на валу ГПМ с числом пар полюсов 6

Figure 3. Generator shaft torque with the number of pole pairs 6

По результатам электромагнитного и теплового расчетов видно, что генератор выдает требуемые параметры — 2 кВт мощности и 48 В выпрямленного напряжения. Тепловое состояние генератора при этом в нормальном рабочем диапазоне для современных активных и изоляционных материалов. Однако на графике момента на валу ГПМ видно, что присутствуют существенные пульсации, которые приводят к шуму и вибрациям.

Следует отметить, что толщины спинок статора и ротора косвенно зависят от количества полюсов: чем меньше полюсов, тем больше требуется спинка. Поэтому в дальнейшем будет целесообразно увеличить количество полюсов, тем самым снизив массу машины за счет уменьшения спинок, для чего далее будет рассчитан усовершенствованный генератор.

Второй вариант генератора

Для учета влияния количества полюсов на выходные и массогабаритные показатели рассмотрим следующий вариант машины с числом пар полюсов, равным 9. При расчете этой машины отталкиваемся от габаритных размеров предыдущей машины. Для снижения

величины пульсаций предлагается ввести скос пазов статора на 1 зубец. На рисунке 4 показаны поперечный и продольный разрезы. В таблице 2 представлены номинальные данные генератора и результаты расчета. На рисунке 5 показан график момента на валу ГПМ.

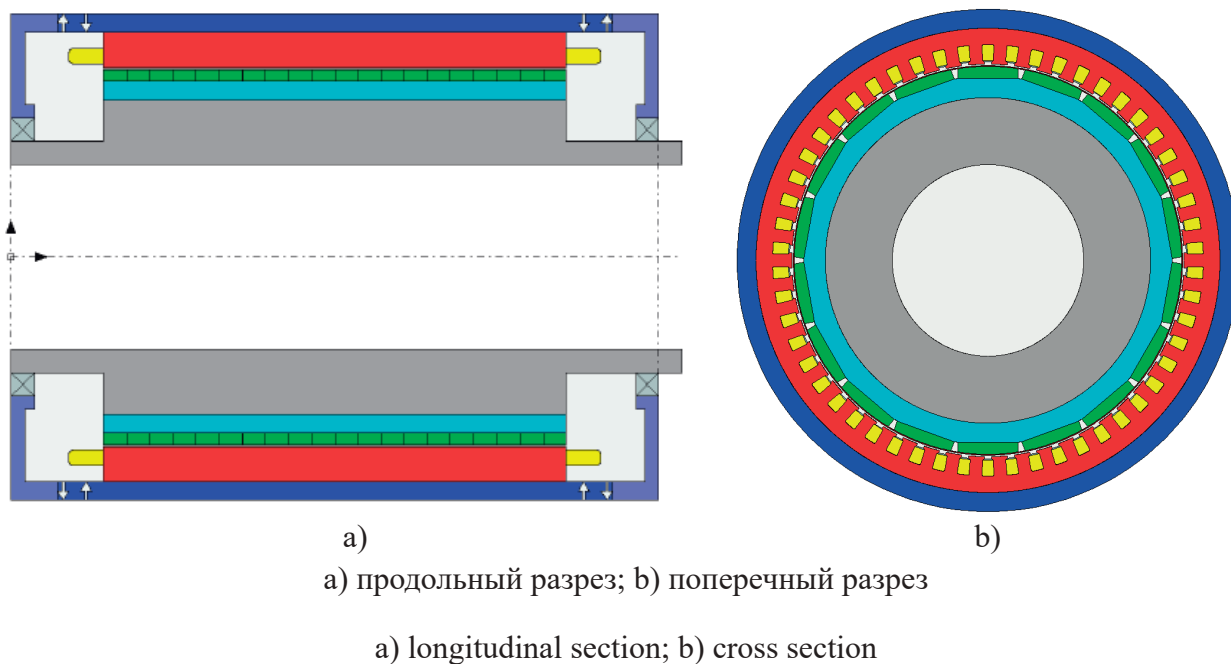


Рисунок 4. Конструкция генератора с числом пар полюсов 9

Figure 4. Generator design with the number of pole pairs 9

Таблица 2. Данные генератора с числом пар полюсов 9

Table 2. Data for a generator with 9 pole pairs

Параметры	Значение
Число полюсов	18
Активная длина, мм	200
Внешний диаметр статора, мм	194
Внутренний диаметр статора, мм	164
Внешний диаметр ротора по постоянным магнитам, мм	162
Скос пазов статора (зубец/градусы),	1/6,666
Внутренний диаметр ротора, мм	136
Число фаз	3
Число пазов статора	54
Шаг обмотки по пазам	3
Марка магнитов	NdFeB(N45UH)
Толщина магнитов, мм	5
Масса обмотки, кг	1,53

Параметры	Значение
Масса постоянных магнитов, кг	3,2
Масса сердечника статора, кг	9,22
Масса сердечника ротора, кг	6
Активная масса, кг	19,95
Частота вращения, об/мин	300
Мощность на нагрузке, кВт	2,1
Напряжение на нагрузке, В	52,4
Частота тока, Гц	45
Ток фазный, А	32,1
Плотность тока, А/мм ²	9,6
Линейная нагрузка, А/мм	13,46
Расчетная температура обмотки, °С	140
Расчетная температура ПМ, °С	90
Потери в обмотке статора, Вт	430
Потери в стали статора, Вт	40
Потери в стали ротора, Вт	0,1
Потери в постоянных магнитах, Вт	0,15
Потери в бандеже, Вт	1,7
КПД электромагнитный, %	81,6
Коэффициент мощности	0,97

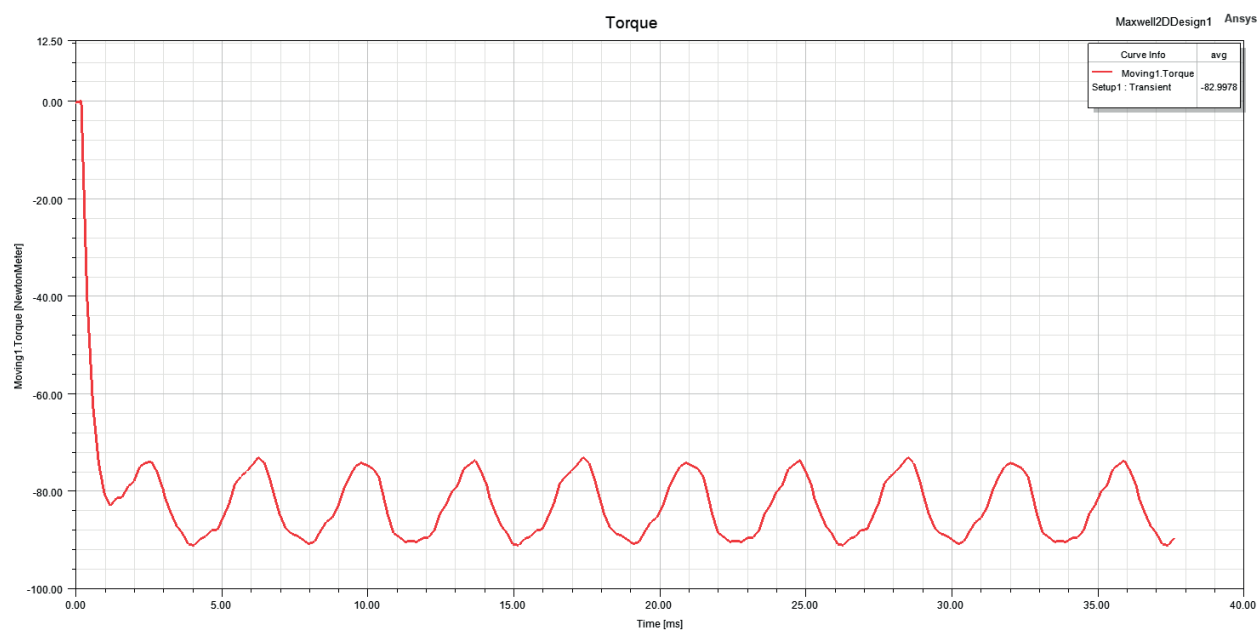


Рисунок 5. Момент на валу ГПМ с числом пар полюсов 9

Figure 5. Generator shaft torque with 9 pole pairs

По результатам расчета видно, что увеличение полюсов привело к следующим положительным результатам, по сравнению с первой машиной:

— снижение пульсаций момента на валу ГПМ за счет скоса пазов статора (рисунки 3 и 5);

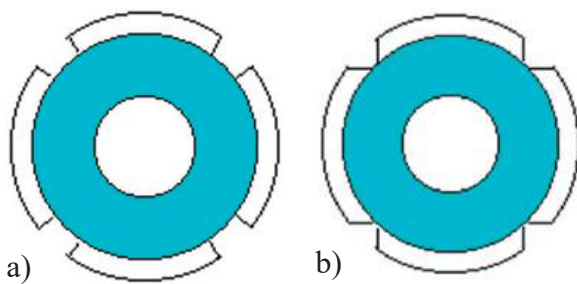
— уменьшение необходимой толщины спинок статора и ротора, и, как следствие, снижение активной массы генератора.

Далее предлагается исследовать вторую машину при разных магнитных системах — с полукруглыми, радиально

намагниченными магнитами и с полукруглыми, диаметрально намагниченными магнитами с параллельными гранями (рисунок 6).

Третий вариант генератора с полукруглыми магнитами и радиальной намагниченностью

На рисунке 7 показаны поперечный и продольный разрезы ГПМ. В таблице 3 представлены номинальные данные генератора и результаты расчета. На рисунке 8 показан график момента на валу ГПМ.

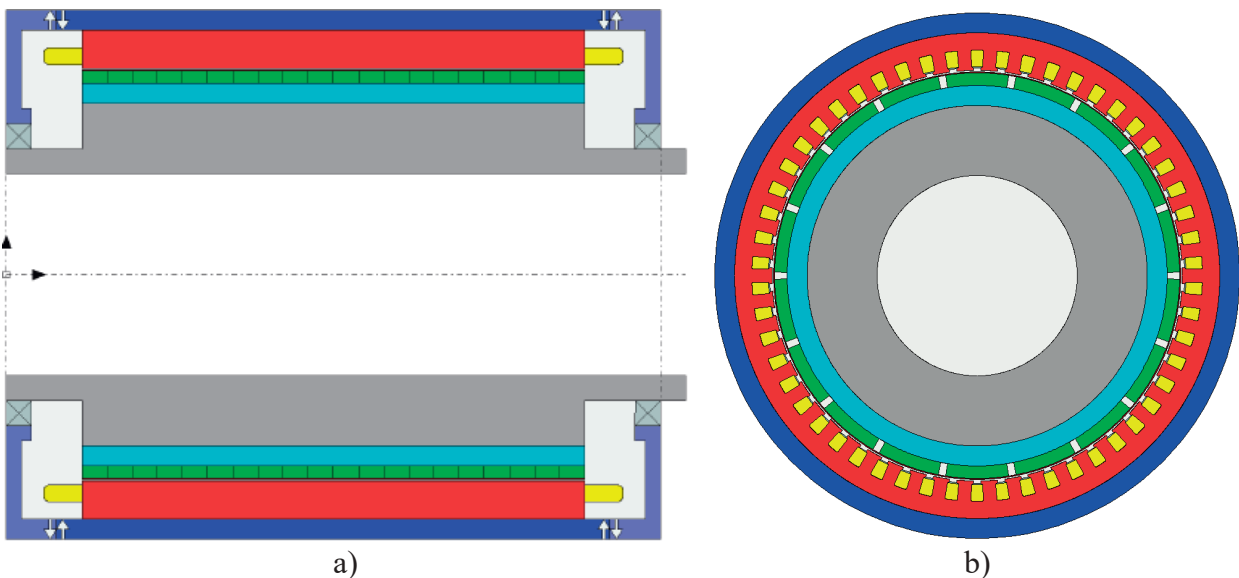


- а) с полукруглыми, радиально намагниченными магнитами;
б) с полукруглыми, диаметрально намагниченными магнитами с параллельными гранями

- a) with semicircular, radially magnetized magnets; b) with semicircular, diametrically magnetized magnets with parallel edges

Рисунок 6. Магнитные системы генератора

Figure 6. Generator magnetic systems



- а) продольный разрез; б) поперечный разрез

- a) longitudinal section; b) cross section

Рисунок 7. Конструкция генератора с полукруглыми магнитами и радиальной намагниченностью

Figure 7. Design of a generator with semicircular magnets and radial magnetization

Таблица 3. Данные генератора с полукруглыми магнитами и радиальной намагниченностью**Table 3.** Data of the generator with semicircular magnets and radial magnetization

Параметры	Значение
Число полюсов	18
Активная длина, мм	200
Внешний диаметр статора, мм	194
Внутренний диаметр статора, мм	164
Внешний диаметр ротора по постоянным магнитам, мм	162
Скос пазов статора (зубец/градусы),	1/6,666
Внутренний диаметр ротора, мм	136
Число фаз	3
Число пазов статора	54
Шаг обмотки по пазам	3
Марка магнитов	NdFeB(N45UH)
Толщина магнитов, мм	5
Масса обмотки, кг	1,53
Масса постоянных магнитов, кг	3,33
Масса сердечника статора, кг	9,22
Масса сердечника ротора, кг	5,68
Активная масса, кг	19,76
Частота вращения, об/мин	300
Мощность на нагрузке, кВт	2,05
Напряжение на нагрузке, В	51,6
Частота тока, Гц	45
Ток фазный, А	31,6
Плотность тока, А/мм²	9,45
Линейная нагрузка, А/мм	13,25
Расчетная температура обмотки, °С	140
Расчетная температура ПМ, °С	90
Потери в обмотке статора, Вт	414
Потери в стали статора, Вт	37,4
Потери в стали ротора, Вт	0,1
Потери в постоянных магнитах, Вт	0,15
Потери в бандаже, Вт	1,76
КПД электромагнитный, %	81,88
Коэффициент мощности	0,98

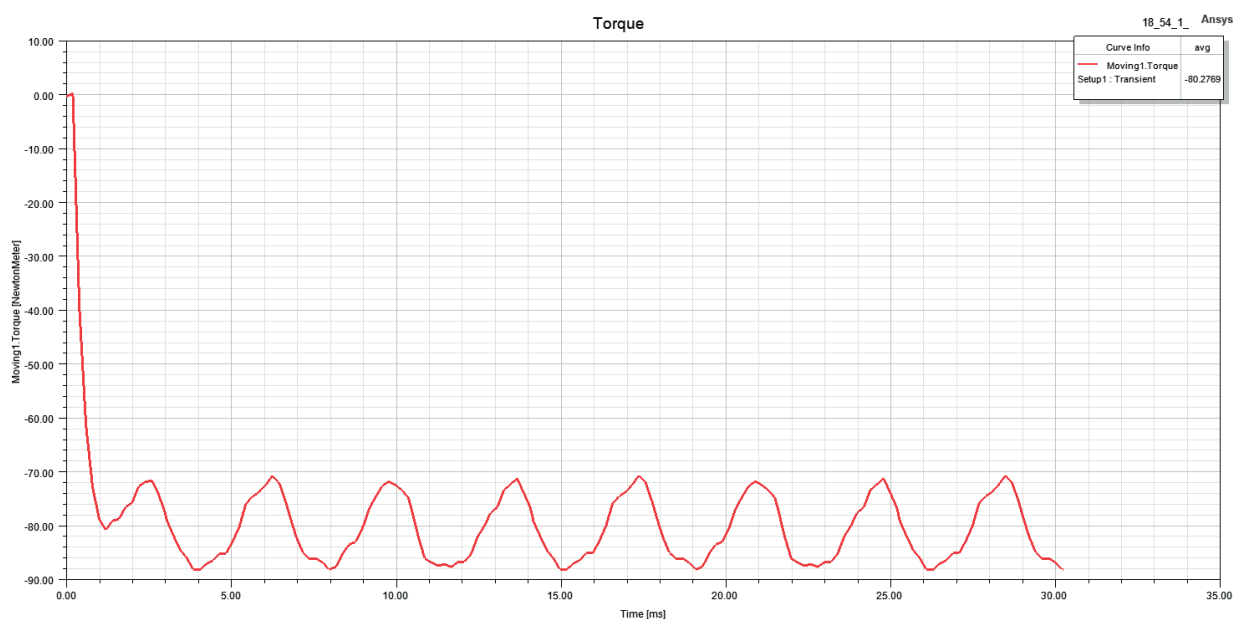


Рисунок 8. Момент на валу ГПМ с полукруглыми магнитами и радиальной намагниченностью

Figure 8. Moment on the generator shaft with semicircular magnets and radial magnetization

Как видно, при использовании данной магнитной системы нет существенных изменений в выходных и массогабаритных параметрах генератора. Однако с точки зрения изготовления такая конструкция по сравнению со второй машиной является более сложной, поскольку необходимо точное позиционирование по окружности цилиндрической поверхности магнита на такой же цилиндрической поверхности магнитопровода ротора. Поэтому второй вариант машины более практичен, так как у магнитов имеются плоские поверхности, и на поверхности ротора имеются ответные плоские площадки под установку магнитов.

Генератор с полукруглыми магнитами с параллельными гранями, диаметральной намагниченностью

На рисунке 9 показаны поперечный и продольный разрезы. В таблице 4 представлены номинальные данные генера-

тора и результаты расчета. На рисунке 10 показан график момента на валу ГПМ.

Как видно, показатели эффективности, мощности, напряжения на нагрузке и момента на валу мало отличаются от третьего варианта ГПМ. Недостаток такой конструкции аналогичный — сложность изготовления ГПМ по сравнению со вторым вариантом.

Исследование влияния частоты вращения на параметры ГПМ

Исследование на предмет влияния частоты вращения проводилось на втором варианте машины из всех вышеприведенных, поскольку она является оптимальной как с точки зрения выходных параметров, так и с точки зрения технологичности изготовления магнитной системы ротора. Было проведено моделирование на частоте 600 об/мин. В таблице 5 представлены результаты расчета таких генераторов.

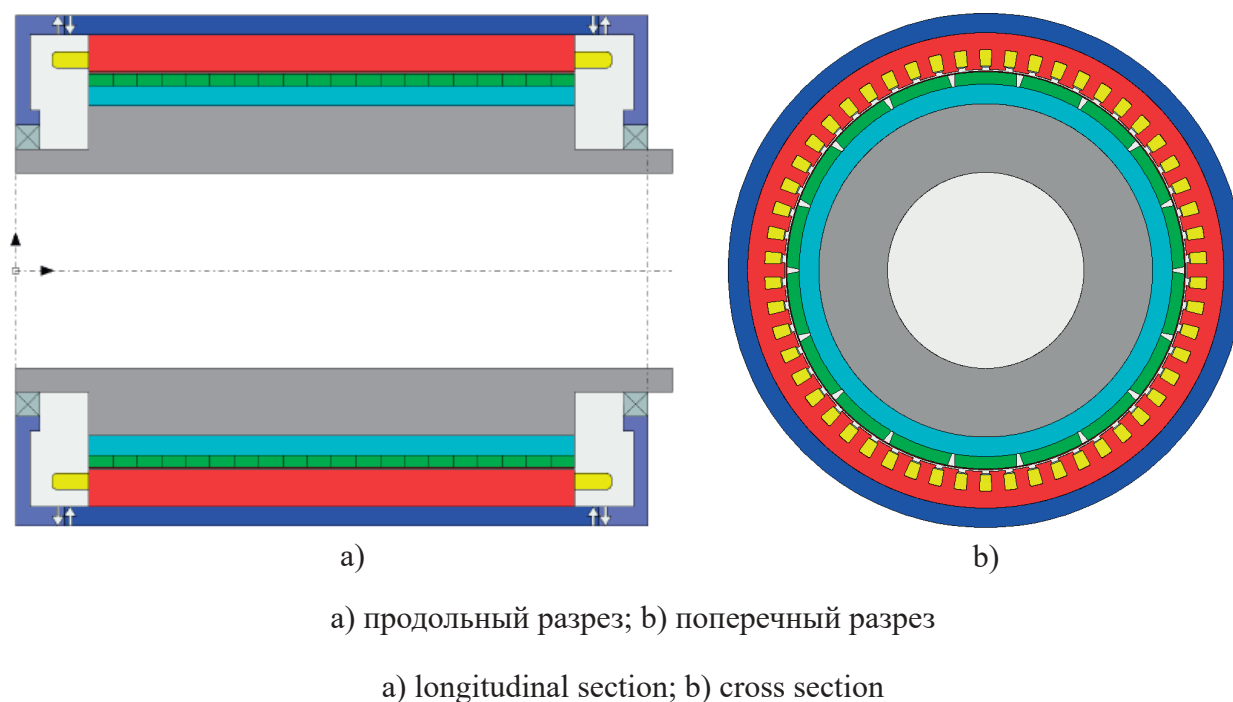


Рисунок 9. Конструкция генератора с полукруглыми магнитами с параллельными гранями и диаметральной намагниченностью

Figure 9. Generator design with semicircular magnets with parallel edges and diametrical magnetization

Таблица 4. Данные генератора с полукруглыми магнитами с параллельными гранями и диаметральной намагниченностью

Table 4. Data of the generator with semicircular magnets with parallel edges and diametrical magnetization

Параметры	Значение
Число полюсов	18
Активная длина, мм	200
Внешний диаметр статора, мм	194
Внутренний диаметр статора, мм	164
Внешний диаметр ротора по постоянным магнитам, мм	162
Скос пазов статора (зубец/градусы),	1/6,666
Внутренний диаметр ротора, мм	136
Число фаз	3
Число пазов статора	54
Шаг обмотки по пазам	3
Марка магнитов	NdFeB(N45UH)
Толщина магнитов, мм	5
Масса обмотки, кг	1,53
Масса постоянных магнитов, кг	3,43
Масса сердечника статора, кг	9,22
Масса сердечника ротора, кг	5,68

продолжение таблицы 4

Параметры	Значение
Активная масса, кг	19,86
Частота вращения, об/мин	300
Мощность на нагрузке, кВт	2,1
Напряжение на нагрузке, В	52,9
Частота тока, Гц	45
Ток фазный, А	32,3
Плотность тока, А/мм²	9,66
Линейная нагрузка, А/мм	13,54
Расчетная температура обмотки, °С	140
Расчетная температура ПМ, °С	90
Потери в обмотке статора, Вт	433
Потери в стали статора, Вт	39
Потери в стали ротора, Вт	0,1
Потери в постоянных магнитах, Вт	0,17
Потери в бандаже, Вт	1,65
КПД электромагнитный, %	81,5
Коэффициент мощности	0,978

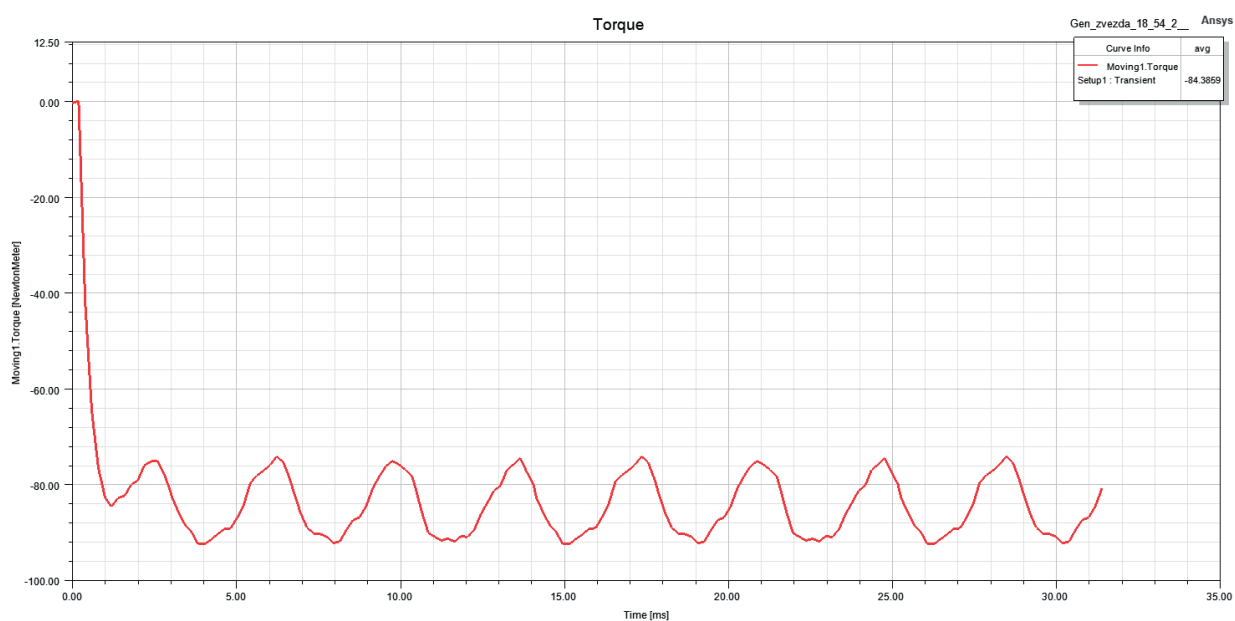


Рисунок 10. Момент на валу ГПМ с полукруглыми магнитами с параллельными гранями и диаметральной намагниченностью

Figure 10. Torque of the generator shaft with semicircular magnets with parallel edges and diametrical magnetization

Таблица 5. Данные генератора, частота вращения 600 об/мин**Table 5.** Generator data at 600 rpm

Параметры	Значение
Число полюсов	18
Активная длина, мм	93
Внешний диаметр статора, мм	194
Внутренний диаметр статора, мм	164
Внешний диаметр ротора по постоянным магнитам, мм	162
Внутренний диаметр ротора, мм	136
Число фаз	3
Число пазов статора	54
Масса обмотки, кг	0,85
Масса постоянных магнитов, кг	1,5
Масса сердечника статора, кг	4,3
Масса сердечника ротора, кг	2,8
Активная масса, кг	8,6
Частота вращения, об/мин	600
Мощность на нагрузке, кВт	2,1
Напряжение на нагрузке, В	52,3
Частота тока, Гц	90
Ток фазный, А	32,2
Плотность тока, А/мм²	9,63
Линейная нагрузка, А/мм	13,48
Расчетная температура обмотки, °С	140
Расчетная температура ПМ, °С	90
Потери в обмотке статора, Вт	240
Потери в стали статора, Вт	40
Потери в стали ротора, Вт	0,25
Потери в постоянных магнитах, Вт	0,45
Потери в бандаже, Вт	3,3
КПД электромагнитный, %	88
Коэффициент мощности	0,97

Как показало исследование, увеличение частоты вращения кардинально сказывается на массогабаритных характеристиках генератора:

— наблюдается снижение массы пропорционально относительной величины увеличения скорости вращения. Так, при частоте 600 об/мин активная масса снизилась в 2 с лишним раза по сравнению с частотой вращения 300 об/мин;

— происходит рост КПД, поскольку из-за уменьшения активной длины снижается сопротивление обмоток и, соответственно, снижаются потери в обмотке;

— по результатам теплового моделирования можно сделать вывод, что тепловое состояние генератора улучшается (температуры элементов активной части снижаются) при одних и тех же токовых

нагрузках и выходной мощности. Это связано с тем, что машина открытого исполнения, и при вращении ротор взаимодействует с окружающей средой, таким образом, получается дополнительный «обдув» ротора — дополнительный съем тепла.

Выводы

Анализ результатов расчетов и моделирования электрогенераторов для ВЭУ позволил выявить ключевые аспекты, влияющие на эффективность, надежность и эксплуатационные характеристики этих машин. Рассмотренные варианты генераторов с различными конструктивными решениями и магнитными системами продемонстрировали значительное влияние ряда факторов, таких как количество полюсов, конструкции ротора и статора на массогабаритные показатели, КПД и тепловое состояние машины.

Увеличение числа полюсов и внедрение скоса пазов статора привели к значительному снижению пульсаций механического момента и улучшению распределения магнитного поля, что способствовало повышению КПД и снижению вибраций. Это показывает, что оптимизация геометрии и конфигурации магнитной системы может существенно повысить эффективность генераторов

для ВЭУ, особенно в условиях переменчивых ветровых нагрузок.

Результаты моделирования продемонстрировали, что увеличение частоты вращения ротора приводит к значительному снижению массы генератора при сохранении или улучшении выходных параметров. Это связано с уменьшением активной длины машины и, соответственно, сопротивления обмоток. Такой подход позволяет не только сократить материальные затраты на производство генераторов, но и уменьшить нагрузку на конструктивные элементы ВЭУ, что особенно важно для малогабаритных установок.

В заключение можно отметить, что проведенные исследования и моделирование показали перспективность использования улучшенных конструктивных решений и магнитных систем для создания высокоэффективных и надежных генераторов ВЭУ. Применение оптимизированных конструкций, увеличение частоты вращения и адаптация магнитных систем к условиям эксплуатации позволяют не только повысить эффективность и долговечность генераторов, но и снизить их стоимость и трудозатраты на изготовление, что делает ветроэнергетику более доступной и привлекательной для широкого внедрения.

Список источников

1. Cultura A.B. Salameh Z.M. Modeling and Simulation of a Wind Turbine-Generator System // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. DOI: 10.1109/pes.2011.6039668.
2. López-Ortiz E.N., Campos-Gaona D., Moreno-Goytia E.L. Modeling of a Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator // 2012 North American Power Symposium (NAPS). 2012. DOI: 10.1109/naps.2012.6336439.
3. Liu T., Huang Sh., Deng Q., Pu Q., Huang K. Effect of the Number of Slots per Pole on Performance of Permanent Magnet Generator Direct-Driven by Wind Turbine // 2011 International

Conference on Electrical Machines and Systems. 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073738.

4. Palmieri M., Bozzella S., Cascella G.L., Bronzini M., Torresi M., Cupertino F. Wind Micro-Turbine Networks for Urban Areas: Optimal Design and Power Scalability of Permanent Magnet Generators // *Energies*. 2018. Vol. 11(10). DOI: 10.3390/en11102759.

5. Nasiri-Zarandi R., Ajamloo A.M., Abbaszadeh K. Design Optimization of a Transverse Flux Halbach-Array PM Generator for Direct Drive Wind Turbines // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. Vol. 35, Issue 3. P. 1485–1493. DOI: 10.1109/tec.2020.2975259.

6. Sopenan J., Ruuskanen V., Nerg J., Pyrhonen J. Dynamic Torque Analysis of a Wind Turbine Drive Train Including a Direct-Driven Permanent-Magnet Generator // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, Issue 9. P. 3859–3867. DOI: 10.1109/TIE.2010.2087301.

7. Pyrhönen J., Nerg Janne, Kurrnen P., Puranen J., Haavisto M. Permanent Magnet Technology in Wind Power Generators // *The XIX International Conference on Electrical Machines — ICEM 2010*. 2010. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608312.

8. Roshanfekar P., Thiringer T., Alatalo M., Lundmark S. Performance of Two 5 MW Permanent Magnet Wind Turbine Generators Using Surface Mounted and Interior Mounted Magnets // *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*. 2012. DOI: 10.1109/ICEIMach.2012.6350004.

9. Xu Y., Maki N., Izumi M. Performance Comparison of 10-MW Wind Turbine Generators with HTS, Copper, and PM Excitation // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2015. Vol. 25, Issue 6. DOI: 10.1109/TASC.2015.2493120.

10. Guan Y., Zhu Z.Q., Li G.-J., Ziad A., Arwyn S. Th., Vedreno-Santos F., Odavic M. Influence of Pole Number and Stator Outer Diameter on Volume, Weight, and Cost of Superconducting Generators with Iron-Cored Rotor Topology for Wind Turbines // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017. Vol. 27, Issue 6. DOI: 10.1109/TASC.2017.2716818.

11. Ghita C., Chirilă A.-I., Deaconu D., Ilina D.I. Wind Turbine Permanent Magnet Synchronous Generator Magnetic Field Study // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2008. Vol. 6, No. 1. P. 146–149. DOI: 10.24084/repqj06.247.

12. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высшая школа, 1982. 272 с.

13. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 279 с. ISBN 5-283-00556-9.

14. Гольдберг О.Д., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин / под ред. О.Д. Гольдберга. Изд. 3-е, перераб. М.: Высшая школа, 2006. 432 с.

15. Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2015. 767 с. ISBN 978-5-534-11700-4.

16. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 169 с.

References

1. Cultura A.B. Salameh Z.M. Modeling and Simulation of a Wind Turbine-Generator System. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011. DOI: 10.1109/pes.2011.6039668.

2. López-Ortiz E.N., Campos-Gaona D., Moreno-Goytia E.L. Modeling of a Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator. *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, 2012. DOI: 10.1109/naps.2012.6336439.

3. Liu T., Huang Sh., Deng Q., Pu Q., Huang K. Effect of the Number of Slots per Pole on Performance of Permanent Magnet Generator Direct-Driven by Wind Turbine. *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073738.

4. Palmieri M., Bozzella S., Cascella G.L., Bronzini M., Torresi M., Cupertino F. Wind Micro-Turbine Networks for Urban Areas: Optimal Design and Power Scalability of Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2018, Vol. 11(10). DOI: 10.3390/en1102759.

5. Nasiri-Zarandi R., Ajamloo A.M., Abbaszadeh K. Design Optimization of a Transverse Flux Halbach-Array PM Generator for Direct Drive Wind Turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, Vol. 35, Issue 3, pp. 1485–1493. DOI: 10.1109/tec.2020.2975259.

6. Sopenan J., Ruuskanen V., Nerg J., Pyrhonen J. Dynamic Torque Analysis of a Wind Turbine Drive Train Including a Direct-Driven Permanent-Magnet Generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, Vol. 58, Issue 9, pp. 3859–3867. DOI: 10.1109/TIE.2010.2087301.

7. Pyrhönen J., Nerg Janne, Kurrnen P., Puranen J., Haavisto M. Permanent Magnet Technology in Wind Power Generators. *The XIX International Conference on Electrical Machines — ICEM 2010*, 2010. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608312.

8. Roshanfekar P., Thiringer T., Alatalo M., Lundmark S. Performance of Two 5 MW Permanent Magnet Wind Turbine Generators Using Surface Mounted and Interior Mounted Magnets. *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012. DOI: 10.1109/ICEIMach.2012.6350004.

9. Xu Y., Maki N., Izumi M. Performance Comparison of 10-MW Wind Turbine Generators with HTS, Copper, and PM Excitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, Vol. 25, Issue 6. DOI: 10.1109/TASC.2015.2493120.

10. Guan Y., Zhu Z.Q., Li G.-J., Ziad A., Arwyn S. Th., Vedreno-Santos F., Odavic M. Influence of Pole Number and Stator Outer Diameter on Volume, Weight, and Cost of Superconducting Generators with Iron-Cored Rotor

Topology for Wind Turbines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, Vol. 27, Issue 6. DOI: 10.1109/TASC.2017.2716818.

11. Ghita C., Chirilă A.-I., Deaconu D., Ilina D.I. Wind Turbine Permanent Magnet Synchronous Generator Magnetic Field Study. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2008, Vol. 6, No. 1, pp. 146–149. DOI: 10.24084/repqj06.247.

12. Balagurov V.A. *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Design of Special AC Electric Machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p. [in Russian].

13. Balagurov V.A., Galteev F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Electric Generators with Permanent Magnets]. Moscow,

Energoatomizdat Publ., 1988. 279 p. ISBN 5-283-00556-9. [in Russian].

14. Gol'dberg O.D., Sviridenko I.S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of Electric Machines]. Ed. by O.D. Goldberg. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 432 p. [in Russian].

15. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of Electric Machines]. Ed. by I.P. Kopylov. 4 ed., pererab. i dop. Moscow, Yurait Publ., 2015. 767 p. ISBN 978-5-534-11700-4. [in Russian].

16. Ledovskii A.N. *Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami* [Electric Machines with High-Coercivity Permanent Magnets]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 169 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024; принята к публикации 24.10.2024.

The article was submitted 01.10.2024; approved after reviewing 16.10.2024; accepted for publication 24.10.2024.

Научная статья

УДК 621.313.333.2

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-50–58

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ ТОКА РОТОРА

**Камил Шабо****Kamil Shabo**

кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации производственных процессов, Технический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова в г. Нерюнгри», Нерюнгри, Россия

**Сергей Викторович Ляпушкин****Sergey V. Lyapushkin**

кандидат технических наук,
доцент отделения электроэнергетики и электротехники,
Томский политехнический университет,
Томск, Россия

Актуальность

В текущее время электроприводная система значительного числа механизмов, обеспечивающих подъем и перемещение грузов, таких как краны, используемые в портах и складских терминалах, а также подъемные установки, работающие на шахтных стволах небольшой и средней производительности в горнодобывающей отрасли, и осуществляющие управление положением груза в процессе движения, оснащены асинхронными двигателями с фазным ротором. Для улучшения регулировочных свойств электроприводов такого типа используются управляемые тиристорные регуляторы тока (ТРТ) в сочетании с регулированием сопротивления в цепи ротора. Такой подход обеспечивает более точное и плавное изменение момента на валу электродвигателя в зависимости от требуемого алгоритма движения.

Цель исследования

Исследование процессов в приводе переменного тока с ТРТ при включении реостата в цепь ротора асинхронного привода.

Методы исследования

Разработана математическая модель, позволяющая формировать ступенчато изменяющийся сигнал заданного ускорения при пуске и замедлении с длительностью первой ступени, равной половине периода собственных колебаний системы.

Результаты

Интеграция реостата в роторную цепь асинхронного двигателя, управляемого ТРТ, определяется необходимостью ограничения бросков тока и нагрева двигателя. Наличие реостата, переключаемого

Ключевые слова

асинхронный
электропривод,
тиристорный регулятор
тока, упругое звено,
динамическая нагрузка,
роторная цепь,
управляющий сигнал,
позиционное управление,
двигательный режим,
динамическое
торможение,
механическая
характеристика,
коэффициент жёсткости

при пуске и торможении, позволяет рассматривать управление асинхронным приводом с ТРТ в цепи ротора, по нагреву близким к реостатному управлению. Применение ТРТ ротора позволяет существенно улучшить регулировочные свойства асинхронного электропривода с упругими звеньями по динамическим нагрузкам и делает возможным создание на его основе высокоточных систем управления позиционными механизмами.

Для цитирования: Шабо К., Ляпушкин С. В. Оптимизация динамических режимов асинхронного позиционного электропривода с тиристорным регулятором тока ротора // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 50-58. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-50-58>.

Original article

OPTIMIZATION OF DYNAMIC MODES OF AN ASYNCHRONOUS POSITIONAL ELECTRIC DRIVE WITH A THYRISTOR ROTOR CURRENT REGULATOR

Relevance

Currently, the electric drive system of a significant number of mechanisms for lifting and moving goods, such as cranes used in ports and warehouse terminals, as well as lifting installations operating on mine shafts of small and medium productivity in the mining industry, and controlling the position of cargo during movement, are equipped with asynchronous motors with a phase rotor. To improve the control properties of electric drives of this type, controlled thyristor current regulators are used in combination with by adjusting the resistance in the rotor circuit. This approach provides a more accurate and smooth change in the torque on the motor shaft, depending on the required motion algorithm.

Aim of research

Investigation of processes in an alternating current drive with a thyristor current regulators, when a rheostat is connected to the rotor circuit of an asynchronous drive.

Research methods

A mathematical model has been developed that makes it possible to generate a stepwise varying signal of a given acceleration during start-up and deceleration with a duration of the first stage equal to half the period of natural oscillations of the system.

Results

The integration of the rheostat into the rotary circuit of an asynchronous motor controlled by a thyristor current regulator is determined by the need to limit current surges and motor heating. The presence of a rheostat, switched during start and braking, allows us to consider the control of an asynchronous drive with a thyristor current regulator in the rotor circuit by heating close to rheostatic control. The use of a turbofan rotor makes it possible to significantly improve the adjusting properties of an asynchronous electric drive with elastic links for dynamic loads and makes it possible to create high-precision positional control systems based on it.

Keywords

asynchronous electric drive, thyristor current regulator, elastic link, dynamic load, rotary circuit, control signal, positional control, motor mode, dynamic braking, mechanical characteristic, stiffness coefficient

For citation: Shabo K., Lyapushkin S. V. Optimizatsiya dinameskikh rezhimov asinkhronnogo pozitsionnogo elektroprivoda s tiristornym regulyatorom toka rotora [Optimization of Dynamic Modes of an Asynchronous Positional Electric Drive with a Thyristor Rotor Current Regulator]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 50-58 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-50-58>.

Функциональная схема системы позиционного управления электропривода с тиристорным регулятором тока ротора

Применение тиристорных регуляторов тока (ТРТ) в релейно-контактных схемах управления позволяет плавно менять эквивалентное сопротивление роторной цепи и, следовательно, использовать замкнутую систему управления, принципиально не отличающуюся от системы управления приводом постоянного тока [1].

Управляющий сигнал, пропорциональный заданному закону изменения скорости, формируется в задающей модели (рисунок 1) [2]. Воздействие – сигналом действительной скорости $U_{с,д}$, а разность ΔU подается на регулятор скорости РС, выход которого является входным воздействием регулятора тока РТ.

Основным воздействием на силовую часть привода является выходное напряжение регулятора тока U_{y1} , подаваемое

на вход регулируемого усилителя мощности (РУМ), в который входят пороговый элемент НЭ1, устройства управления тиристорами (УУТ) и устройства управления роторными сопротивлениями (УУРС) и тиристорный коммутатор (ТК). С помощью УУТ обеспечивается изменение углов отпирания тиристоров пропорционально U_{y1} . Когда при полностью открытых тиристорах U_{y1} превысит порог срабатывания НЭ1, то появится сигнал U_{y2} , под действием которого отключится очередная ступень роторных сопротивлений с одновременным уменьшением углов управления тиристорами. Если происходит ускорение системы (U_c увеличивается во времени), то сигнал U_{y1} в пределах каждой ступени сопротивлений будет возрастать от нуля до максимального значения, при котором тиристоры полностью открываются, и переключается следующая ступень. Так как в асинхронном приводе максимальная скорость зависит от нагрузки, то при

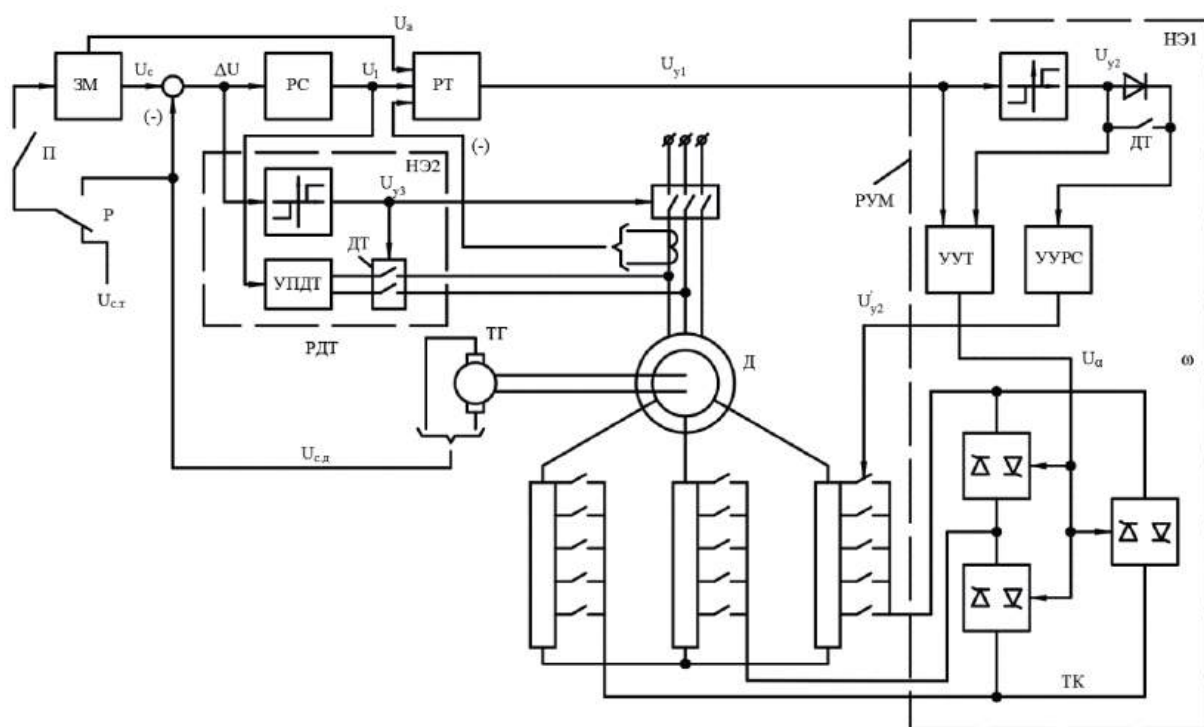


Рисунок 1. Функциональная схема системы позиционного управления с задающей моделью

Figure 1. Functional diagram of a position control system with a master model

замыкании контактов, заворачивающих ротор, задающий сигнал $U_{c,т}$, пропорциональный синхронной скорости двигателя, снимается с помощью реле (Р) со входа задающей модели, и вместо него подается сигнал действительной скорости $U_{c,д}$. Поэтому в установившемся режиме работы двигателя на естественной характеристике всегда $U_c = U_{c,д}$ и $\Delta U = 0$.

Замедление может быть осуществлено в двигательном режиме или в режиме динамического торможения. Для начала замедления необходимо разомкнуть контакт П, после чего сигнал начнет уменьшаться по определенному закону. Если при $\Delta U = U_c - U_{c,д} < 0$ превысится порог срабатывания нелинейного элемента НЭ2 регулятора динамического торможения, регулирование будет осуществляться изменением тока возбуждения с помощью управляемого преобразователя динамического торможения УПДТ и изменением сопротивления в роторной цепи. При $\Delta U \geq 0$ произойдет двигательное замедление. В обоих случаях заданный режим обеспечивается регуляторами РС и РТ. Вместо обратной связи по току статора (ротора) можно использовать связь по ускорению.

Особенностью данной системы является зависимость жесткости механической характеристики двигателя от угла управления тиристорами коммутатора ТК.

Оптимизация динамических свойств позиционной системы асинхронного электропривода

Внедрение ТРТ открывает возможности для применения задающих моделей, которые позволяют оптимизировать динамические режимы электропривода не только в двигательном режиме, но и в широко используемом режиме динамического торможения, который осуществляется путем подачи постоянного тока

в обмотки статора. При этом жесткость механических характеристик двигателя в процессе динамического торможения регулируется как изменением эквивалентного сопротивления роторной цепи, так и величиной подводимого постоянного тока к статору. Во втором случае происходит изменение не только коэффициента жесткости механической характеристики, но и значения критического момента, что расширяет возможности управления процессом торможения и позволяет достичь более высокой точности регулирования.

Таким образом, при моделировании системы управления электроприводом с применением ТРТ и регулируемым динамическим торможением следует рассматривать воздействие устройства динамического торможения на систему привода в виде блока перемножения на выходе нелинейного элемента, который ограничивает критический момент двигателя (рисунок 2) [3]. Значение сигнала Z может варьироваться от 1, что соответствует максимально допустимому току динамического торможения, до 0, когда напряжение постоянного тока отключено от обмоток статора, что позволяет плавно регулировать режим торможения в зависимости от конкретных условий работы привода и требуемых параметров замедления для обеспечения оптимальной работы системы.

Существует целый ряд высокотехнологичных устройств, выполняющих специализированные функции в составе современных систем управления электроприводами [4]. В рассматриваемом случае речь идет о двух логических устройствах с условными обозначениями ЛУ1 и ЛУ2, предназначенных для решения задач, связанных соответственно с переключением роторных сопротивлений и регулированием режима динамического торможения. Эти устройства играют ключевую роль в обе-

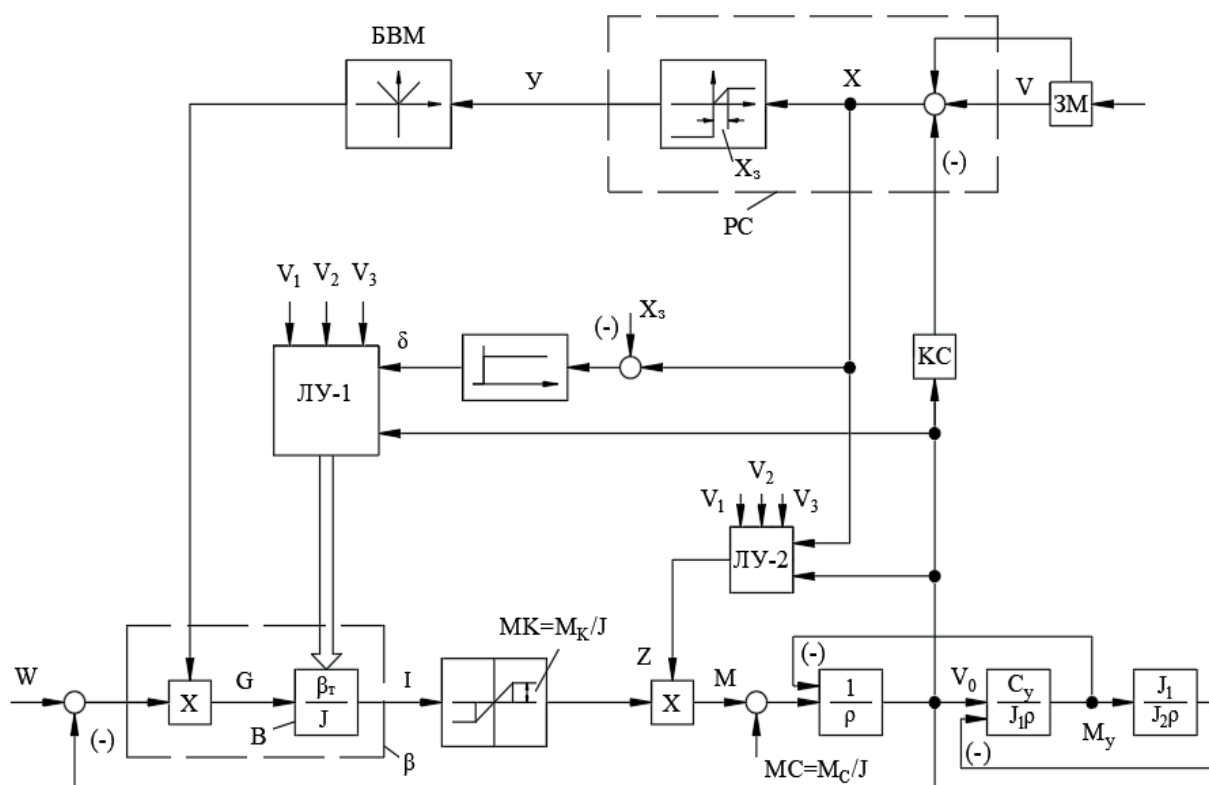


Рисунок 2. Структурная схема модели системы управления асинхронным электропривод с упругим звеном

Figure 2. Block diagram of a control system model for an asynchronous electric drive with an elastic link

спечении плавного и контролируемого перехода от двигательного режима работы электропривода к тормозному режиму и обратно посредством изменения значений управляющих сигналов W , Z и Y . В двигательном режиме W пропорционально синхронной скорости двигателя, $Z = 1$, $Y = 0 \dots 1$. При динамическом торможении $W = 0$, $Z = 0 \dots 1$, $Y = 1$ (тиристоры ТРТ в тормозном режиме полностью открыты). Приведенная структурная схема модели системы управления соответствует асинхронному электроприводу с одним упругим звеном с коэффициентом жесткости C_y .

Выбор режима функционирования привода, то есть двигательного или тормозного, определяется знаком и величиной ошибки x , которая представляет собой разность между сигналом заданной скорости V и сигналом действитель-

ной скорости $K_c V_0$. Сигнал заданной скорости V прием изменяющимся по сложному закону с участком движения на пониженной скорости в начале цикла (V_n) и перед остановкой (V_k). Соответствующие отрезки пути обозначены S_n и S_k (рисунок 3, а).

Для обеспечения плавного и стабильного процесса разгона и торможения электропривода используется ступенчатое изменение сигнала заданного ускорения a_1 , реализуемое с использованием задающей модели 3М2, дополненной специальным логическим устройством. Выбор времени t_1 , равного половине периода собственных колебаний упругой системы привода, способствует минимизации механических колебаний в процессе работы, что обеспечивает более стабильную и точную работу системы электропривода в целом [5].

Чтобы обеспечить работу позиционного привода при любых заданных перемещениях S_T , определим граничные перемещения S_T , которые помогут найти оптимальные скорости $V_T < V_{T.o}$. Рассмотрим площадь S_1 диаграммы $V(t)$ без участков S_H и S_K :

$$S_1 = S_T - S_H - S_K. \quad (1)$$

Если $S_1 < 0$, то в диаграмме $V(t)$ не будет периодов с ускорениями $a_T/2$ и a_T .

При $V_T \neq V_K$ нужно рассмотреть следующие возможные диаграммы для определения граничных перемещений:

1. сигнал V достигает ограничиваемого значения $V_{T.o}$ (рисунок 4, а);
2. $V_T = V_H + 2V_a$ (рисунок 4, б);
3. $V_T = V_K + 2V_a$ (рисунок 4, с),

Изменение сигнала максимальной скорости V_T определим, используя диаграмму, показанную на рисунке 4, а,

в диапазоне $V_H + 2V_a \leq V_T \leq V_{T.o}$, где $V_a = 0,5a_T t_1$.

Из рисунка 4, где показаны граничные диаграммы для случая $V_H > V_K$, первое граничное перемещение:

$$\begin{aligned} S_{\Gamma 1} = & \frac{(V_H + V_a)^2 - V_H^2}{a_T} + \\ & + \frac{(V_{T.o} - V_a)^2 - (V_H + V_a)^2}{2a_T} + \\ & + \frac{V_{T.o}^2 - (V_{T.o} - V_a)^2}{a_T} + \\ & + \frac{(V_{T.o} - V)^2 - (V_K + V_a)^2}{a_T} + \\ & + \frac{(V_K + V_a)^2 - V_K^2}{a_T}, \end{aligned} \quad (1)$$

а после упрощения

$$S_{\Gamma 1} = \frac{2(V_{T.o} + V_a)^2 - (V_H - V_a)^2 - (V_K - V_a)^2}{2a_T}. \quad (2)$$

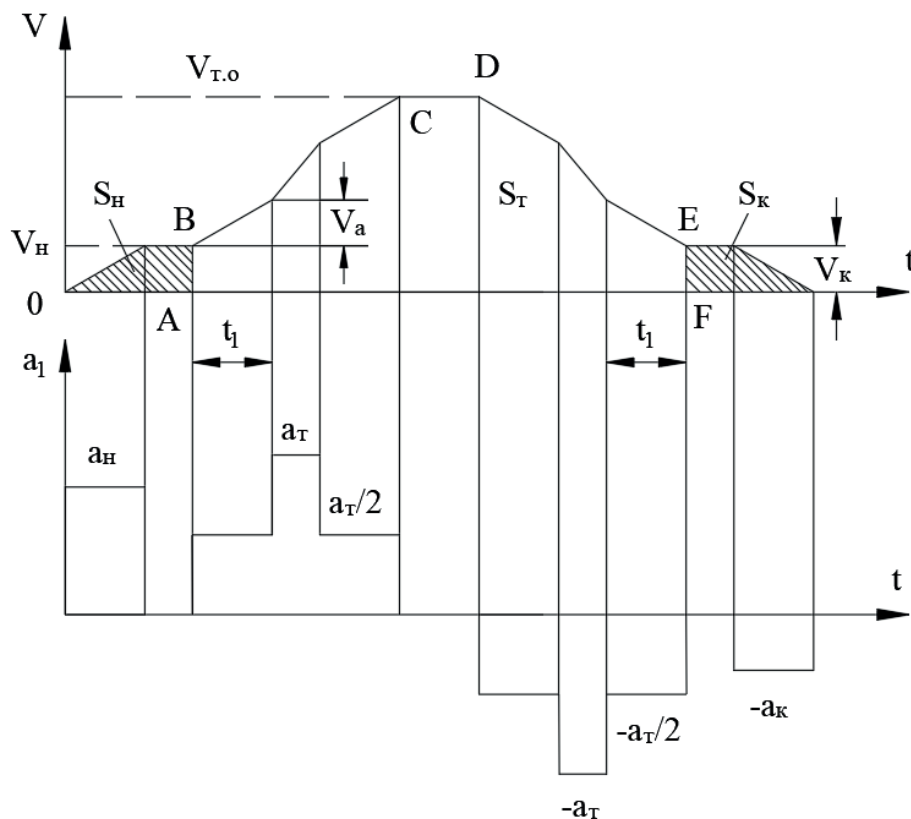
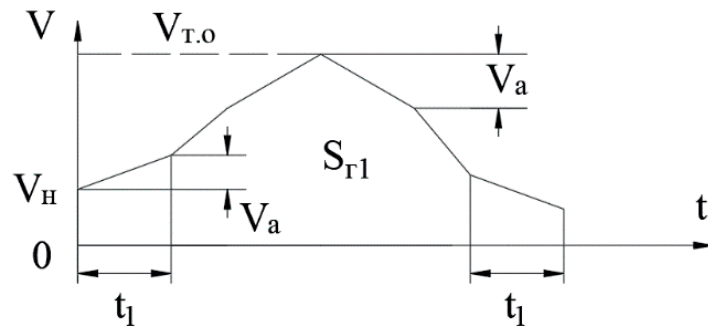
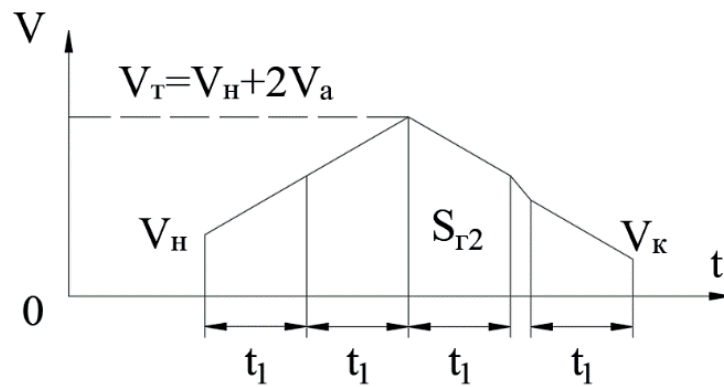


Рисунок 3. Графики зависимости перемещения $S(t)$, скорости $V(t)$ и ускорения $a(t)$

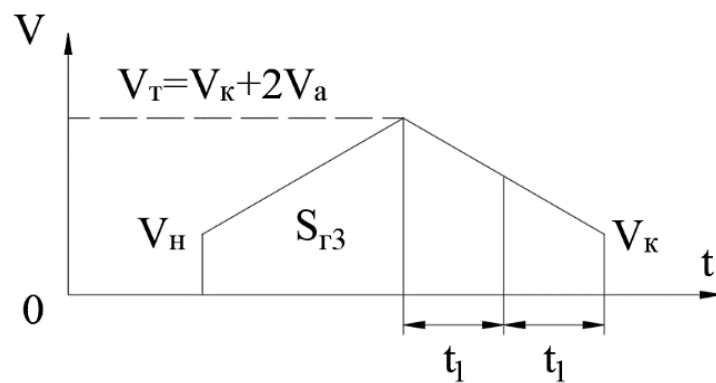
Figure 3. Graphs of displacement dependency $S(t)$, speed $V(t)$ and acceleration $a(t)$



a)



b)



c)

a) сигнал V достигает $V_{T.o}$; b) $V_T = V_H + 2V_a$; c) $V_T = V_K + 2V_a$

a) signal V reaches $V_{T.o}$; b) $V_T = V_H + 2V_a$; c) $V_T = V_K + 2V_a$

Рисунок 4. Диаграмма граничных перемещений

Figure 4. Boundary displacement diagram

Аналогично находим $S_{Г2}$ и $S_{Г3}$:

$$S_{Г2} = \frac{(2V_a + V_H)^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{(2V_a + V_H)^2 - (V_a + V_H)^2}{a_T} +$$

$$+ \frac{(V_a + V_H)^2 - (V_a + V_K)^2}{2a_T} + \frac{(V_a + V_K)^2 - V_K^2}{a_T},$$

$$S_{Г2} = \frac{16V_a(V_a + V_H) + (V_H - V_a)^2 - (V_K - V_a)^2}{2a_T}, \quad (3)$$

$$S_{Г2} = \frac{(2V_a + V_K)^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{(2V_a + V_K)^2 - V_K^2}{a_T} =$$

$$= \frac{2(2V_a + V_K)^2 - V_H^2 - V_K^2}{a_T}. \quad (4)$$

В случае $V_H = V_K = 0$ получим $S_{Г1} = \frac{V_{T,0}(V_{T,0} + 2V_a)}{a_T}$, $S_{Г2} = S_{Г3} = \frac{8V_a^2}{a_T}$.

Величина V_T определяется из выражения (2) подстановкой $V_{T,0} = V_T$ и $S_{Г1} = S_1$, т.е. в результате решения:

$$V_T^2 + 2V_TV_a - 0,5(V_H^2 - 2V_HV_a) -$$

$$- 0,5(V_K^2 - 2V_KV_a) - a_TS_1 = 0,$$

откуда

$$V_T = \sqrt{V_a^2 + a_TS_1 + 0,5(V_H^2 + V_K^2) - V_a(V_H + V_K) - V_a}. \quad (5)$$

По диаграмме на рисунке 4, *b* находим V_T в области $V_H + 2V_a > V_T > V_K + 2V_a$, для чего обозначим сигнал максимальной скорости $V_{T,0}$ через V_T , примем $S_{Г2} = S_1$ и запишем равенство

$$S_1 = \frac{V_T^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{V_T^2 - (V_T - V_a)^2}{a_T} +$$

$$+ \frac{(V_T - V_a)^2 - (V_K + V_a)^2}{2a_T} + \frac{(V_K + V_a)^2 - V_K^2}{a_T} =$$

$$= \frac{3V_T^2 + 2V_TV_a - V_K^2 - 2V_H^2 + 2V_KV_a}{2a_T},$$

из которого получим:

$$V_m = \sqrt{\frac{1}{9}V_a^2 + \frac{2a_TS_1 + V_K^2 + 2V_H^2 - 2V_KV_a}{3}} - \frac{1}{3}V_a. \quad (6)$$

Если максимальная скорость находится в пределах $V_H < V_T \leq V_K + 2V_a$, то согласно диаграмме на рисунке 4, *c*:

$$S_1 = \frac{V_T^2 - V_H^2}{a_T} + \frac{V_T^2 - V_K^2}{a_T},$$

откуда

$$V_m = \sqrt{0,5(a_TS_1 + V_K^2 + V_H^2)}. \quad (7)$$

В случае, когда конечная скорость превышает начальную скорость V_K (условие $V_K > V_H$ выполняется), граничные перемещения S_1 и сигналы максимальной скорости V_T также определяются с использованием формул (2)–(7). Для этого необходимо лишь поменять местами индексы «н» и «к» в символьных обозначениях скоростей V . Полученные в результате аналитические зависимости обеспечивают формирование задающих воздействий S' (перемещение), V (скорость) и a_1 (ускорение) до того момента, когда разница между заданным перемещением S_m и его текущим значением S превышает значение S_K . Если выполняется условие $S_T - S < S_K$, то в начальный период времени сигнал V будет принимать значение V_K , а в конечный период сигнал ошибки ΔS должен поддерживаться близким к нулевому значению в соответствии с уравнением:

$$\Delta S = S_T - S - V^2/(2a_K) \approx 0. \quad (8)$$

Если разность ΔS положительна и разность $V_K - V$ также положительна, то сигнал скорости V должен увеличиваться с ускорением $a_1 = a_K$. В противоположном случае, когда $V_K - V$ отрицательна, скорость V будет уменьшаться с ускорением (или, точнее, замедлением) $a_1 = -a_K$.

В конце рабочего цикла на второй интегратор подается корректирующий сигнал $U_K = \Delta S_1 K_0$ при $\Delta S_1 = S_T - S < 0$.

Выводы

Из результатов моделирования видно, что ступенчатое изменение ускорения приводит к существенному снижению момента, возникающего в упругом звене. При этом время цикла уменьшается незначительно и может оставаться прежним при некотором увеличении максимального значения ускорения [6].

В данной системе полное исключение колебаний не достигнуто по той причине, что происходит при определенных

скоростях ступенчатое изменение коэффициента жесткости предельной механической характеристики. При непрерывном плавном регулировании, которое

имеет место в частотно регулируемых приводах переменного тока, колебательные процессы практически могут быть полностью исключены.

Список источников

1. Гудзь Ю.В., Чермалых А.В. Двухканальная система управления асинхронным электроприводом подъемно-транспортных установок // Изв. вузов. Горный журнал. 1983. № 1. С. 103–107.

2. Чермалых Т.В., Мадхи Халед, Шабо Камил. Системы оптимального управления позиционным тиристорным электроприводом с многоканальной задающей моделью. Киев, 1994. 49 с.

3. Чермалых В.М., Афанасьев Ю.А., Чермалых Т.В. Построение адаптивных систем позиционного управления электроприводами машин и установок // Изв. вузов. Горный журнал. 1992. № 10. С. 73–77.

4. Глазырин А.С., Полищук В.И., Тимошкин В.В., Баннов Д.М., Исаев Ю.Н., Антяскин Д.И., Кладиев С.Н., Филипас А.А., Ланграф С.В., Котин Д.А., Ковалев В.З. Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 10. С. 213–227. EDN: SOILSV. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3404.

5. Никитенко Г.В. Электропривод производственных механизмов. СПб.: Лань, 2022. 208 с. ISBN 978-5-8114-1468-0.

6. Вульфсон И.И., Шарапин И.А., Преображенская М.В. Расчет колебаний привода машины: учеб. пособие. СПб.: ФГБОУ ВПО «СПГУТД», 2013. 180 с. ISBN 978-5-7937-0817-0.

References

1. Gudz' Yu.V., Chermalykh A.V. Dvukhkanal'naya sistema upravleniya asinkhronnym elektropriivodom pod'emno-transportnykh ustanovok [Two-Channel Control System for Asynchronous Electric Drive of Hoisting and Transport Installations]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal*

– *Proceedings of the Universities. Mining Journal*, 1983, No. 1, pp. 103–107. [in Russian].

2. Chermalykh T.V., Madkhi Khaled, Shabo Kamil. *Sistemy optimal'nogo upravleniya pozitsionnym tiristornym elektropriivodom s mnogokanal'noi zadayushchei model'yu* [Optimal Control Systems of Positional Thyristor Electric Drive with a Multi-Channel Defining Model]. Kiev, 1994. 49 p. [in Russian].

3. Chermalykh V.M., Afanas'ev Yu.A., Chermalykh T.V. Postroenie adaptivnykh sistem pozitsionnogo upravleniya elektropriivodami mashin i ustanovok [Construction of Adaptive Positional Control Systems of Electric Machines and Plants]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal – Proceedings of the Universities. Mining Journal*, 1992, No. 10, pp. 73–77. [in Russian].

4. Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V., Bannov D.M., Isaev Yu.N., Antyaskin D.I., Kladiev S.N., Filipas A.A., Langraf S.V., Kotin D.A., Kovalev V.Z. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya v mul'tifaznoi sisteme koordinat pri nesimmetrii rotornykh tsepei [Modeling of Induction Motor in Multiphase Coordinate System for Asymmetry Rotor Cage]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, No. 10, pp. 213–227. EDN: SOILSV. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3404. [in Russian].

5. Nikitenko G.V. *Elektropriivod proizvodstvennykh mekhanizmov* [Electric Drive of Production Mechanisms]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2022. 208 p. ISBN 978-5-8114-1468-0. [in Russian].

6. Vul'fson I.I., Sharapin I.A., Preobrazhenskaya M.V. *Raschet kolebanii privoda mashiny: ucheb. posobie* [Calculation of Machine Drive Oscillations: Training Manual]. Saint-Petersburg, FGBOU VPO «SPGUTD», 2013. 180 p. ISBN 978-5-7937-0817-0. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 02.10.2024; одобрена после рецензирования 09.10.2024; принята к публикации 24.10.2024.

The article was submitted 02.10.2024; approved after reviewing 09.10.2024; accepted for publication 24.10.2024.

Научная статья

УДК 621.3

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-59-72

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО- ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

**Фанис Фанилович Сираев****Fanis F. Siraev**

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

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

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

Актуальность

Совершенствование обслуживания промышленных объектов, обеспечение эффективности и надежности работы всех структур предприятия, а также экономия электроэнергии являются насущными проблемами линейных производственно-диспетчерских станций, что свидетельствует о важности модернизации устаревшего оборудования производства.

Цель исследования

В данной статье осуществляется проектирование частотно-регулируемого электропривода с ПИД-регулированием магистрального насосного агрегата для повышения его энергоэффективности, а также для снижения периодичности внеплановых ремонтов.

Методы исследования

Проектирование частотно-регулируемого электропривода с ПИД-регулятором синхронного двигателя осуществляется в пакете MATLAB/Simulink. Характерной особенностью компьютерной модели является возможность правильной настройки ПИД-регулятора, что снижает ошибку рассогласования, связанную с меняющимся давлением в магистральном насосном агрегате, в результате чего на ключи трехфазного автономного инвертора подаются более точные управляющие сигналы.

Результаты

Авторами рассматривается возможность внедрения частотно-регулируемого электропривода с ПИД-регулированием. Выполнено

Ключевые слова

частотно-регулируемый
электропривод,
синхронный двигатель,
насосный агрегат,
энергоэффективность,
ПИД-регулирование

математическое и компьютерное моделирование электропривода насосного агрегата, приводимого в движение посредством синхронного электродвигателя, который обладает значительными преимуществами.

В результате моделирования были получены диаграммы параметров составляющих элементов системы. Проанализировав диаграммы, можно судить о возможности работы частотно-регулируемого привода синхронного электродвигателя, так как данный метод управления синхронным электродвигателем является наиболее эффективным.

Для цитирования: Сираев Ф. Ф., Хазиева Р. Т. Проектирование частотно-регулируемого электропривода с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором для магистрального насосного агрегата // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 59-72. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-59-72>.

Original article

DESIGN OF A VARIABLE FREQUENCY DRIVE WITH A PROPORTIONAL-INTEGRAL-DIFFERENTIAL CONTROLLER FOR A MAIN PUMP UNIT

Relevance

Improving the service of industrial facilities, ensuring the efficiency and reliability of all enterprise structures, as well as saving energy are pressing problems of line operation dispatcher stations, which indicates the importance of modernizing obsolete production equipment.

Aim of research

In this paper the design of frequency-controlled electric drive with PID control of the main pump unit is carried out to increase its energy efficiency, as well as to reduce the frequency of unscheduled repairs.

Research methods

Design of variable frequency drive with PID-controller of synchronous motor is carried out in MATLAB/Simulink package. A characteristic feature of the computer model is the possibility of correct adjustment of the PID controller, which reduces the mismatch error associated with varying pressure in the main pump unit, resulting in more accurate control signals to the keys of the three-phase stand-alone inverter.

Results

The authors consider the possibility of implementing a frequency-controlled electric drive with PID control. Mathematical and computer modeling of the electric drive of a pump unit driven by a synchronous electric motor, which has significant advantages, has been performed.

As a result of the modeling, diagrams of the parameters of the system's constituent elements were obtained. Having analyzed the diagrams, one can judge the possibility of operating a frequency-controlled drive of a synchronous electric motor, since this method of controlling a synchronous electric motor is the most effective.

Keywords

variable frequency drive, synchronous motor, pump unit, energy efficiency, PID control

For citation: Siraev F. F., Khazieva R. T. *Proyektirovaniye chastotno-reguliruyemogo elektroprivoda s proporsional'no-integral'no-differentsial'nym regul'yatorom dlya magistral'nogo nasosnogo agregata* [Design of a Variable Frequency Drive with a Proportional-Integral-Differential Controller for a Main Pump Unit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 59-72 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-59-72>.

Введение

В настоящее время нефтяная промышленность потребляет значительную часть электроэнергии, вырабатываемой в стране. На каждом предприятии нефтяной и газовой промышленности в работе находится большое количество электрооборудования, непрерывная работа которого является одной из основных задач нефтяных и газовых предприятий. Вместе с тем, бесперебойная работа предприятий обеспечивает эффективное функционирование организации, способствует развитию экономики страны. Рациональное использование ресурсов также является важной составляющей в достижении поставленных целей на предприятиях [1].

Большая половина энергии, поступающей на нефтегазовые станции, потребляется электроприводами [2, 3]. Именно они повсеместно используются в целях экономии электроэнергии.

Насущными проблемами для объектов линейной производственно-диспетчерской станции (ЛПДС) остаются: совершенствование обслуживания про-

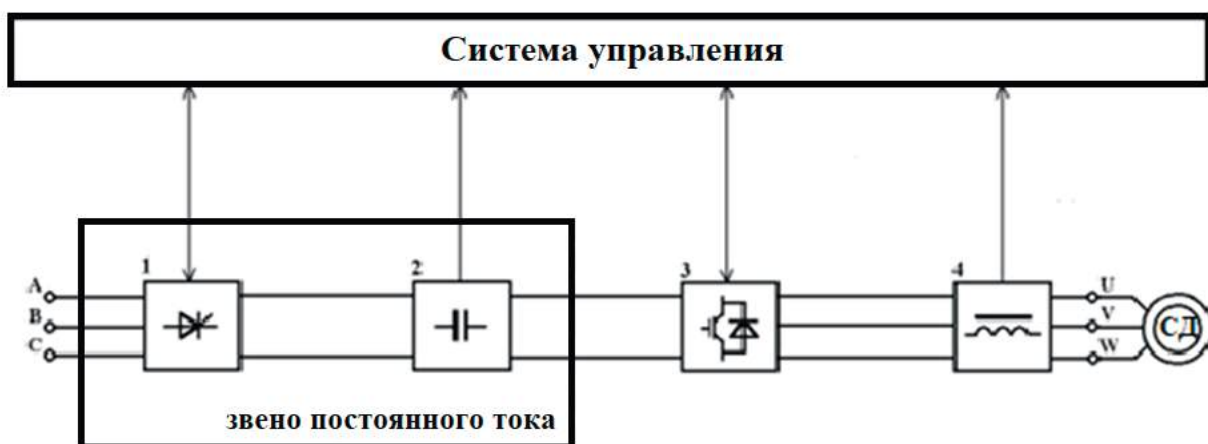
мышленных объектов, обеспечение эффективности и надежности работы всех структур предприятия, а также экономия электроэнергии. Именно поэтому так важна модернизация устаревшего оборудования производства.

Принцип работы частотно-регулируемого электропривода

Частотно-регулируемый электропривод — это устройство автоматического управления, которое позволяет изменять скорость вращения ротора электродвигателя путем изменения частоты питающего напряжения. Благодаря этому он может использоваться для регулирования давления насосного агрегата и точной настройки расхода нефти [4, 5].

Элементная база частотно-регулируемого привода (ЧРП) изображена на рисунке 1.

Управление ЧРП осуществляется либо изменяемыми параметрами процесса, которые контролируются датчиками, либо внешней системой управления, которая собирает информацию о



A, B, C — питающая сеть; 1 — вход выпрямителя; 2 — фильтр; 3 — инвертор тока; 4 — высокочастотный фильтр; СД — электродвигатель

A, B, C — supply network; 1 — rectifier input; 2 — filter; 3 — current inverter; 4 — high-frequency filter; СД — electric motor

Рисунок 1. Структурная схема частотно-регулируемого электропривода

Figure 1. Structural diagram of frequency-controlled electric drive

совокупности параметров в технологической системе и подает управляющий сигнал в систему управления приводом [6, 7].

Существуют три типа современных высоковольтных статических преобразователей частоты, применяемых для регулирования скорости синхронных двигателей и имеющих различные характеристики выходного сигнала. В контексте использования преобразователя частоты для электропривода синхронного двигателя, где инвертор выполняет функцию источника регулируемых напряжения и частоты, наиболее подходящим является автономный инвертор напряжения [8, 9].

Расчет и выбор оборудования частотно-регулируемого электропривода магистрального насосного агрегата

В составе частотно-регулируемого электропривода выбор и согласование параметров преобразователя частоты (ПЧ) и синхронного двигателя является главным вопросом. Для выбора преобразователя частоты нужно учитывать следующие параметры [10, 11]:

- управление одним двигателем или группой, их мощности;
- тип двигателя;
- степень взрывозащищенности двигателя;
- число скоростей двигателя.

Для работы единственного ПЧ с одним двигателем:

- номинальная мощность ПЧ больше или равна номинальной мощности двигателя, т.е.

$$P_{\text{ПЧ}} \geq 1250 \text{ кВт}; \quad (1)$$

- номинальный длительный ток ПЧ принимают большим или равным фактическому значению длительного тока, потребляемого двигателем, т.е.

$$I_{\text{ПЧ}} \geq 138,35 \text{ А}. \quad (2)$$

С большей точностью расчеты осуществляются по формуле, представленной ниже:

$$I_{\text{потр.}} = \frac{k \cdot n \cdot M}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}}, \quad (3)$$

$$I_{\text{ПЧ}} \geq 93,81 \text{ А},$$

где k — коэффициент, характеризующий искажение тока, связанное с формированием синусоиды тока с помощью ШИМ. В упрощенном виде можно принять его равным 1;

n — частота вращения вала двигателя, об/мин;

M — момент нагрузки на валу двигателя, Нм;

9,55 — коэффициент приведения внесистемных (по отношению к принятым в системе СИ) единиц;

η — коэффициент полезного действия (КПД) двигателя;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности;

U — напряжение питающей сети, В.

Во время работы единственного ПЧ с несколькими двигателями, выбор ПЧ может осуществляться согласно следующим неравенствам:

$$S \cdot \left[1 + \frac{N_0}{N} \cdot (k_s - 1) \right] \leq 1,5 \cdot S_{\text{ПЧ}}, \quad (4)$$

$$N \cdot I_{\text{ном.}} \cdot \left[1 + \frac{N_0}{N} \cdot (k_s - 1) \right] \leq 1,5 \cdot I_{\text{ПЧ}}, \quad (5)$$

где N — число двигателей, подсоединенных параллельно к одному ПЧ, шт.;

N_0 — число одновременно работающих двигателей, шт.;

k_s — коэффициент кратности пускового момента $\frac{M_{\text{пуск.}}}{M_{\text{ном.}}}$;

S — полная номинальная мощность двигателя по паспорту, кВА;

$I_{\text{ном.}}$ — номинальный ток двигателя согласно паспорту, А.

Были рассмотрены три вида преобразователей частоты, информация о которых представлена в таблице 1 [12–14].

Таблица 1. Технические характеристики рассмотренных преобразователей**Table 1.** Technical characteristics of the considered transducers

Характеристика	Единица измерения	Значение			
		STV1200	VD-P1250U1F5	ЭСН	СТА
Диапазон регулирования выходной частоты	Гц	0–120	0,5–50	0–60	0,5–60
Входное напряжение	кВ	6000	6000	6000	6000
Выходной ток	А	154	130	100	130
Номинальная выходная мощность	кВт	0–8000	100–6000	250–6000	400–8000
Коэффициент мощности преобразователя на входе	о.е.	0,97	0,96	0,96	0,96
Перегрузочная способность	%	120–200	120–250	120–150	110–200
КПД	%	96	96	97	98

Проанализировав силовые схемы и технические характеристики ПЧ, выявлено, что наиболее подходящим является ВПЧ СТА-B9.HVI от ЗАО «Стройтех-автоматика» (г. Воронеж) (таблица 2) [15]. Существенным плюсом является то, что преобразователь отечественного производства, а, значит, проблем с покупкой составляющих элементов в случае неисправностей не возникнет [16, 17].

Возможность создания автоматизированной системы регулирования для магистрального насосного агрегата является еще одним преимуществом выбранного преобразователя СТА-B9.HVI благодаря встроенному ПИД-регулятору

[18, 19]. Это позволяет провести расчет необходимых рабочих коэффициентов регулятора, которые будут управлять процессом увеличения давления в магистральном трубопроводе с помощью данного насосного агрегата [20, 21].

Моделирование ЧРП с ПИД-регулятором в среде MATLAB/Simulink

Компьютерное моделирование, представленное на рисунке 2, выполнялось с использованием комплект блоков step, на входе в блок СД, который задает параметры ротора: P_m — мощность на валу; V_f — напряжение поля ротора. К обмот-

Таблица 2. Паспортные данные преобразователя частоты СТА-B9.HVI [15]**Table 2.** Passport data of frequency converter СТА-B9.HVI [15]

Параметр	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	кВт	1250
Полная мощность	кВА	1600
Номинальное напряжение питания, кВ	кВ	6
Номинальный ток статора, А	А	130
КПД	%	98
$\cos \varphi$	о.е.	0,96
Диапазон выходной частоты, Гц	Гц	0–60

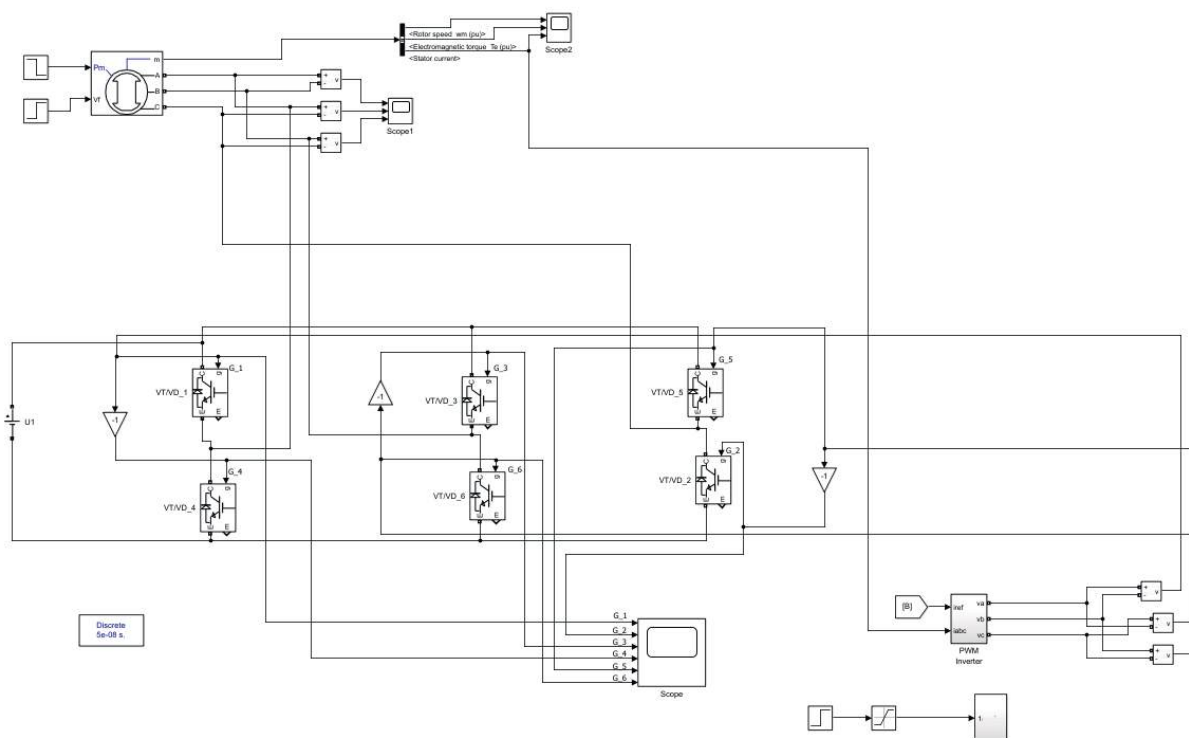


Рисунок 2. Компьютерная модель ЧРП среде MATLAB/Simulink

Figure 2. Computer model of variable frequency drive in MATLAB/Simulink

кам статора подводятся напряжения, снятые с выхода преобразователя частоты, который состоит в данном случае из 6 IGBT транзисторов и 6 обратных диодов, в данной схеме опущены выпрямитель и фильтры с целью избежания излишнего нагромождения схемы, вместо этих элементов — блок источника постоянного тока, параметры в котором введены согласно расчетам напряжения, которое необходимо поддерживать на выходе выпрямителя и фильтров для нормального функционирования системы.

На ключи сигналы подаются с ШИМ-регулятора (рисунок 3), основанного на компараторе, сравнивающем сигналы с блоков ПИД-регулирования и обратной связи с обмоток статора по току. На основе сравнения ШИМ регулятор выдает сигналы неизменяющейся во времени частоты, но с разным периодом следования импульсов в зависимости от соотношения сравниваемых сигналов.

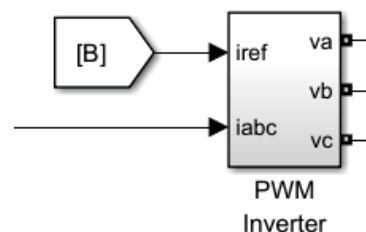


Рисунок 3. Блок ШИМ-регулятора

Figure 3. PWM controller unit

На рисунке 4 изображена подсистема блока ШИМ регулятора. Она состоит из компараторов, установленных для каждой фазы и преобразователей ток — напряжение, таким образом, на выходе из данной системы мы получаем управляющие сигналы (V), которые поступают на ключи инвертора напряжения. Блоки компараторов также имеют подсистемы, которые смоделированы для каждой фазы отдельно.

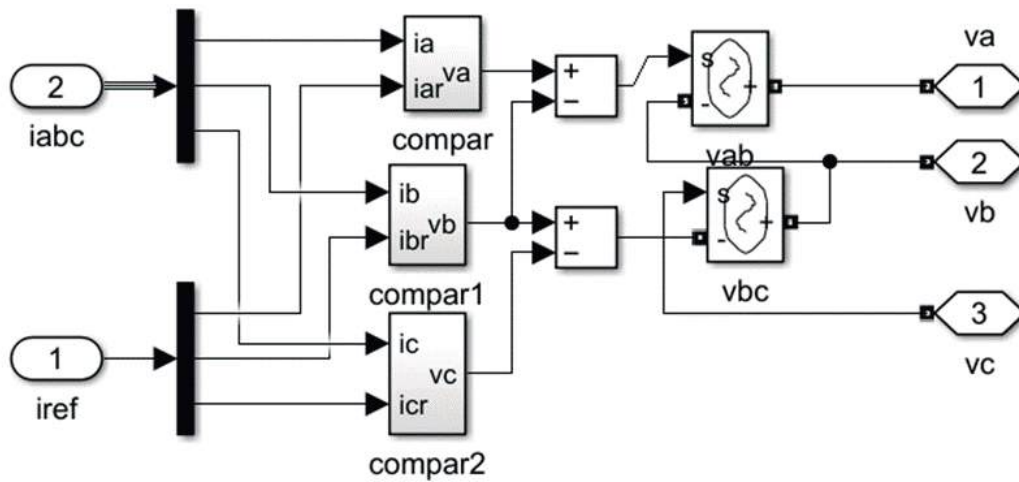


Рисунок 4. Подсистема блока ШИМ регулятора

Figure 4. PWM controller block subsystem

На рисунке 5 изображена подсистема для фазы А. Подсистема имеет блок с функцией, которая преобразует модулирующий сигнал обратной связи по току статора в сигнал, сравнимый с опорным, получаемым после ПИД-регулирования. В результате сравнения сигналов на выходе получаем сигнал высокого или низкого уровня в зависимости от соотношения сравниваемых сигналов. Далее сигналы поступают на блок «Relay», который, в свою очередь, играет роль выключателя: пропускает сигналы, если они входят в диапазон допустимых значений (в нашем случае номинальное значение тока двигателя), и не пропускает, если значения выходят за допустимые пределы.

На рисунке 6 изображены блоки, задающие сигналы, поступающие на ПИД-регулятор.

На рисунке 7 изображена подсистема ПИД-регулирования, где заданы функции: 1-я — осуществляющая преобразование сигнала давления в сигнал тока; 2-я функция является объектом управления, т.е. передаточной функцией, полученной ранее, именно с объекта управления в качестве обратной связи сигнал поступает на сумматор ПИД-регулятора, где происходит устранение ошибки рассогласования между заданным значением давления и текущим.

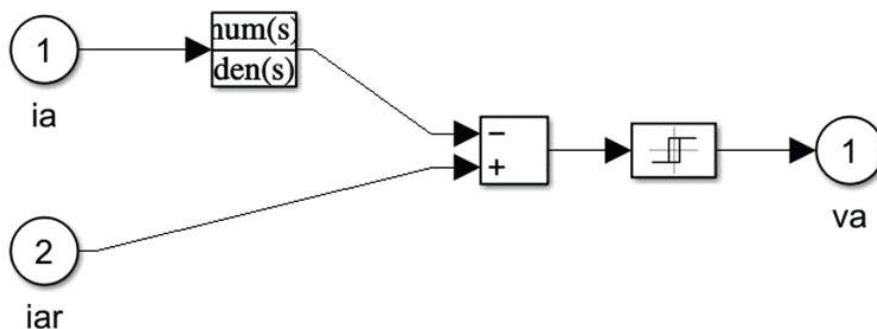


Рисунок 5. Подсистема блока компаратора

Figure 5. Comparator unit subsystem

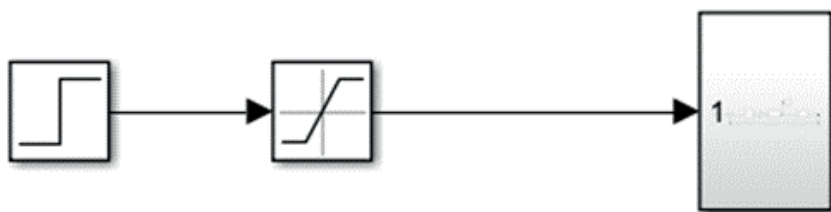


Рисунок 6. Задание параметров на входе ПИД-регулятора

Figure 6. Setting parameters at the PID controller input

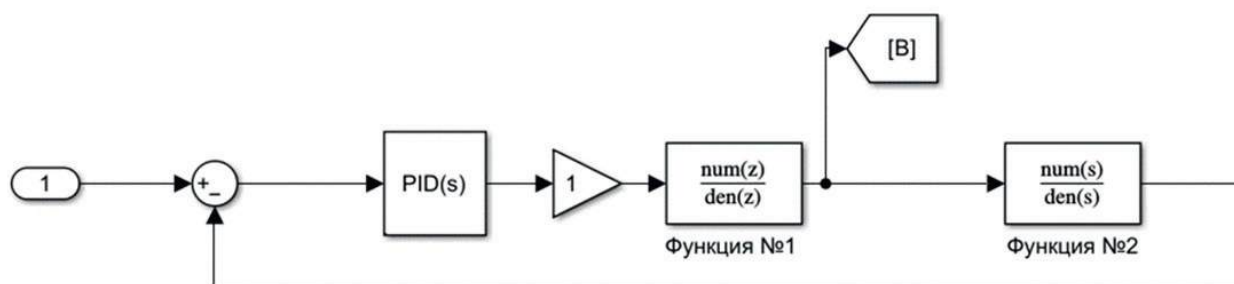


Рисунок 7. Подсистема ПИД-регулятора

Figure 7. PID controller subsystem

Результаты компьютерного моделирования

В результате моделирования получены осциллограммы токов и напряжения электродвигателя.

Зоны проводимости транзисторов одноименной группы сдвинуты относительно друг друга на 120° для формирования симметричной трехфазной системы напряжений на выходе автономного инвертора напряжения.

Осциллограммы, полученные в ходе моделирования, приведены на рисунках 8–12.

Силовая часть трехфазного автономного инвертора напряжения содержит шесть транзисторных ключей $VT1-VT6$ с шестью диодами обратного тока $VD1-VD6$, образующих мостовую схему и присоединенных параллельно к источнику питания.

Сигналы, подаваемые на IGBT транзисторы, также отражены в виде осциллограмм. Кроме того, получены характеристики момента вращения ротора и скорости вращения ротора в виде графиков

зависимости этих параметров от времени.

В режиме, когда сигнал с ПИД-регулятора, в котором устранена ошибка рассогласования между заданными и текущими значениями, передается на ШИМ-регулятор, который, в свою очередь, генерирует ШИМ сигнал управления, на каждое плечо инверторного моста поступают сигналы на верхний и нижний транзисторы с фазовыми сдвигами, чтобы получить трехфазную систему напряжений.

Анализ снижения энергозатрат при применении частотно-регулируемого привода двух электродвигателей

Результаты проведенных расчетов по снижению энергозатрат приведены в таблице 3, они позволяют сделать анализ потребления электроэнергии при управлении давлением на выходе магистрального насосного агрегата с помощью дросселирования и с применением ЧРП. Из сравнительной характеристики сле-

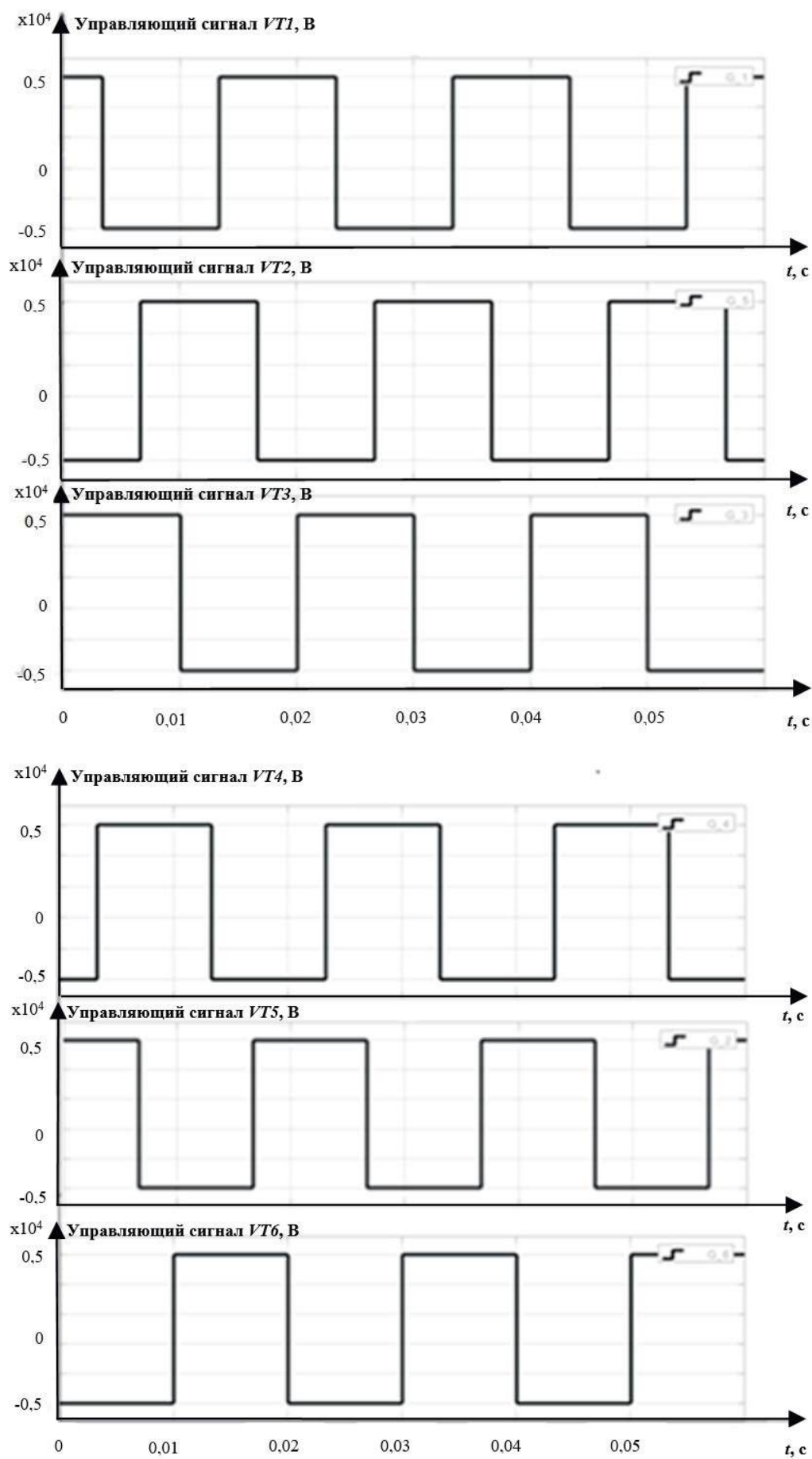


Рисунок 8. Графики сигналов управления, подаваемых на транзисторы VT1–VT6

Figure 8. Graphs of control signals applied to transistors VT1–VT6

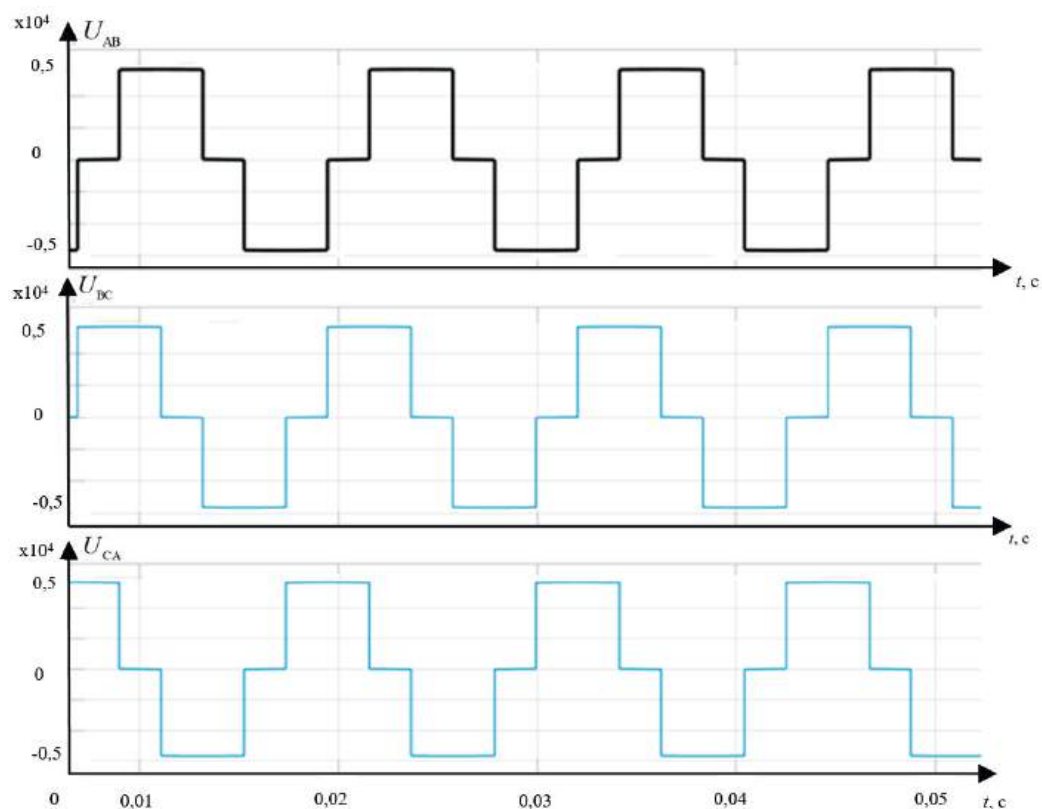


Рисунок 9. Графики напряжений на выходе трехфазного инвертора

Figure 9. Graphs of voltages at the output of three-phase inverter

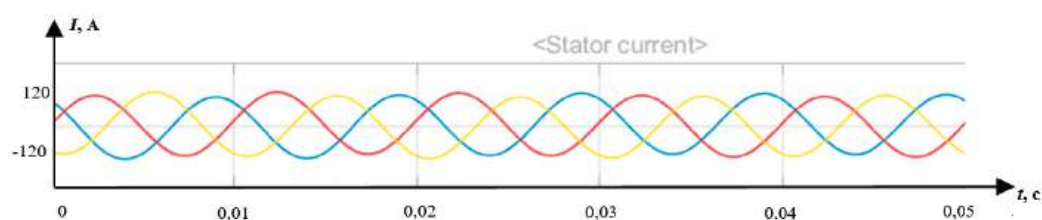


Рисунок 10. Осциллограмма токов в статоре

Figure 10. Oscillogram of currents in the stator

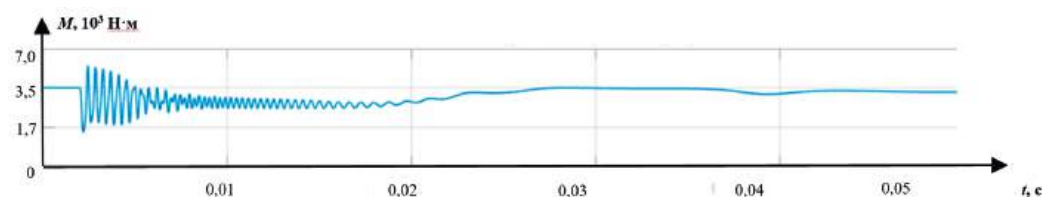


Рисунок 11. График изменения момента на валу с течением времени

Figure 11. Graph of change of torque on the shaft over time

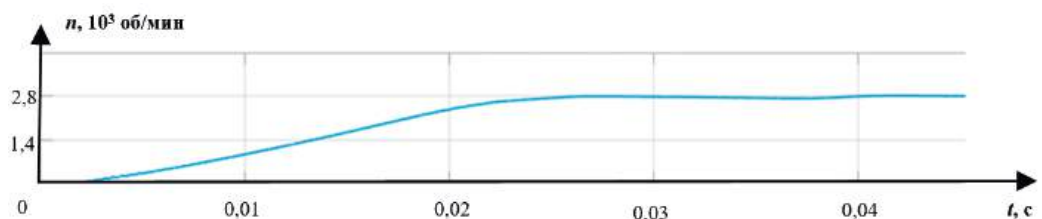


Рисунок 12. График изменения скорости вращения ротора с течением времени

Figure 12. Graph of rotor speed variation with time

дует, что использование частотно-регулируемого привода на магистральных насосах способствует снижению потребления электроэнергии, соответственно, снижает затраты на перекачку [22, 23].

Учитывая, что выбранный преобразователь частоты СТА-B9.HVI имеет стоимость от 4 500 000 руб., рассчитаем, за какое время окупится установка ЧРП:

$$T_{\text{ок.}} = \frac{(1+0,5) \cdot 1 \cdot 4,5}{4,95} = 1,36 \approx 1,4 \text{ года.}$$

Применяя каскадное управление МНА, мы имеем потребность в одном

ПЧ, к которому поочередно будут подключаться насосы при достижении номинальной частоты вращения каждого предыдущего насоса, подключаемого и имеющего управление от преобразователя частоты. Следовательно, можно сделать вывод, что закупка ПЧ окупится в первые 1,4 года (16 мес.) эксплуатации. Два резервных насоса при необходимости также будут подключаться к имеющемуся преобразователю частоты каскадно.

Таблица 3. Сравнительная характеристика параметров МНА с ЧРП и без него

Table 3. Comparative characterization of MNA parameters with and without VFD

Параметр	Единица измерения	МНА без ЧРП	МНА с ЧРП
КПД насосов	%	81,17	89,51
Потребляемая мощность	кВт	809	731
Коэффициент загрузки ЭД	о.е.	0,67	0,69
КПД электродвигателя	%	95	96
Удельные энергозатраты	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$	1,56	1,34
Затраты электроэнергии	$\frac{\text{млн руб.}}{\text{год}}$	59,43	54,48

Выводы

В данной статье предложено решение, а именно, внедрение частотно-регулируемого электропривода с ПИД-регулированием. Для этого произведен выбор преобразователя частоты марки СТА-B9.HVI.

В результате моделирования получены диаграммы параметров составляющих элементов системы. Проанализировав диаграммы, можно судить о возможности работы ЧРП синхронного

электродвигателя, так как искажения выходных характеристик не выявлены.

В результате экономических расчетов установлено, что применение ЧРП действительно является энергоэффективным методом управления синхронным электродвигателем по сравнению с существующими способами электропривода на предприятии, поскольку большие значения имеют как КПД насоса, так и КПД электродвигателя.

Список источников

1. Шпилевой В.А., Тырылгин И.В., Земенков Ю.Д. Альтернативные системы приводов насосных агрегатов для новых магистральных нефтепроводов // Изв. высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 5. С. 75-78. EDN: PEVANL.

2. Мастобаев Б.Н., Руфанова И.М. Эксплуатация насосных станций: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. 135 с. ISBN 5-7831-0308-X.

3. Волков А.В., Парыгин А.Г., Хованов Г.П., Наумов А.В. Повышение эффективности работы центробежных насосов, находящихся в эксплуатации // Новости теплоснабжения. 2010. № 10 (122). URL: http://www.nts.ru/10_2010.html.

4. Лазарев Г.И. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок — эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 41-48. EDN: MVRSXN.
5. Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П. Автоматизированный электропривод с частотным управлением: учебное пособие. Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2020. 121 с. ISBN 978-5-89847-592-5.
6. Ковалев Д.А., Шаряков В.А., Шарякова О.Л. Теория автоматического управления: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2020. 79 с.
7. Пронин А.И., Щелкунов Е.Б. Теория автоматического управления: учебное пособие. 2-е изд., доп. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. 108 с. ISBN 978-5-7765-1132-5.
8. Ильинский Н.Ф. Энергосберегающий электропривод // Энергия. 1999. № 2. С. 24-29.
9. Мустафин М.А., Алмуратова Н.К., Табултаев С.С. Энергосберегающий электропривод центробежных насосов: учеб. пособие. Алматы: АУЭС, 2016. 90 с. ISBN 978-601-7889-09-8.
10. Сокол Е.И., Бару А.Ю., Лукпанов Ж.К. Опыт разработки и внедрения преобразователей частоты для регулируемого электропривода насосных агрегатов МН // Электротехника. 2004. № 7. С. 52-57.
11. Шабанов В.А. Основы методики выбора числа и места установки частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10, № 2. С. 36-39. EDN: RPDCUR.
12. Глотов А.Ф., Вадутов О.С. Система автоматического управления с ПИД-регулятором / Национальный исследовательский ТПУ. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 10 с.
13. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 335 с. ISBN 5-7246-0250-4.
14. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 81 с. EDN: YIBCR.
15. НПО «Стройтехавтоматика». Высоковольтные частотные преобразователи СТА прямого включения серий СТА-В9.HVI (3 кВ, 6 кВ, 10 кВ). Краткое техническое описание устройства [Электронный ресурс]. URL: https://www.gu-sta.ru/download/pdf_chp/sta-b9.hvi.pdf.
16. Васильев Г.Г., Коробков Г.Е., Коршак А.А., Лурье М.В., Писаревский В.М., Прохоров А.Д., Сощенко А.Е., Шаммазов А.М. Трубопроводный транспорт нефти: учебное пособие / Под ред. С.М. Вайнштока. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. Т. 1. 407 с. ISBN 5-8365-0118-1.
17. Kiam Heong Ang, Chong G., Yun Li. PID Control System Analysis, Design, and Technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. No. 13(4). P. 559-576. URL: <https://eprints.gla.ac.uk/3817/1/IEEE3.pdf>.
18. ГОСТ 12124-87. Насосы центробежные нефтяные для магистральных трубопроводов. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1987. 7 с.
19. Саблина Г.В., Маркова В.А. Настройка параметров ПИД-регулятора в системе с объектом второго порядка с запаздыванием // Автометрия. 2022. № 4. Т. 58. С. 110-117. DOI: 10.15372/AUT20220411.
20. Ерилина Т.П., Кинзябулатов У.А. Использование и особенности использования частотно-регулируемого привода // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 8 (24). С. 418-423. EDN: YLZAKD.
21. Быков К.В. Повышение эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов с регулированием частоты вращения насосных агрегатов: дис. канд. техн. наук. М., 2014. 138 с.
22. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Шишков А.Н., Бутаков С.М. Энергосбережение в электроприводе. Челябинск: ЮУрГУ, 2011. 104 с. ISBN: 978-5-696-04148-3. EDN: QMLNBB.
23. Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 2. С. 34-42.

References

1. Shpilevoi V.A., Tyrylgina I.V., Zemenkov Yu.D. Al'ternativnye sistemy privodov nasosnykh agregatov dlya novykh magistral'nykh nefteprovodov [Alternative Systems of Pump Units Drives for a New Oil Pipelines]. *Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz — Oil and Gas Studies*, 2012, No. 5, pp. 75-78. EDN: PEVANL. [in Russian].
2. Mastobaev B.N., RUFANOVA I.M. *Ekspluatatsiya nasosnykh stantsii: uchebnoe posobie* [Operation of Pumping Stations: Manual]. Ufa,

Izd-vo UGNTU, 2000. 135 p. ISBN 5-7831-0308-X. [in Russian].

3. Volkov A.V., Parygin A.G., Khovanov G.P., Naumov A.V. Povyshenie effektivnosti raboty tsentrobezhnykh nasosov, nakhodyashchikhsya v ekspluatatsii [Increasing the Efficiency of Centrifugal Pumps in Operation]. *Novosti teplosnabzheniya — Heat Supply News*, 2010, No. 10 (122). URL: http://www.nts.ru/10_2010.html. [in Russian].

4. Lazarev G.I. Chastotno-reguliruemyyi elektropriwod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok — effektivnaya tekhnologiya energo- i resursosberezheniya na teplovykh elektrostantsiyakh [Frequency-Controlled Electric Drive of the Pump and Fan Installations — an Effective Technology of the Energy and Resource Saving at the Thermal Power Stations]. *Silovaya elektronika — Power Electronics*, 2007, No. 3, pp. 41-48. EDN: MVRSXN. [in Russian].

5. Evsikov A.A., Kokovin V.A., Leonov A.P. *Avtomatizirovannyi elektropriwod s chastotnym upravleniem: uchebnoe posobie* [Automated Electric Drive with the Frequency Control: Textbook]. Dubna, Gos. un-t «Dubna», 2020. 121 p. ISBN 978-5-89847-592-5. [in Russian].

6. Kovalev D.A., Sharyakov V.A., Sharyakova O.L. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie* [Theory of Automatic Control: Textbook]. Saint-Petersburg, 2020. 79 p. [in Russian].

7. Pronin A.I., Shchelkunov E.B. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie* [Theory of Automatic Control: Textbook]. 2-e izd., dop. Komsomol'sk-na-Amure, FGBOU VPO «KNAGTU», 2015. 108 p. ISBN 978-5-7765-1132-5. [in Russian].

8. Il'inskii N.F. Energosberegayushchii elektropriwod [Energy-Saving Electric Drive]. *Energiya — Energy*, 1999, No. 2, pp. 24-29. [in Russian].

9. Mustafin M.A., Almuratova N.K., Tabul'taev S.S. *Energosberegayushchii elektropriwod tsentrobezhnykh nasosov: uchebnoe posobie* [Energy-Saving Electric Drive of Centrifugal Pumps: Manual]. Almaty, AUES Publ., 2016. 90 p. ISBN 978-601-7889-09-8. [in Russian].

10. Sokol E.I., Baru A.Yu., Lukpanov Zh.K. Opyt razrabotki i vnedreniya preobrazovatelei chastoty dlya reguliruemogo elektropriroda nasosnykh agregatov MN [Experience of Development and Implementation of the Frequency Converters for the Regulated Electric Drive of the MN Pump Units]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2004, No. 7, pp. 52-57. [in Russian].

11. Shabanov V.A. Osnovy metodiki vybora chisla i mesta ustanovki chastotno-reguliruemyykh elektropriwodov magistral'nykh nasosov [Bases of the Technique of the Choice of Number and Installation Site of Frequency Adjustable Electric Drives of the Main Pumps]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2012, Vol. 10, No. 2, pp. 36-39. EDN: RPDCUR. [in Russian].

12. Glotov A.F., Vadutov O.S. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya s PID-regulyatorom* [Automatic Control System with PID Regulator]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014. 10 p. [in Russian].

13. Lur'e M.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogo transporta nefti, nefteproduktov i gaza* [Mathematical Modeling of Processes of Pipeline Transportation of Oil, Oil Products and Gas]. Moscow, FGUP Izd-vo «Nef't i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina, 2003. 335 p. ISBN 5-7246-0250-4. [in Russian].

14. Demidova G.L., Lukichev D.V. *Regulyatory na osnove nechetkoi logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi ob'ektami* [Regulators Based on Fuzzy Logic in Control Systems of Technical Objects]. Saint-Petersburg, Universitet ITMO Publ., 2017. 81 p. EDN: YIBCCR. [in Russian].

15. NPO «Stroitekhavtomatika». *Vysokovol'tnye chastotnye preobrazovateli STA pryamogo vklyucheniya serii STA-B9.HVI (3 kV, 6 kV, 10 kV). Kratkoe tekhnicheskoe opisanie ustroystva* [NPO «Stroytekhavtomatika». High-Voltage Direct-On Frequency Converters of the STA-B9.HVI Series (3 kV, 6 kV, 10 kV). Brief Technical Description of the Device] [Electronic Resource]. URL: https://www.gu-sta.ru/download/pdf_chp/sta-b9.hvi.pdf. [in Russian].

16. Vasil'ev G.G., Korobkov G.E., Korshak A.A., Lur'e M.V., Pisarevskii V.M., Prokhorov A.D., Soshchenko A.E., Shammazov A.M. *Truboprovodnyi transport nef'ti: uchebnoe posobie* [Oil Pipeline Transport: Manual]. Ed. by S.M. Vainshtok. Moscow, OOO «Nedra-Biznestsentr», 2002, Vol. 1. 407 p. ISBN 5-8365-0118-1. [in Russian].

17. Kiam Heong Ang, Chong G., Yun Li. PID Control System Analysis, Design, and Technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, No. 13(4), pp. 559-576. URL: <https://eprints.gla.ac.uk/3817/1/IEEE3.pdf>. [in Russian].

18. GOST 12124-87. *Nasosy tsentrobezhnye neftyanye dlya magistral'nykh truboprovodov. Tipy i osnovnye parametry* [State Standard 12124-87. Centrifugal Oil Pumps for Pipelines. Types and Basic Parameters]. Moscow, Izd-vo standartov, 1987. 7 p. [in Russian].

19. Sablina G.V., Markova V.A. Nastroyka parametrov PID-regulyatora v sisteme s ob'ektom vtorogo poryadka s zapazdyvaniem [Adjustment of PID Regulator Parameters in the System with the Second Order Object with Delay]. *Avtometriya — Autometry*, 2022, No. 4, Vol. 58, pp. 110-117. DOI: 10.15372/AUT20220411. [in Russian].

20. Erilina T.P., Kinzyabulatov U.A. Ispol'zovanie i osobennosti ispol'zovaniya chastotno-reguliruemogo privoda [Use and Peculiarities of the Frequency-Controlled Drive]. *Alleya nauki — Alley of Science*, 2018, Vol. 1, No. 8 (24), pp. 418-423. EDN: YLZAKD. [in Russian].

21. Bykov K.V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii magistral'nykh nefteprovodov s regulirovaniem chastoty vrashcheniya nasosnykh agregatov: dis. kand. tekhn. nauk* [Increasing the Efficiency of Operation of Trunk Oil Pipelines with the Regulation of Pumping Units Speed: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 2014. 138 p. [in Russian].

22. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Shishkov A.N., Butakov S.M. *Energosberezhenie v elektroprivode* [Energy Saving in Electric Drive]. Chelyabinsk, YuUrGU, 2011. 104 p. ISBN: 978-5-696-04148-3. EDN: QMLNBB. [in Russian].

23. Shabanov V.A., Khakimov E.F., Sharipova S.F. Algoritm otsenki effektivnosti chastotno-reguliruemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov ekspluatiruemyykh nefteprovodov po kriteriyu snizheniya raskhoda elektroenergii [Effectiveness Evaluation Algorithm of Frequency-Controlled Electric Drive Main Pumps of Oil Pipelines Operated by the Criterion Reducing of Energy Consumption]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, No. 2, pp. 34-42. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 20.11.2024; принята к публикации 27.11.2024.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Научная статья

УДК 622.276

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-73–83

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БАЛАНСИРНОГО УРАВНОВЕШИВАЮЩЕГО КОНТРГРУЗА НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ ШТАНГОВОГО ГЛУБИННОГО НАСОСА

*Антон Николаевич Яшин**Anton N. Yashin**старший преподаватель кафедры**«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.

Для улучшения энергетических характеристик электроприводов установок штанговых глубинных насосов необходимо точно сбалансировать противовесы, а также снизить электрическую мощность установленных двигателей, что позволит увеличить коэффициент загрузки.

Актуальной научной задачей является повышение эффективности установок штанговых глубинных насосов путем балансировки противовесов станка-качалка, что, в свою очередь, позволит снизить электрическую мощность установленных двигателей, что позволит увеличить коэффициент загрузки.

Цель исследования

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

Методы исследования

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

Ключевые слова

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

Результаты

Разработана модель системы «ШГН — станок-качалка» с возможностью учета влияния изменения параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры установки штангового глубинного насоса.

Для цитирования: Яшин А. Н. Исследование влияния параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры электротехнического комплекса установки штангового глубинного насоса // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 73-83. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-73-83>.

Original article

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE BALANCED COUNTER-LOAD ON THE OUTPUT PARAMETERS OF THE ELECTRICAL COMPLEX OF A SUCKER RODS PUMP UNIT

Relevance

The well mechanized production is the most energy intensive of all technological oil production processes. This is because the number of wells is large, they are dispersed over long distances, many of them work in ineffective modes with significant unproductive losses.

Electric drives of the rod of deep pumps work in underloaded mode with a cyclically changing load, which negatively affects both the electric network and the engine itself.

To improve the energy characteristics of the electric drives of the sucker-rod pumping units must accurately balance the counterweights, as well as reduce the electrical power of the installed engines, which will increase the load coefficient.

An urgent scientific task is to increase the efficiency of the installations of the rod deep pumps by balancing the counterweights-rocking machines, which in turn will reduce the electrical power of the installed engines, which will increase the load coefficient.

Aim of research

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

Research methods

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

Results

A model of the sucker-rod pump — rocking machine system has been developed with the possibility of taking into account the impact of changes in the parameters of a balancer balancing counter-load on the output parameters of the sucker-rod pumping units.

Keywords

sucker rod pump, balance, wattmeter card, mathematical model, kinematic scheme

For citation: Yashin A. N. Issledovaniye vliyaniya parametrov balansirnogo uravnovesivayushchego kontrgruza na vykhodnyye parametry elektrotekhnicheskogo kompleksa ustanovki shtangovogo glubinnogo nasosa [Study of the Influence of the Parameters of the Balanced Counter-Load on the Output Parameters of the Electrical Complex of a Sucker Rods Pump Unit]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 73-83 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-73-83>.

Добыча углеводородов является одной из важнейших отраслей в структуре экономики России [1]. Отрасль обеспечивает значительную часть валютных поступлений в экономику страны [2]. Она также является одной из наиболее энергоемких, так как до 5 % всей вырабатываемой электроэнергии потребляется нефтедобывающими предприятиями [3].

При подъеме жидкости с глубины установки насоса на поверхность скважинным насосом совершается полезная работа. Эта работа определяется так

называемой гидравлической мощностью $P_{\text{гидр.}}$, которая может быть рассчитана исходя из увеличения потенциальной энергии откачиваемой жидкости [4]. На рисунке 1 показано, в каких элементах установки штангового глубинного насоса (УШГН) происходят электрические, механические и эксплуатационные потери.

В процессе эксплуатации скважины в УШГН могут быть выделены следующие виды мощности [5]:

— гидравлическая мощность $P_{\text{гидр.}}$, затрачиваемая на подъем скважинной

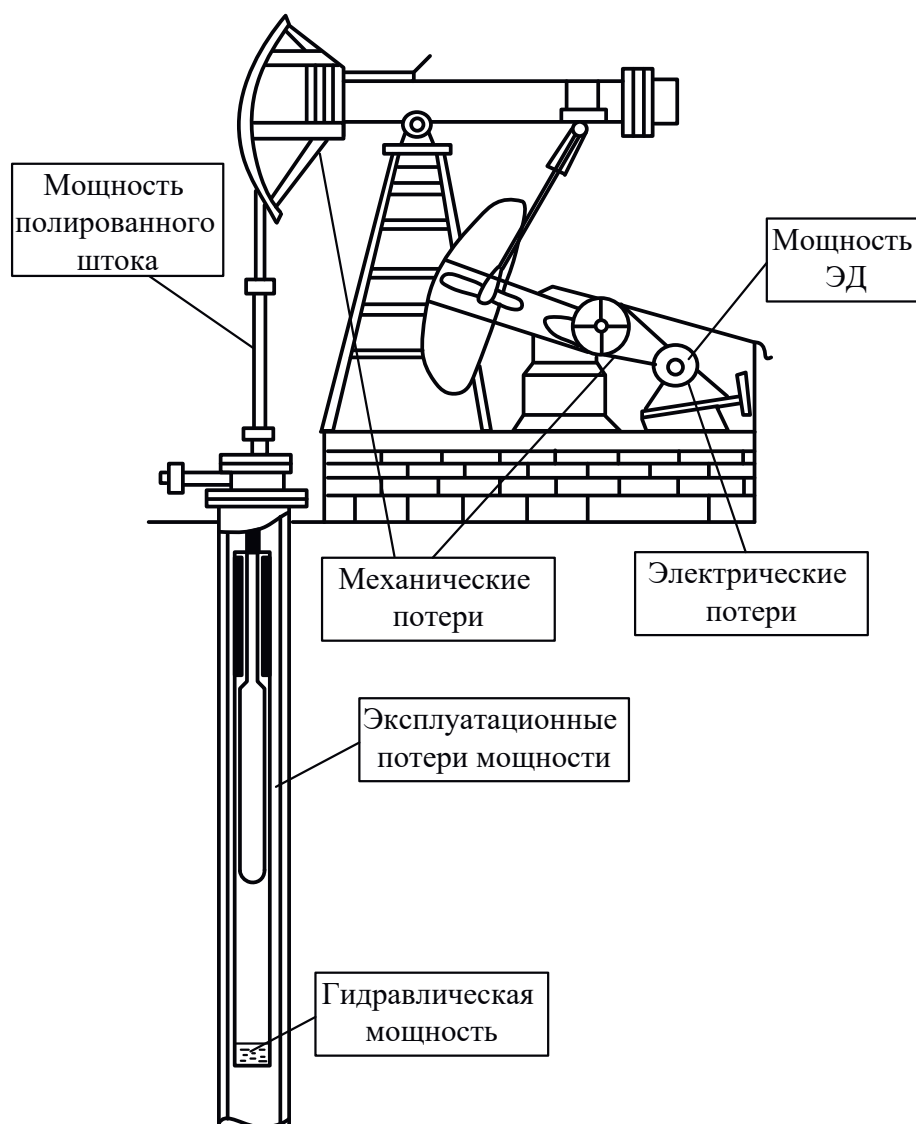


Рисунок 1. Схема передачи и потерь мощности в установке штангового глубинного насоса

Figure 1. Power transmission and loss diagram in a sucker rod pumping unit

жидкости или на совершение полезной работы;

— мощность насоса $P_{\text{нас.}}$, которая складывается из гидравлической мощности и потерь в насосе;

— мощность полированного штока $P_{\text{шток}}$, которая складывается из мощности насоса и потерь в колонне насосных штанг, может определяться с помощью измерений динамограмм;

— электрическая мощность $P_{\text{эд}}$, которая потребляется электродвигателем установки и определяет общую потребляемую насосной установкой мощность, может быть определена методом ваттметрирования.

Гидравлическая (полезная) мощность вычисляется по формуле [6]:

$$P_{\text{гидр.}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (1)$$

где ρ — плотность добываемой нефти, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

Q — подача ШГН, м³/ч;

H — напор ШГН, м.

Напор насоса — это показатель, выражающий величину энергии, сообщаемой насосом единице веса откачиваемой жидкости:

$$H = \frac{P_{\text{давл.}}}{\rho \cdot g}, \quad (2)$$

где $p_{\text{давл.}}$ — давление насоса, Па.

При применении этой формулы обычно используется подача жидкости Q , измеренная на поверхности. Таким

образом, объемные потери скважинного насоса учитываются автоматически, поскольку измеренный расход жидкости включает влияние следующих объемных потерь на пути потока: неполное заполнение насоса, потери, обусловленные утечками в насосе, а также в насосно-компрессорных трубах.

Электроприводы штанговых глубинных насосов работают в недогруженном режиме с циклически изменяющейся нагрузкой, что отрицательно влияет как на электрическую сеть, так и на сам двигатель [7]. Улучшить режим работы электропривода штангового глубинного насоса позволяет его уравнивание, которое производится на основе ваттметрирования — измерения графиков активной мощности, потребляемой электродвигателем [8].

Поэтому проблема повышения сбалансированности (или уравнивания) установок штанговых глубинных насосов является актуальной для нефтегазодобывающих предприятий.

При уравнивании стараются обеспечить равенство максимальных значений активной мощности, потребляемой электродвигателем, при подъеме (P_1) и спуске (P_2) колонны штанг (рисунок 2).

В данной статье описывается влияние изменения параметров балансирующего контргруза станка качалки на выходные параметры УШГН.

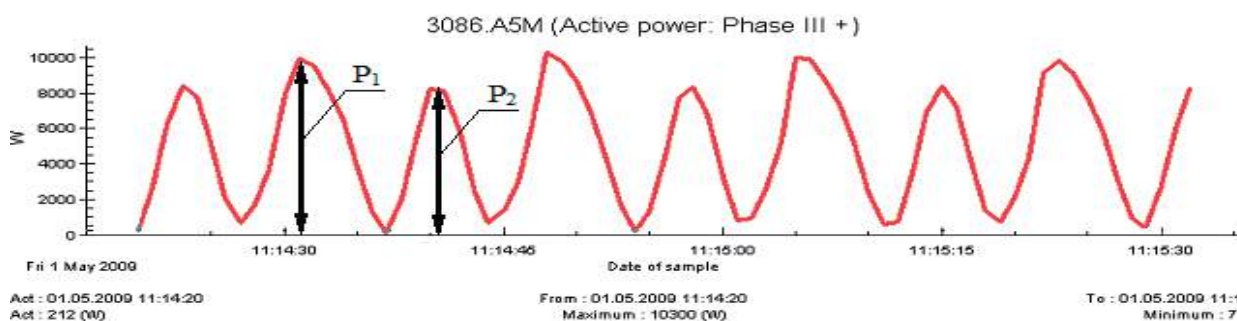


Рисунок 2. Ваттметрограмма установки штангового глубинного насоса

Figure 2. Wattmeter card of the installation of a sucker rod pumping unit

Для того, чтобы имитировать влияние изменения параметров балансирующего контргруза на выходные параметры УШГН, необходимо получить математическое описание усилий, действующих на головку балансира, которые напрямую зависят от переменных нагрузок на полированный шток [9].

В процессе эксплуатации УШГН (рисунок 3) на полированный шток действует динамическая нагрузка. Рассмотрим математическую модель штангового глубинного насоса, которую можно представить волновым уравнением продольных упругих колебаний стержня [10]:

$$\rho_s \cdot S_r \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} = E \cdot S_r \cdot \frac{d^2 u}{dx^2} + f, \quad (3)$$

где $u(x, t)$ — перемещение фиксированной точки колонны штанг, м;

t — время, с;

E — модуль Юнга материала штанг, Па;

ρ_s — плотность материала штанг, кг/м³;

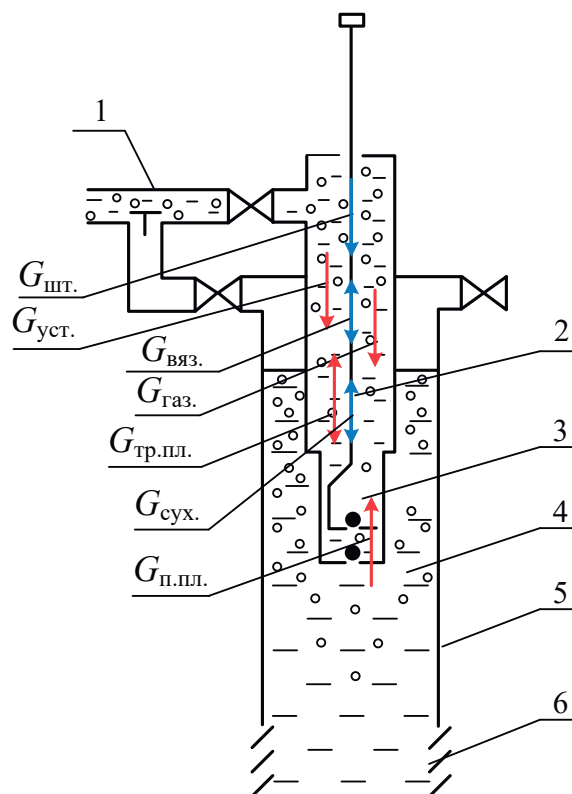
x — Лагранжева координата по длине колонны штанг, м;

S_r — площадь поперечного сечения штанг, м²;

f — удельная на единицу массы штанги внешняя сила, Н/м.

Модель, представленная на рисунке 4, учитывает влияние сил, действующих на штанги и на плунжер.

На плунжер действуют: сила устьевого давления $G_{уст.}$, сила тяжести газожидкостной смеси $G_{газ.}$, сила трения в плунжерной паре $G_{тр.пл.}$ и сила давления жидкости в подплунжерном пространстве $G_{п.пл.}$. При этом $G_{уст.}$ и $G_{газ.}$ постоянные и всегда направлены вниз. Сила давления жидкости в подплунжерном пространстве $G_{п.пл.}$ переменная и направлена вверх. Сила трения в плунжерной паре



1 — выкидная линия; 2 — колонна насосных штанг; 3 — плунжерный насос; 4 — затрубное пространство; 5 — обсадная колонна; 6 — перфорационные отверстия

1 — flow line; 2 — sucker rod column; 3 — plunger pump; 4 — annular space; 5 — casing column; 6 — perforations

Рисунок 3. Схема скважины, оборудованной УШГН

Figure 3. Scheme of a well equipped with a sucker-rod pumping unit

$G_{тр.пл.}$ переменная и направлена противоположно движению плунжера [11].

На колонну штанг действуют: сила тяжести насосных штанг в жидкости $G_{шт.}$, сила вязкого трения $G_{вяз.}$ и сила сухого трения $G_{сух.}$. При этом $G_{вяз.}$ и $G_{сух.}$ переменны и направлены противоположно движению штанг, а сила тяжести насосных штанг $G_{шт.}$ постоянна и направлена вниз [12].

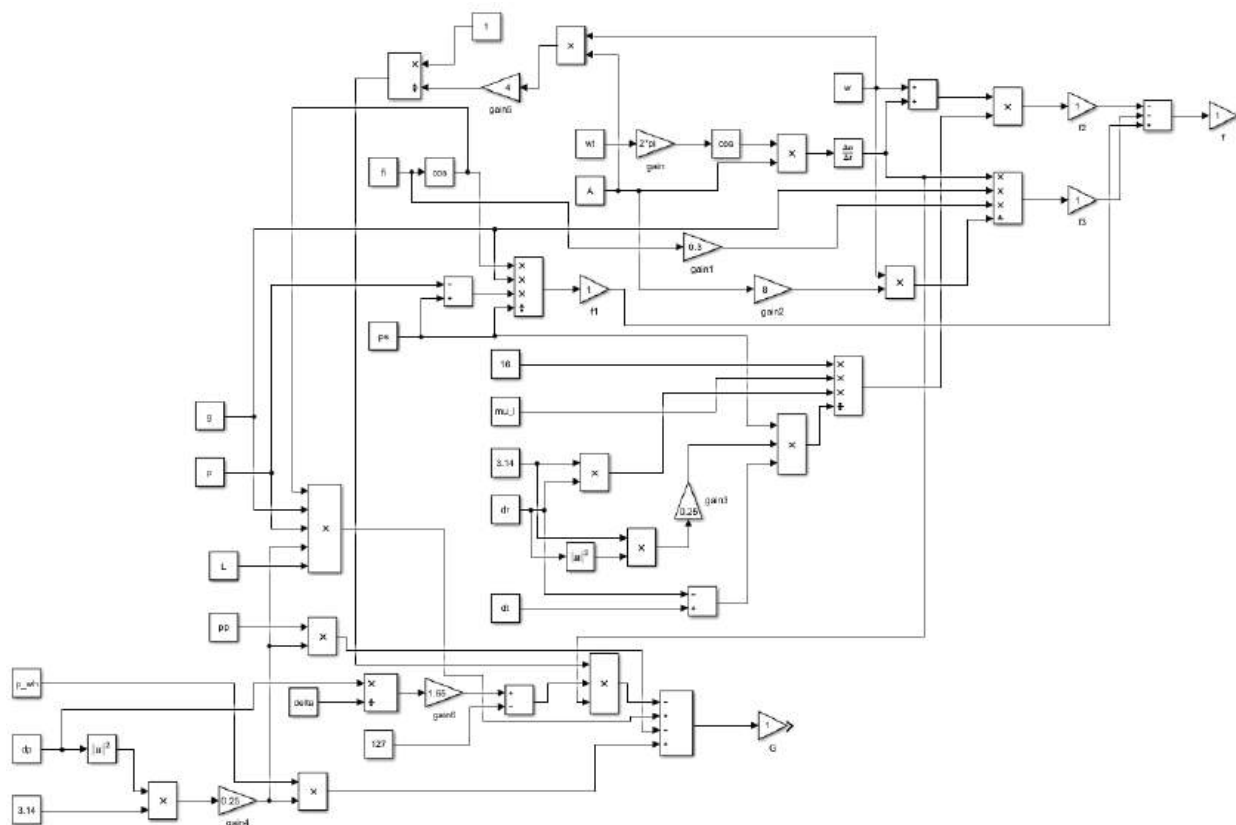


Рисунок 4. Имитационная модель штангового глубинного насоса

Figure 4. Simulation model of a sucker rod pump

Сила устьевое давления находится из выражения:

$$G_{уст.} = p_{уст.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{пл.}^2}{4}, \quad (4)$$

где $p_{уст.}$ — давление на устье, Па;

$d_{пл.}$ — диаметр плунжера, м.

Силу тяжести насосных штанг в жидкости можно вычислить:

$$G_{ум.} = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\pi \cdot d_{ум.}^2}{4} \cdot L, \quad (5)$$

где L — длина штанговой колонны, м;

$d_{ум.}$ — диаметр насосных штанг, м;

ρ — средняя плотность газожидкостной смеси, кг/м³;

φ — угол наклона скважины к вертикали, град.

Сила тяжести газожидкостной смеси находится по выражению:

$$G_{св.} = \rho \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\pi \cdot d_{пл.}^2}{4} \cdot L. \quad (6)$$

Сила вязкого трения:

$$G_{вяз.} = -\frac{16 \cdot \mu_l \cdot \pi \cdot d_{ум.}}{d_t - d_{ум.}} \cdot \int_0^L \left(\frac{du}{dt} + \omega \right) dx, \quad (7)$$

где μ_l — коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;

d_t — диаметр НКТ, м;

ω — скорость газожидкостного потока в трубах, м/с.

Сила сухого трения находится из выражения:

$$G_{сух.} = -\frac{1}{8 \cdot A \cdot \omega} \cdot \mu_{fr} \cdot \varphi \cdot \rho_s \cdot g \times \frac{\pi \cdot d_{ум.}^2}{4} \cdot \int_0^L \frac{du}{dt} dx, \quad (8)$$

где μ_{fr} — коэффициент трения штанг о трубы.

Сила трения в плунжерной среде:

$$G_{мп.пл.} = -\frac{1}{4 \cdot A \cdot \omega} \times \left(1,65 \cdot \frac{d_{пл.}}{\delta} - 127 \right) \cdot \frac{du(L,t)}{dt}, \quad (9)$$

где δ — зазор между плунжером и цилиндром, м.

Сила давления жидкости в подплунжерном пространстве вычисляется из выражения:

$$G_{н.пл.} = -p_{н.пл.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{н.пл.}^2}{4}, \quad (10)$$

где $p_{н.пл.}$ — давление в подплунжерном пространстве, которое определяется с учетом уравнения сохранения массы газожидкостной смеси для несжимаемой жидкости и совершенного газа, Па.

За основу математической модели станка-качалки взяты выражения, представленные в [13].

На рисунке 5 представлена кинематическая схема станка-качалки с комбинированным уравниванием.

Расчет усилий в шатуне базируется на уравнении моментов сил относительно оси вращения балансира [14]:

$$(T \cdot l_1 - G_{6.1} \cdot l_{6.1}) \cdot \cos \theta - T_{кр.} \cdot l_2 \cdot \cos \gamma = 0, \quad (11)$$

где T — нагрузка на головку балансира, кг;

T_p — усилие в шатуне кривошипно-шатунного механизма, кг;

l_1 — длина переднего плеча балансира, м;

l_2 — длина заднего плеча балансира, м;

l_b — длина плеча контргруза, м;

G_b — вес контргруза, кг.

Момент на кривошипном валу находится по выражению:

$$M_c = \left(T_{кр.} \cdot \sin(\alpha + \beta) - G_{6.2} \cdot \frac{R_{6.2}}{r} \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot r, \quad (12)$$

где R_c — радиус кривошипа, м;

G_c — вес кривошипного уравнивающего контргруза, кг.

Полученная компьютерная модель «ШГН — станок-качалка» позволяет имитировать влияние изменения параметров балансирного уравнивающего контргруза на выходные параметры УШГН. Результаты моделирования представлены в таблице 1 и на рисунках 6 и 7.

Разработанная модель «ШГН — станок-качалка» с имитацией влияния изменения параметров балансирного уравнивающего контргруза на выходные параметры УШГН может быть использована при отладке интеллектуальных станций управления с функцией автоматического уравнивания балансирных грузов.

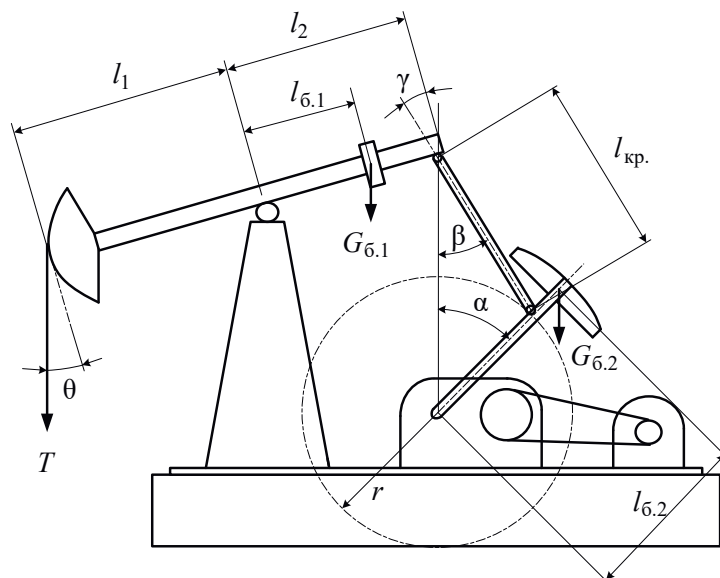
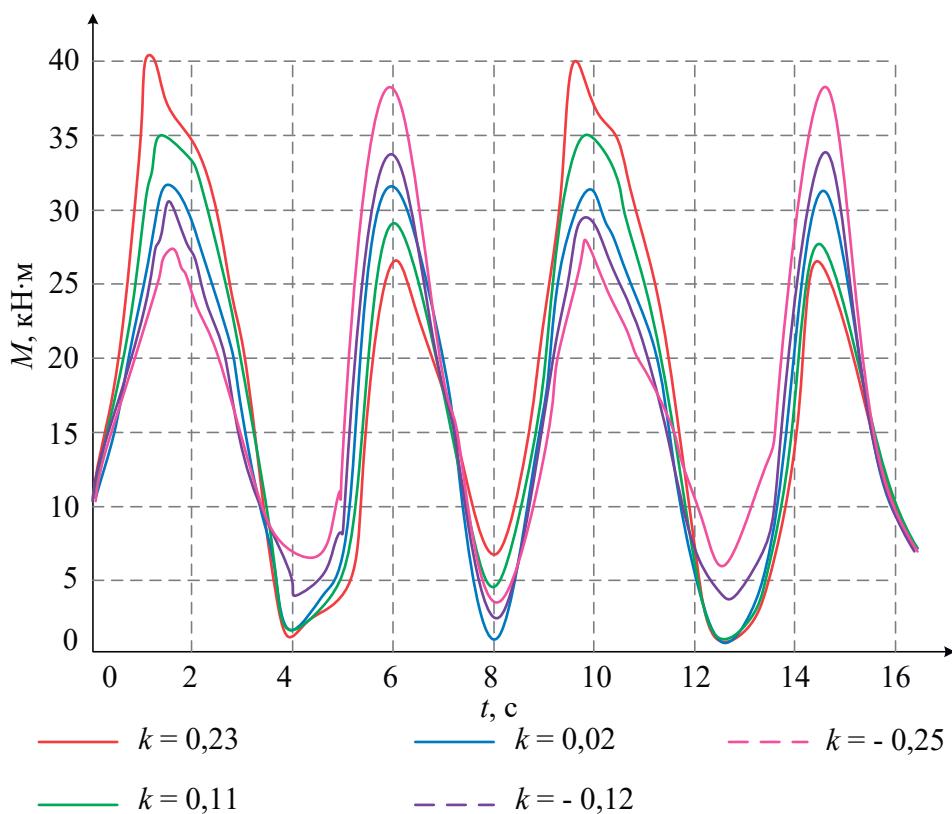


Рисунок 5. Кинематическая схема станка-качалки с комбинированным уравниванием

Figure 5. Kinematic diagram of a pumping unit with combined balancing

Таблица 1. Результаты моделирования балансировки УШГН**Table 1.** Results of modeling the balancing of the sucker-rod pumping unit

Время t , с	Момент на кривошипе M , кН·м				
	$k = 0,23$	$k = 0,11$	$k = 0,02$	$k = -0,12$	$k = -0,25$
0	11,1	10,4	10,3	10,5	10,9
1	37,2	30,1	24,6	23,5	21,7
2	34,8	33,2	29,3	26,0	24,8
3	22,1	20,0	18,3	14,4	15,1
4	1,8	2,9	2,9	4,4	7,0
5	3,9	5,1	5,9	8,6	10,9
6	26,0	29,1	31,5	34,2	38,7
7	50,3	18,5	21,5	19,4	21,2
8	7,1	4,9	3,8	2,5	1,1
9	24,2	20,2	17,5	17,3	14,8
10	37,3	34,5	31,2	29,4	26,5
11	28,0	25,1	23,2	21,5	19,3
12	8,1	6,2	6,0	8,1	11,5
13	2,5	2,4	2,6	4,8	6,4
14	13,2	16,4	20,1	14,3	28,8
15	23,4	24,5	27,0	28,7	33,2
16	10,3	10,4	9,8	9,7	9,9

**Рисунок 6.** Момент на кривошипе при различных коэффициентах неуровновешенности**Figure 6.** Crank torque for different unbalance factors

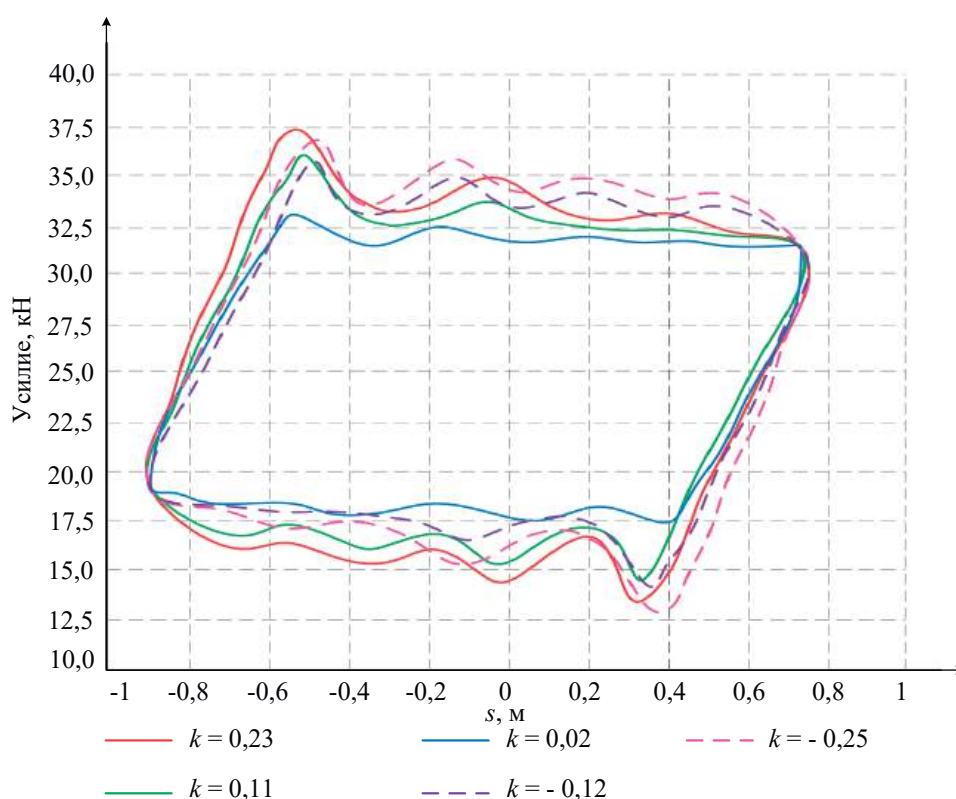


Рисунок 7. Расчетные динамограммы при различных коэффициентах неуравновешенности

Figure 7. Calculated dynamograms for different unbalance factors

Выводы

1. Сбалансированность или уравновешенность установок скважинных штанговых насосов может оцениваться по значениям тока, активной мощности, потребляемой за полупериоды электроэнергией, либо по скорости или времени движения точки подвеса штанг. Однако наиболее целесообразно производить балансировку по измеренным ваттметрограммам, так как ваттметрограмму достаточно просто измерить, датчики ваттметрирования очень надежны, а обработка массива данных может быть осуществлена прямо в скважинном контроллере и не требует большой вычислительной мощности.

2. Недостаточная сбалансированность установок скважинных штанговых насосов вызывает не только перерасход электроэнергии, но также приводит к работе электродвигателя в недогруженном режиме с низкими значениями коэффициента мощности и коэффициента полезного действия.

3. Разработанная модель «ШГН — станок-качалка» с имитацией влияния изменения параметров балансирующего контргруза на выходные параметры УШГН может быть использована при отладке интеллектуальных станций управления с функцией автоматического уравнивания балансирующих грузов.

Список источников

1. Рзаев А.Г., Резван М.Г., Хакимьянов М.И., Шафиков И.Н. Современное состояние автоматизации установок механизированной добычи нефти на территории СНГ // Известия НАНА, серия физико-технических и математических наук. 2013. Т. XXXIII, № 6. С. 176-186.
2. Хакимьянов М.И., Ковшов В.Д., Чикишев А.М., Максимов Н.С., Почуев А.И. Контроллеры автоматизации установок штанговых глубинных насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. № 1. С. 44-56. EDN: RPFABB.
3. 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.
4. Зюзев А.М., Бубнов М.В. Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 4. С. 178-187. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/226. EDN: NJPLUF.
5. Dave M., Mustafa M. Performance Evaluations of the Different Sucker Rod Artificial Lift Systems // Paper presented at the SPE Symposium: Production Enhancement and Cost Optimization, Kuala Lumpur, Malaysia, November 2017. 2017. DOI: 10.2118/189231-MS.
6. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F., Semisynov R.A., Bezryadnova E.A. Monitoring of Sucker-Rod Pump Units as a Result of the Analysis Wattmeter Cards // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803, No. 1. 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012066. EDN: YKDIWH.
7. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Shafikov I.N. Energy Efficiency of Well Electric Submersible Pumps for Oil Production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. Vol. 537. No. 6. P. 062006. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062006.
8. Бодылев А.С., Яшин А.Н., Конев А.А., Хакимьянов М.И. О методах контроля режимов работы электроприводов скважинных нефтедобывающих насосов // Завалишинские чтения»23: сб. докл. XVII Междунар. конф. по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 2023. С. 164-169. DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-164-169. EDN: FPHDOA.
9. Алиев Т.А., Гулуев Г.А., Рзаев А.Г., Алиев Я.Г., Резван М.Х., Яшин А.Н. Ways to Increase the Efficiency of Sucker Rod Pump Units in Oil Production // Journal of Engineering Research and Sciences. 2022. Vol. 1, No. 3.
10. Яшин А.Н., Конев А.А., Хакимьянов М.И. 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.
11. Яшин А.Н., Хакимьянов М.И. Investigation of the Frequency-Controlled Electric Drive of the Gas Air Cooling Units // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 23-25 September 2022, Magnitogorsk, Russian Federation. 2022. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906620.
12. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. SRPU Balance Monitoring by Wattmeter Card // 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). IEEE, 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341705.
13. Яшин А.Н. Преобразование ваттметрограммы электропривода установки штангового глубинного насоса в динамограмму // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 3. Т. 20. С. 80-88. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-80-88. EDN: SABAAN.
14. Яшин А.Н., Конев А.А., Хакимьянов М.И. Power Supply of The Sucker Rod Pump Unit Electric Drive Using Renewable Energy Sources // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS): The International Scientific and Practical Conference Materials, 16–18 November 2021, Ufa, Russia / USATU. Уфа, 2021. P. 43-46. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657249.

References

1. Rzaev A.G., Rezvan M.G., Khakim'yanov M.I., Shafikov I.N. Sovremennoe sostoyanie avtomatizatsii ustanovok mekhanizirovannoi dobychi nefi na territorii SNG [The Current State of Automation of Mechanized Oil Production Facilities in the CIS]. *Izvestiya NANA, seria fiziko-tekhnicheskikh i matematicheskikh nauk — Proceedings of ANAS, a Series of Physical, Technical and Mathematical Sciences*, 2013, Vol. XXXIII, No. 6, pp. 176-186. [in Russian].
2. Khakim'yanov M.I., Kovshov V.D., Chikishev A.M., Maksimov N.S., Pochuev A.I. Kontrollery avtomatizatsii ustanovok shtangovykh glubinnnykh nasosov [Automation Controllers for the Installation of Rod Depth Pumps]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic*

Scientific Journal «Oil and Gas Business», 2007, No. 1, pp. 44-56. EDN: RPFABB. [in Russian].

3. 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: XTDNXX. [in Russian].

4. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Diagnostika uravnovesennosti shtangovoi glubinnoi nasosnoi ustanovki po vattmetrogramme [Sucker-Rod Pumping Unit Balance Diagnostics by Wattmeter Card]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, Vol. 330, No. 4, pp. 178-187. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/226. EDN: NJPLUF. [in Russian].

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

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

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

8. Bodylev A.S., Yashin A.N., Konev A.A., Khakim'yanov M.I. O metodakh kontrolya rezhimov raboty elektroprivodov skvazhinnykh neftedobyvayushchikh nasosov [About Operating Modes Control Methods of Downhole Oil-Producing Pumps Electric Drives]. *Sbornik dokladov XVII Megdunarodnoy konferencii po electromekhanike i robototekhnike «Zavalishinskie chtenia'23»* [Collection of Reports of XVII International Conference on Electromechanics and

Robotics «Zavalishinsky readings'23»]. Saint-Petersburg, 2023, pp. 164-169. DOI: 10.31799/978-5-8088-1823-1-2023-18-164-169. EDN: FPHDOA. [in Russian].

9. Aliev T.A., Guluev G.A., Rzaev A.G., Aliev Ya.G., Rezvan M.Kh., Yashin A.N. Ways to Increase the Efficiency of Sucker Rod Pump Units in Oil Production. *Journal of Engineering Research and Sciences*, 2022, Vol. 1, No. 3.

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

11. Yashin A.N., Khakim'yanov M.I. Investigation of the Frequency-Controlled Electric Drive of the Gas Air Cooling Units. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 23-25 September 2022, Magnitogorsk, Russian Federation*, 2022. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906620.

12. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. SRPU Balance Monitoring by Wattmeter Card. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). IEEE*, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341705.

13. Yashin A.N. Preobrazovanie vattmetrogrammy elektroprivoda ustanovki shtangovogo glubinnogo nasosa v dinamogrammu [Conversion of the Wattmetrogram of the Electric Drive of a Sucker-Rod Pump into a Dynamogram]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 3, Vol. 20, pp. 80-88. DOI: 10.17122/1999-5458-2024-20-3-80-88. EDN: SABAAN. [in Russian].

14. Yashin A.N., Konev A.A., Khakim'yanov M.I. Power Supply of The Sucker Rod Pump Unit Electric Drive Using Renewable Energy Sources. *International Conference on Electro-technical Complexes and Systems (ICOECS): The International Scientific and Practical Conference Materials, 16–18 November 2021, Ufa, Russia, USATU*. Ufa, 2021, pp. 43-46. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657249.

Статья поступила в редакцию 12.11.2024; одобрена после рецензирования 20.11.2024; принята к публикации 27.11.2024.

The article was submitted 12.11.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Научная статья

УДК 681.518

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-84-91

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ГИДРИРОВАНИЯ АЦЕТИЛЕНА



Мусса Гумерович Баширов

Mussa G. Bashirov

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный
нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Константин Алексеевич Крышко

Konstantin A. Kryshko

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



Алик Мусаевич Хафизов

Alik M. Khafizov

кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный
нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Актуальность

Рынок этилена в России в последние годы переживает значительные изменения, обусловленные сочетанием внутренних и внешних факторов. Важным трендом на российском рынке этилена стало наращивание производственных мощностей. Россия активно инвестирует в новые предприятия и модернизацию существующих комплексов в рамках политики импортозамещения и диверсификации экономики. В эпоху информационных технологий важно развивать не только технологические аспекты в нефтехимической отрасли, но и уделять внимание развитию информационно-измерительных систем управления технологическими процессами. Подобные решения позволят повысить качество продукции на этапах управления процессом.

Цель исследований

Повышение конверсии ацетилена путем совершенствования информационно-измерительной системы управления процессом гидрирования ацетилена.

Ключевые слова

информационно-измерительная и управляющая система, генетический алгоритм, виртуальный анализатор, гидрирование ацетилена, алгоритмическое обеспечение

Методы исследования

В ходе исследования проведён анализ научной литературы и трудов, посвящённых совершенствованию процессов гидрирования ацетилена. Разработка модели виртуального анализатора выполнена с применением регрессионных методов и технологий искусственного интеллекта для оптимизации её параметров. Для создания алгоритма управления технологическим процессом использованы классические методы теории автоматического управления.

Результаты

Разработан виртуальный анализатор конверсии ацетилена с применением генетического алгоритма, разработан алгоритм управления технологическим процессом на базе виртуального анализатора.

Для цитирования: Баширов М. Г., Крышко К. А., Хафизов А. М. Алгоритмическое обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы процесса гидрирования ацетилена // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 84-91. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-84-91>.

Original article

ALGORITHMIC SUPPORT OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE ACETYLENE HYDROGENATION PROCESS

Relevance

The ethylene market in Russia has been undergoing significant changes in recent years due to a combination of internal and external factors. An important trend in the Russian ethylene market has been the expansion of production capacities. Russia is actively investing in new enterprises and modernization of existing complexes within the framework of the policy of import substitution and economic diversification. In the era of information technology, it is important to develop not only technological aspects in the petrochemical industry, but also to pay attention to the development of information measuring and control systems of technological processes. Such solutions will improve the quality of products at the stages of process management.

Aim of research

Improving the quality of ethylene production, and in particular improving one of the stages of ethylene production – acetylene hydrogenation.

Research methods

The research used literature and scientific papers on the improvement of acetylene hydrogenation. Regression methods were used to develop a virtual analyzer model. During the development of the process control algorithm, classical approaches of the theory of automatic control were used. Artificial intelligence technologies were used to search for coefficients of the virtual analyzer model.

Results

A model of a virtual acetylene conversion analyzer using a genetic algorithm has been developed, a process control algorithm based on the resulting virtual analyzer has been developed.

Keywords

information-measuring and control system, genetic algorithm, virtual analyzer, acetylene hydrogenation, algorithmic support

For citation: Bashirov M. G., Kryshko K. A., Khafizov A. M. Algoritmicheskoye obespecheniye informatsionno-izmeritel'noy i upravlyayushchey sistemy protsessa gidrirovaniya atsetilena [Algorithmic Support of Information-Measuring and Control System of the Acetylene Hydrogenation Process]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 84-91 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-84-91>.

Введение

Этилен — это один из важнейших продуктов нефтехимической промышленности и основное сырье для производства множества других химических веществ. Из него получают полиэтилен, стирол, этиленгликоль, поливинилхлорид и множество других материалов, которые используются в различных отраслях экономики. Производство этилена имеет стратегическое значение для российского рынка и экономики. Россия является крупным производителем нефтехимической продукции, и этиленопроизводные товары играют важную роль в экспорте страны. Увеличение производства этилена позволяет России выйти на мировые рынки с более конкурентоспособной продукцией и повысить свою долю в мировом нефтехимическом экспорте.

Однако как и аналогичные технологические процессы производство этилена обладает рядом специфических недостатков. Один из недостатков относят к гидрированию ацетилена при производстве этилена.

Сырье в виде этан-этиленовой фракции (ЭЭФ) содержит ацетиленовые следы, которые неблагоприятно влияют на качество готового этилена. Для избавления от ацетиленовых следов этан-этиленовую фракцию подвергают гидрированию [1]. Процесс гидрирования ацетилена происходит в химическом реакторе с использованием катализатора. Проблема гидрирования ацетилена заключается в образовании побочного продукта реакции («зеленое» масло), который откладывается на поверхности катализатора и ухудшает его свойства. С течением времени катализатор полностью покрывается маслом, и продукты химической реакции теряют свое качество.

В научных трудах рассматриваются вопросы совершенствования непосред-

ственно технологического процесса, к примеру, способы проведения гидрирования ацетилена и подбор носителя катализатора [2–5]. Но вопросы совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем рассмотрены недостаточно полно. В настоящее время известно успешное внедрение технологий искусственного интеллекта в промышленности [6, 7]. Информационно-измерительная и управляющая система гидрирования ацетилена обладает перспективой для применения искусственного интеллекта.

Основная часть

Совершенствование информационно-измерительной и управляющей системы гидрирования ацетилена заключается в применении виртуального анализатора (ВА) конверсии ацетилена в управлении технологическим процессом. В ранних трудах [8] была получена модель виртуального анализатора, которая впоследствии была модифицирована в ходе дальнейших исследований. Гидрирование ацетилена протекает в химическом реакторе, заполненном палладиевым катализатором. Для развития химической реакции перед реактором установлен смеситель, в котором происходит смешение потоков этан-этиленовой фракции и водородсодержащих газов (ВСТ). Для удобства отслеживания хода химической реакции реактор разделен на три слоя.

В процессе моделирования технологического процесса было выявлено, что использование всех показаний датчиков температур (9 точек замеров температур, равномерно распределенных по высоте реактора) приводило к искажению данных о ходе химической реакции. В связи с этим было принято решение о применении виртуального анализатора оценки конверсии ацетилена для каждого слоя.

Разработанный виртуальный анализатор относится к классу эмпирических, разработанных на основе промышленных данных технологического процесса. Для выявления наиболее значимых технологических параметров, влияющих на конверсию ацетилена, при разработке модели виртуального анализатора использовался корреляционный анализ. Для упрощения вычислений и повышения эффективности работы виртуального анализатора все переменные представлены в безразмерном виде. Фактические единицы измерения учитываются на этапе подготовки входных данных. Регрессионная модель виртуального анализатора имеет вид:

$$\Delta U_i = F_{\text{ЭЭФ}} \cdot K_{i1} + F_{\text{ВСГ}} \cdot K_{i2} + T_{i1} \cdot K_{i3} + T_{i2} \cdot K_{i4} + T_{i3} \cdot K_{i5} + \left(\frac{\Delta T_i}{T_{i1} \cdot \tau_i} \right) \cdot K_{i6}, \quad (1)$$

где U_i — глубина конверсии i -го слоя;

τ_i — время пребывания сырья в реакторе;

ΔT_i — перепад температуры i -го слоя;

$F_{\text{ЭЭФ}}, F_{\text{ВСГ}}$ — массовые расходы ЭЭФ и ВСГ соответственно;

T_{i1}, T_{i2}, T_{i3} — температуры по высоте i -го слоя соответственно;

$K_{i1...6}$ — коэффициенты переменных i -го слоя, полученные генетическим алгоритмом.

Изучены научные работы, посвященные разработкам виртуальных анализаторов для объектов нефтепереработки и нефтехимии [9, 10]. Их анализ показал, что авторы при исследовании взаимосвязей между зависимой и независимыми переменными применяют регрессионные методы или искусственные нейронные сети. В данной работе поиск коэффициентов модели осуществлялся при помощи генетического алгоритма (ГА). Генетический алгоритм обладает рядом преимуществ при подборе весовых коэффициентов в математической модели, особенно в тех случаях, когда пространство решений является сложным и мно-

гомерным. В качестве исходных данных для обучения генетического алгоритма использовались архивные данные технологических параметров с действующего реактора гидрирования.

Критерии для прекращения работы ГА: достижение ГА определенного числа поколений (1000); получение решения с требуемым качеством (с точностью 0,00001); достигнуто максимальное время для обучения (10 мин).

После окончания работы генетического алгоритма найденные весовые коэффициенты используются в работе виртуального анализатора конверсии ацетилена по слоям реактора.

Для обеспечения продукции нужного качества расчет глубины конверсии ацетилена необходимо выполнять в режиме реального времени. Полученная модель ВА стала менее «массивной» по количеству переменных по сравнению с ранними трудами, что окажет влияние на скорость расчетов в режиме реального времени и на снижение затрат ресурса контроллера при работе информационно-измерительной и управляющей системы.

Для оценки полученной модели были использованы лабораторные данные оценки глубины конверсии на выходе из реактора. Сравнили лабораторные данные и полученную модель третьего слоя по критерию Фишера (рисунок 1). По итогам оценки модель достоверна с учетом 5 %-ой ошибки.

Далее разработали алгоритм управления для информационно-измерительной и управляющей системы процессом гидрирования ацетилена с применением виртуального анализатора [11], блок-схема которого представлена на рисунке 2.

1. После выполнения расчета конверсии ацетилена в режиме реального времени полученное значение сравнивается с допустимой конверсией ацетилена с

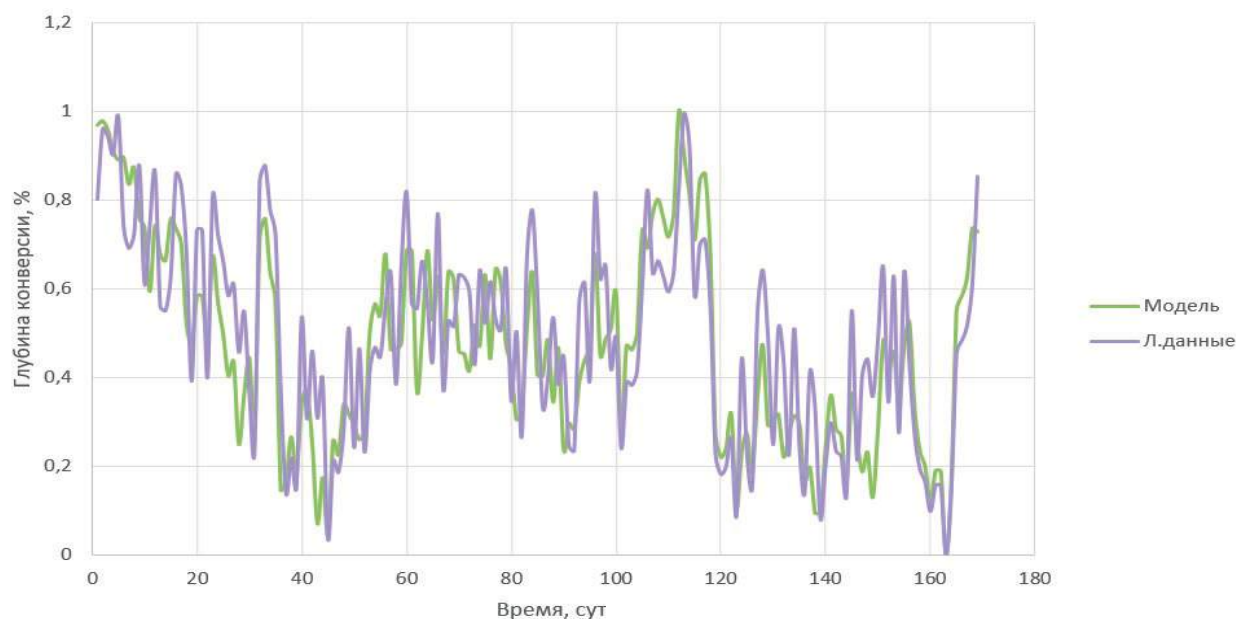


Рисунок 1. Сравнение полученной модели с лабораторными данными

Figure 1. Comparison of the obtained model with laboratory data

учетом погрешности обеспечения заданного значения конверсии (определяется регламентом технологического процесса).

2. В случае, если глубина конверсии превышает заданное значение, осуществляется переход к шагу 4.

3. Если глубина конверсии ниже заданного значения, осуществляется переход к шагу 5.

4. Температура ввода сырья в реактор уменьшается на величину малого приращения, после чего проверяется выполнение ограничения по регламентному температурному режиму. Если ограничение выполняется, рассчитывается глубина конверсии при новом значении температуры сырья реактора. В противном случае считается, что ресурс управления по реактору исчерпан.

5. Температура ввода сырья в реактор увеличивается на малую величину, определяемую экспертным путем (в пределах

0,5–1,5 °С). Затем проверяется выполнение ограничения по регламентному температурному режиму. Если ограничение выполняется, рассчитывается глубина конверсии при новом значении температуры сырья реактора. Если ограничение не выполняется, считается, что ресурс управления по реактору исчерпан.

Для проверки работоспособности алгоритма была выполнена программно-техническая реализация информационно-измерительной и управляющей системы гидрирования ацетилена. В качестве значений технологических параметров использовалась ретроспективная база данных из архивов предприятия. Повышение эффективности процесса гидрирования ацетилена за счет регулирования температуры сырья с применением виртуальных анализаторов степени конверсии ацетилена в интервале 10 сут оценивается в 3 %.

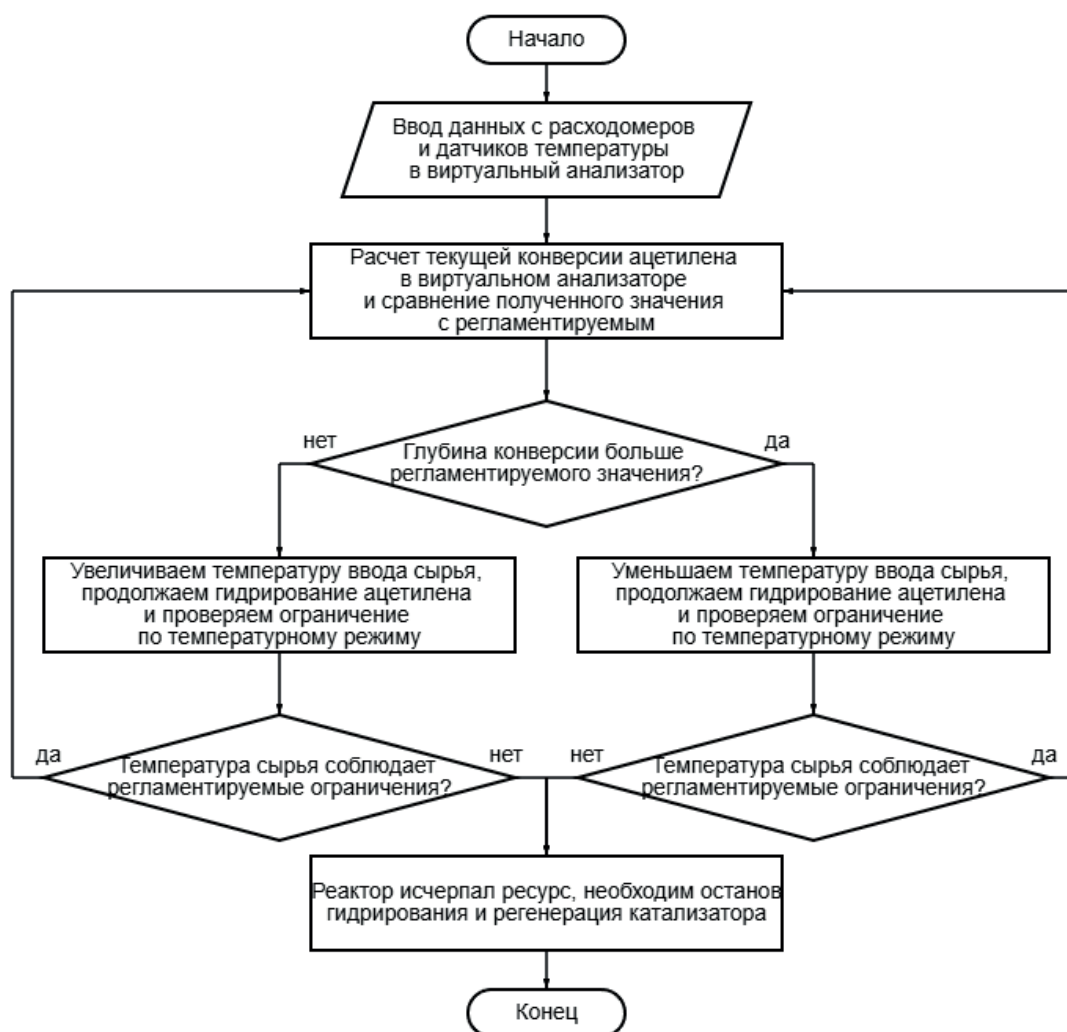


Рисунок 2. Блок-схема предложенного алгоритма управления процессом гидрирования ацетилена

Figure 2. Block diagram of the proposed algorithm for controlling the acetylene hydrogenation process

Выводы

В результате проведенных исследований разработано алгоритмическое обеспечение для информационно-измерительной и управляющей системы процесса гидрирования ацетилена. Основные достижения включают создание виртуального анализатора конверсии ацетилена, построенного с использованием генетического алгоритма. Применение ГА позволило учитывать изменения технологического процесса за счёт адаптивности и гибкости генетического подхода. На основе данных, пред-

ставляемых виртуальным анализатором, разработан алгоритм управления, который обеспечивает непрерывный контроль и регулирование технологического процесса. Это позволило минимизировать отклонения от оптимальных условий, а также оптимизировать технологический процесс. Разработанное алгоритмическое обеспечение позволяет значительно повысить эффективность процесса гидрирования ацетилена и создать предпосылки для дальнейшей оптимизации систем автоматизации.

Список источников

1. Kryshko K.A., Bashirov M.G., Khafizov A.M. Coking Control System Acetylene Hydrogenation Catalyst in Ethane-Ethylene Fraction // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2022. No. 2 (630). P. 38-41. DOI: 10.32935/0023-1169-2022-630-2-38-41. EDN: EKWCSX.
2. Глыздова Д.В., Афонасенко Т.Н., Теме-рев В.Л., Шляпин Д.А. Гидрирование ацетилена на PD-ZN/сибунит-катализаторе: влияние растворителя и монооксида углерода // *Нефтехимия*. 2021. Т. 61. № 3. С. 388-396. DOI: 10.31857/S0028242121030102.
3. Стыценко В.Д., Мельников Д.П. Селективное гидрирование диеновых и ацетиленовых соединений на металлсодержащих катализаторах // *Журнал физической химии*. 2016. С. 691-702. DOI: 10.7868/S0044453716040300. EDN: VVGEVB.
4. Jun-Nan Li, Min Pu, Chi-Cheng Ma, Ye Tian, Jing He, David G. Evans The Effect of Palladium Clusters (Pdn, n = 2 – 8) on Mechanisms of Acetylene Hydrogenation: A DFT Study // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. July, 2012. Vol. 359. P. 14-20. DOI: 10.1016/j.molcata.2012.03.015.
5. Stacchiola D., Calaza F., Zheng T., Tysoe W.T. Hydrocarbon Conversion on Palladium Catalysts // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 16 March, 2005. Vol. 228. Issues 1–2. P. 35-45. DOI: 10.1016/j.molcata.2004.09.064.
6. Веревкин А.П., Муртазин Т.М., Линецкий Р.М., Хусниязов М.Х. Оптимизация управления технологическими процессами переработки нефти по показателям технико-экономической эффективности (на примере висбрекинга гудрона) // *Территория «Нефтегаз»*. 2013. № 5. С. 18-22.
7. Веревкин А.П., Денисов С.В., Муртазин Т.М., Устюжанин К.Ю. Подготовка данных для построения виртуальных анализаторов в задачах усовершенствованного управления // *Автоматизация в промышленности*. 2019. № 3. С. 12-17. EDN: ZMBQDR.
8. Шварев Е.В., Сиротина Е.В., Крышко К.А., Баширов М.Г., Хафизов А.М. Применение генетического алгоритма для определения фактического состояния катализаторов // *Южно Сибирский научный вестник*. 2020. № 6. С. 167-169. EDN: SHZLJL.
9. Тугашова Л.Г. Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2013. № 3, Т. 9. С. 91-103. EDN: RPFHJL.
10. Диго Г.Б., Диго Н.Б., Можаровский И.С., Торгашов А.Ю. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации // *Моделирование систем*. 2011. № 4 (30). С. 384-387.
11. Веревкин А.П., Муртазин Т.М., Денисов С.В., Кирюшин О.В. Управление процессом каталитического риформинга по показателям технико-экономической эффективности // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. 2020. № 12. С. 10-14. EDN: ZYLUVB.

References

1. Kryshko K.A., Bashirov M.G., Khafizov A.M. Coking Control System Acetylene Hydrogenation Catalyst in Ethane-Ethylene Fraction. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2022, No. 2 (630), pp. 38-41. DOI: 10.32935/0023-1169-2022-630-2-38-41. EDN: EKWCSX.
2. Glyzdova D.V., Afonassenko T.N., Temerev V.L., Shlyapin D.A. Gidrirovaniye atsetilena na PD-ZN/sibunit-katalizatore: vliyanie rastvoritelya i monooksida ugleroda [Hydrogenation of Acetylene on PD-ZN/Sibunit Catalyst: the Effect of Solvent and Carbon Monoxide]. *Neftekhimiya — Petrochemistry*, 2021, Vol. 61, No. 3, pp. 388-396. DOI: 10.31857/S0028242121030102. [in Russian].
3. Stytsenko V.D., Mel'nikov D.P. Selektivnoe gidrirovaniye dienovykh i atsetilenovykh soedinenii na metallsoderzhashchikh katalizatorakh [Selective Hydrogenation of Dienic and Acetylenic Compounds on Metal-Containing Catalysts]. *Zhur-nal fizicheskoi khimii — Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2016, pp. 691-702. DOI: 10.7868/S0044453716040300. EDN: VVGEVB. [in Russian].
4. Jun-Nan Li, Min Pu, Chi-Cheng Ma, Ye Tian, Jing He, David G. Evans The Effect of Palladium Clusters (Pdn, n = 2 – 8) on Mechanisms of Acetylene Hydrogenation: A DFT Study. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, July, 2012, Vol. 359, pp. 14-20. DOI: 10.1016/j.molcata.2012.03.015.
5. Stacchiola D., Calaza F., Zheng T., Tysoe W.T. Hydrocarbon Conversion on Palladium Catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 16 March, 2005, Vol. 228, Issues 1–2, pp. 35-45. DOI: 10.1016/j.molcata.2004.09.064.
6. Verevkin A.P., Murtazin T.M., Linetskii R.M., Khusniyarov M.Kh. Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami pererabotki nefti po pokazatelyam tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti (na primere visbrekinga gudrona) [Optimization of Control Technological Oil Refining Processes according to Indices of

Technical and Economic Efficiency (on the Example of Tar Viscosity Breaking)]. *Territoriya «Neftegaz» — Neftegaz Territory*, 2013, No. 5, pp. 18-22. [in Russian].

7. Verevkin A.P., Denisov S.V., Murtazin T.M., Ustyuzhanin K.Yu. Podgotovka dannykh dlya postroeniya virtual'nykh analizatorov v zadachakh usovershenstvovannogo upravleniya [Data Preparation for Building Virtual Analyzers in Advanced Control Tasks]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti — Automation in Industry*, 2019, No. 3, pp. 12-17. EDN: ZMBQDR. [in Russian].

8. Shvarev E.V., Sirotina E.V., Kryshko K.A., Bashirov M.G., Khafizov A.M. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya opredeleniya fakticheskogo sostoyaniya katalizatorov [Application of the Genetic Algorithm for Definitions of the Actual State Catalysts]. *Yuzhno Sibirskii nauchnyi vestnik — South-Siberian Scientific Bulletin*, 2020, No. 6, pp. 167-169. EDN: SHZLJL. [in Russian].

9. Tugashova L.G. Virtual'nye analizatory pokazatelei kachestva protsessa rektifikatsii [Virtual Analyzers Indicators of the Quality of the Rectification Process]. *Elektrotekhnicheskie i informa-*

tsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems, 2013, No. 3, Vol. 9, pp. 91-103. EDN: RPFHJL. [in Russian].

10. Digo G.B., Digo N.B., Mozharovskii I.S., Torgashov A.Yu. Issledovanie modelei virtual'nykh analizatorov massoobmennogo tekhnologicheskogo protsessa rektifikatsii [Investigation of Models of Virtual Analyzers of the Mass Transfer Technological Process of Rectification]. *Modelirovanie sistem — Modeling of Systems*, 2011, No. 4 (30), pp. 384-387. [in Russian].

11. Verevkin A.P., Murtazin T.M., Denisov S.V., Kiryushin O.V. Upravlenie protsessom kataliticheskogo riforminga po pokazatelyam tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti [Process Control of a Catalytic Reforming on Parameters of Technical and Economic Efficiency]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt — Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Best Practices*, 2020, No. 12, pp. 10-14. EDN: ZYLUVB. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 27.11.2024.

The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 18.11.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Научная статья

УДК 681.518

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-92-99

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ГИДРИРОВАНИЯ АЦЕТИЛЕНА

**Мусса Гумерович Баширов****Mussa G. Bashirov**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный
нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

**Константин Алексеевич Крышко****Konstantin A. Kryshko**

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

**Алик Мусаевич Хафизов****Alik M. Khafizov**

кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры
«Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный
нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Актуальность

Развитие информационно-измерительной и управляющей системы производства этилена в России имеет ключевое значение для обеспечения эффективности, безопасности и конкурентоспособности химической промышленности. Этилен является базовым продуктом нефтехимической отрасли, из него производят множество товаров, включая пластмассы, синтетические каучуки и химические волокна. Именно поэтому оптимизация данного производства напрямую влияет на экономику и технологическое развитие нефтехимической отрасли. В эпоху информационных технологий важно развивать не только технологические аспекты в нефтехимической отрасли, но и уделять внимание развитию информационно-измерительных систем управления технологическими процессами. Одной из сторон улучшения информационно-измерительной и управляющей системы объекта является программно-техническая модернизация.

Цель исследований

Повышение конверсии ацетилена путем совершенствования информационно-измерительной системы управления процессом гидрирования ацетилена.

Ключевые слова

информационно-измерительная и управляющая система, распределенная система управления, производство этилена, гидрирование ацетилена, автоматизация процесса

Методы исследований

В ходе исследований проведен анализ научной и технической литературы, посвященной программно-техническим аспектам разработки информационно-измерительных и управляющих систем для нефтехимических процессов. Применялись методы статистического анализа данных параметров технологического процесса, а также современные подходы к программной разработке, включая программирование функциональными блоками и использование специализированных инструментов моделирования.

Результаты

Разработано программное обеспечение для информационно-измерительной и управляющей системы гидрирования ацетилена с применением виртуальных анализаторов и архивных данных с действующего реактора гидрирования ацетилена.

Для цитирования: Баширов М. Г., Крышко К. А., Хафизов А. М. Программно-техническая реализация информационно-измерительной и управляющей системы процесса гидрирования ацетилена // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 92-99. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-92-99>.

Original article

SOFTWARE AND TECHNICAL IMPLEMENTATION OF THE INFORMATION MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE ACETYLENE HYDROGENATION PROCESS

Relevance

The development of an information measuring and control system for ethylene production in Russia is of key importance for ensuring the efficiency, safety and competitiveness of the chemical industry. Ethylene is a basic product of the petrochemical industry, and many products are made from it, including plastics, synthetic rubbers and chemical fibers. That is why the optimization of this production directly affects the economy and technological development of the petrochemical industry. In the era of information technology, it is important to develop not only technological aspects in the petrochemical industry, but also to pay attention to the development of information and measurement systems for process control. One of the aspects of improving the information and measurement and control system of the facility is software and technical modernization.

Aim of research

Increasing acetylene conversion by improving the information and measurement system for controlling the acetylene hydrogenation process.

Research methods

In the course of the research, an analysis of scientific and technical literature devoted to software and technical aspects of the development of information measuring and control systems for petrochemical processes was carried out. Methods of statistical analysis of process parameter data were used, as well as modern approaches to software development, including programming with functional blocks and the use of specialized modeling tools.

Results

Software has been developed for an information-measuring and control system for acetylene hydrogenation using virtual analyzers and archived data from an active acetylene hydrogenation reactor.

Keywords

information measuring and control system, distributed control system, ethylene production, acetylene hydrogenation, process automation

For citation: Bashirov M. G., Kryshko K. A., Khafizov A. M. Programmno-tehnicheskaya realizatsiya informatsionno-izmeritel'noy i upravlyayushchey sistemy protsessa gidrirovaniya atsetilena [Software and Technical Implementation of the Information Measuring and Control System of the Acetylene Hydrogenation Process]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 92-99 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-92-99>.

Введение

Современные технологии управления химическими процессами требуют разработки интеллектуальных решений, которые способны обеспечить высокую степень автоматизации, точность управления и оперативный контроль над технологическими параметрами [1]. Одним из важнейших процессов в химической промышленности является процесс гидрирования ацетилена, который играет ключевую роль в производстве этилена — основного компонента для синтеза полимеров и других ценных продуктов.

Информационно-измерительные и управляющие системы являются неотъемлемой частью автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Они обеспечивают сбор, обработку и анализ данных, а также реализацию управляющих воздействий на основе измеренной информации. Процесс гидрирования ацетилена, характеризующийся экзотермической реакцией, требует особенно тщательного контроля температуры, давления и концентрации реагентов, что делает совершенствование информационно-измерительной и управляющей системы для этой задачи особенно актуальной.

Технология гидрирования ацетилена представляет собой сложный многоступенчатый процесс, в ходе которого ацетилен взаимодействует с водородом в присутствии катализатора. Основная задача при этом состоит в обеспечении избирательности реакции — полного превращения ацетилена в этилен при минимизации побочных реакций, таких как образование этана. Успешная реализация этой задачи невозможна без точ-

ной и оперативной информации о текущем состоянии процесса, что требует использования своевременных расчетов и управляющих воздействий со стороны программного обеспечения (ПО) [2].

Разработка программно-технических решений для технологического процесса гидрирования ацетилена включает несколько ключевых этапов: проектирование системы, разработка логики системы и визуализация в виде пользовательского интерфейса [3].

Основная часть

Основой для разработки программно-технического решения послужила задача интеграции ранее разработанного виртуального анализатора в действующую информационно-измерительную систему управления процессом гидрирования ацетилена. Виртуальный анализатор, разработанный на основе результатов предыдущих исследований [4, 5], представляет собой перспективный инструмент для оценки конверсии ацетилена в режиме реального времени. Его внедрение позволяет автоматизировать обработку данных и создать условия для более детального анализа химического процесса. Однако для его успешного применения в системе управления гидрированием ацетилена потребовалась разработка адаптированной архитектуры программного обеспечения и технической реализации. Основной целью данной работы стало создание комплексного решения, обеспечивающего интеграцию виртуального анализатора в программно-аппаратную среду для его использования в реальных условиях эксплуатации.

Разработка программного обеспечения начиналась с проектирования системы в виде архитектуры ПО. На рисунке 1 представлены основные элементы архитектуры и их связи.

Всю архитектуру можно разбить на три модуля.

Первым модулем выступает информационно-измерительная система. Она отвечает за сбор, передачу и обработку данных о состоянии объекта управления. Включает первичные измерительные приборы и преобразователи сигналов.

Второй модуль — управляющая система. Обеспечивает обработку данных, принятие решений и выдачу управляющих воздействий. Включает программируемый логический контроллер и алгоритм управления. С контроллера сигнал поступает в блок алгоритма управления процессом и параллельно на человеко-машинные интерфейсы (HMI), где операторы следят за технологическим процессом. Алгоритм управления основывается на результатах расчетов виртуального анализатора. Виртуальный анализатор конверсии ацетилена выполняет оценку в режиме реального време-

мени, от этого выбирается величина регулирования управляющего воздействия — температуры смеси этан-этиленовой фракции (ЭЭФ) и водородсодержащих газов (ВСГ).

Третий модуль использует клапаны-регуляторы и выполняет управляющие воздействия на объект — система исполнительных механизмов.

Далее выполнено построение логики информационно-измерительной и управляющей системы. Данный этап осуществлялся с использованием инструментов разработки распределенных систем управления (PCU) технологическим объектом. В разработанной PCU используется графический язык программирования, известный как язык функциональных блоков (Function Block Diagram, FBD) [6].

При разработке логики системы использовались следующие функциональные блоки управления:

- блоки индикатора входа (PVI);
- блок установки соотношения (RATIO);
- блок вычислений (CALCU);
- блок PID.

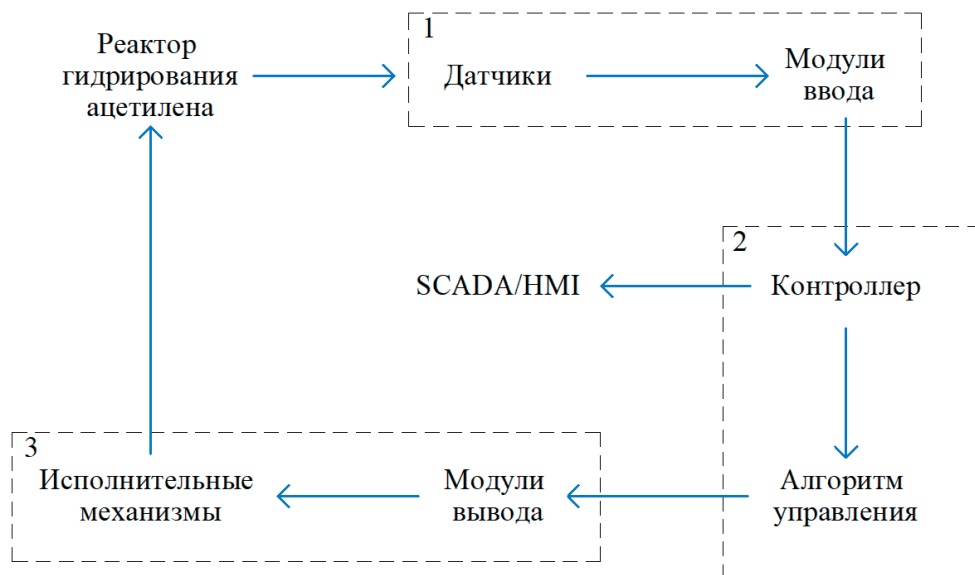


Рисунок 1. Архитектура информационно-измерительной и управляющей системы гидрирования ацетилена

Figure 1. Architecture of the information, measurement and control system for acetylene hydrogenation

Блок PVI используется в качестве связующего звена между физическими измерениями на объекте и логикой управления, реализуемой в системе управления. Этот блок используется для получения и предварительной обработки входных данных, таких как значения температуры, давления и расхода веществ, поступающих от датчиков. Такие данные представлены в виде переменной процесса (PV).

Блок RATIO используется для выполнения пропорционального расчета, когда требуется поддерживать постоянное соотношение между переменными технологического процесса. Основная задача блока RATIO заключается в расчете выходного сигнала на основе заданного коэффициента соотношения и входного сигнала. Блок принимает входной сигнал, который поступает от датчика расхода и умножает его на заданный коэффициент, формируя выходное значение. Это позволяет регулировать смещение потоков этан-этиленовой фракции и водородсодержащих газов.

Блок CALCU предназначен для выполнения различных математических и логических операций над данными технологического процесса. Этот блок позволяет пользователю задавать произвольные выражения или алгоритмы для обработки входных данных. Одной из особенностей CALCU является возможность работы с несколькими входными сигналами одновременно. Входные данные могут поступать из других блоков системы, таких как PVI или RATIO. Кроме того, этот блок выполняет пользовательские расчеты в реальном времени.

ПИД-регулятор является основным средством управления динамической моделью. Регулятор поддерживает значение переменной PV таким образом, чтобы текущее значение переменной технологического процесса оставалось на установленном значении (SV) или

изменялось согласно заданному закону регулирования.

После выбора типов используемых блоков осуществили их настройку и установили связи между функциональными блоками. Для блоков PID, PVI и RATIO воспользовались стандартными настройками, в то время как для блока CALCU указали персональные настройки.

Перечень настроек для блока PID:

- коэффициент пропорционального закона регулирования;
- коэффициент интегрального закона регулирования;
- коэффициент дифференциального закона регулирования;
- скорость обновления регулятора;
- ограничения пределов диапазонов для выходного сигнала регулятора.

Перечень настроек для блока PVI:

- тип входного сигнала;
- диапазон измерений входного сигнала;
- фильтрации сигнала для устранения шумов;
- установки ограничений и аварийных значений технологических параметров;
- настройка времени дискретизации.

Перечень настроек для блока RATIO:

- определение входных каналов;
- настройка коэффициента деления;
- выбор «постоянного» режима работы.

В качестве настроек блоков типа CALCU использовались результаты выполненных регрессионных анализов. Для реализации технологического процесса в реакторе были выполнены регрессии технологических параметров, участвующих в системе управления процессом [7]. При выполнении регрессионных анализов использовалась выборка технологических параметров, полученных с действующего реактора гидрирования ацетилена.

Помимо разработанных архитектуры и логики информационно-измерительной и управляющей системы предложен расширенный вариант мнемосхемы реактора (рисунок 2). Графические интерфейсы и системы визуализации данных необходимы операторам в центральном пункте управления для того, чтобы быстро оценивать текущую ситуацию на производстве. Операторы получают доступ к интерактивным моделям процесса, что дает возможность проводить детальный анализ и принимать обоснованные решения.

В качестве основы для разработанной мнемосхемы была использована мнемосхема действующего реактора гидрирования ацетилена. Расширение заключается в отображении показаний виртуальных анализаторов на мнемосхеме реактора. Наряду с отображением датчиков технологического процесса (массовые расходы веществ, температуры реакции, давление процесса и анализаторы качества), на реакторе указаны виртуальные анализаторы U_1 , U_2 , U_3 по слоям соответственно.

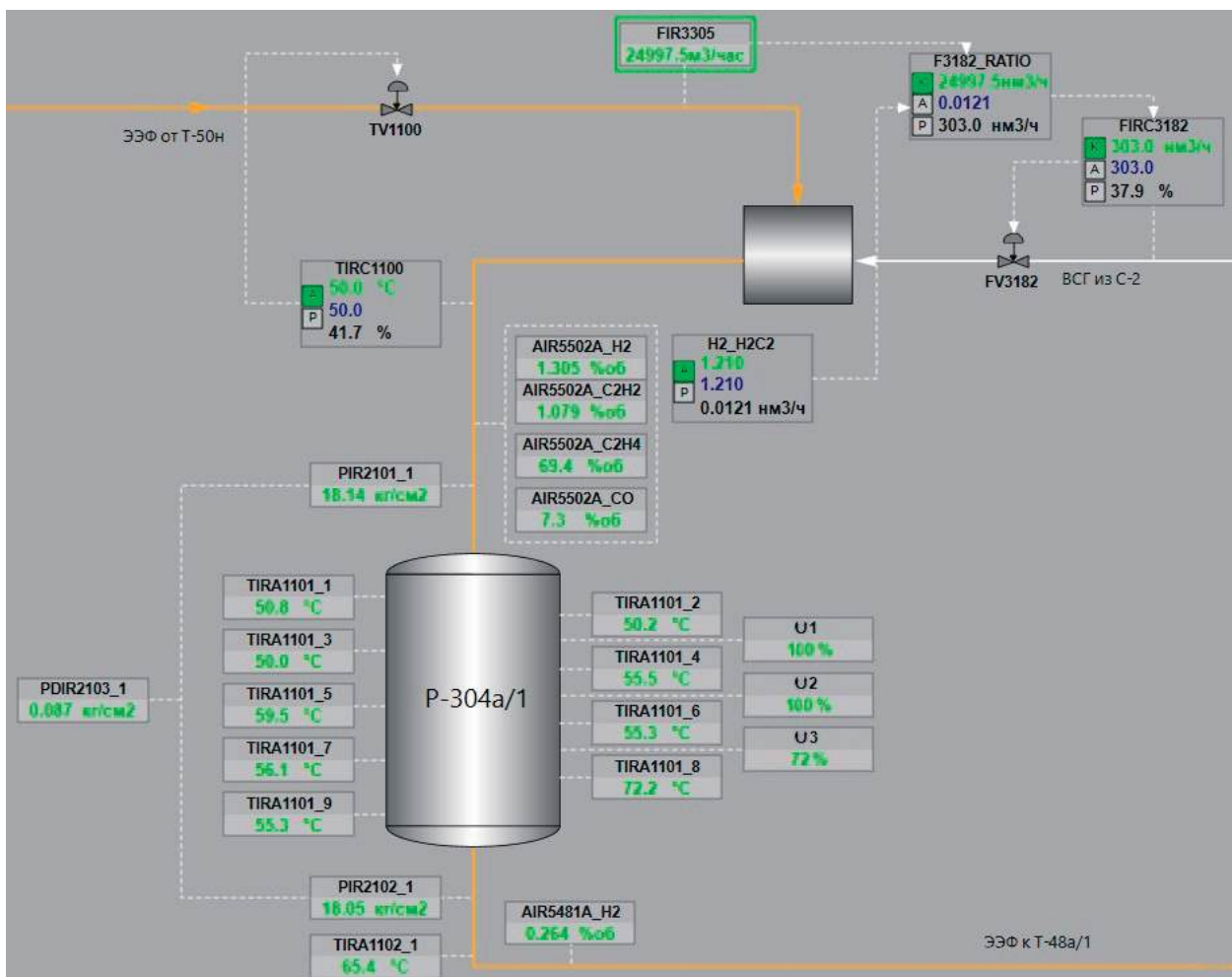


Рисунок 2. Мнемосхема информационно-измерительной и управляющей системы гидрирования ацетилена

Figure 2. Mnemonic diagram of the information-measuring and control system of acetylene hydrogenation

Выводы

В результате проведённых исследований разработано программное обеспечение для информационно-измерительной системы управления процессом гидрирования ацетилена. Основное внимание уделено созданию архитектуры системы, организации связей между функциональными блоками, реализованными в виде функциональных блоков, и созданию интерфейса. Разработка архитектуры обеспечила модульную структуру, способствующую удобству масштабирования и модификации системы. Связь между функциональными блоками FBD была организована с учетом минимизации задержек при передаче данных. Реализованная мнемосхема является удобной и интуитивно понятной из-за использования минимально необходимого набора элементов. Повышение

качества продукции технологических процессов возможно не только совершенствованием непосредственно технологии процесса, но и совершенствованием информационно-измерительных систем управления технологическими процессами. При интегрировании полученного программного обеспечения в действующую информационно-измерительную и управляющую систему реактора гидрирования ацетилена можно отслеживать конверсию ацетилена в режиме реального времени, что позволит усовершенствовать систему управления и повысить эффективность производственного процесса. Повышение эффективности процесса гидрирования ацетилена за счет применения виртуальных анализаторов степени конверсии ацетилена в интервале 10 сут оценивается в 3 %.

Список источников

1. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (АРС): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 12-19. EDN: PNCDID.

2. Малышкин А.Б. Проблемы и перспективы автоматизации технологических процессов на нефтехимических предприятиях // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5 (47). Ч. 3. С. 134-137. DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.097. EDN: VXMFBVH.

3. Пустовая О.А., Пустовой Е.А. Информационно-измерительные системы и АСУ ТП. М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 104 с. ISBN 978-5-9729-0829-5. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1903131> (дата обращения: 06.12.2024).

4. Kryshko K.A., Bashirov M.G., Khafizov A.M. Coking Control System Acetylene Hydrogenation Catalyst in Ethane-Ethylene Fraction // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2022. No. 2 (630). P. 38-41. DOI: 10.32935/0023-1169-2022-630-2-38-41. EDN: EKWCSX.

5. Сиротина Е.В., Шварев Е.В., Крышко К.А., Баширов М.Г., Хафизов А.М. Реализация системы усовершенствованного управления производства этилен-пропилена на базе Yokogawa

Centum VP // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 6. С. 163-166. EDN: ABERUT.

6. Distributed Control System (DCS) Centum VP [Электронный ресурс]. URL: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/control-system/distributed-control-systems-dcs/centum-vp/#Details> (дата обращения: 06.12.2024).

7. Веревкин А.П., Денисов С.В., Муртазин Т.М., Устюжанин К.Ю. Подготовка данных для построения виртуальных анализаторов в задачах усовершенствованного управления // Автоматизация в промышленности. 2019. № 3. С. 12-17. EDN: ZMBQDR.

References

1. Dozortsev V.M., Itskovich E.L., Kneller D.V. Usovershenstvovannoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami (ARS): 10 let v Rossii [Advanced Process Control (APC): 10 Years in Russia]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti — Automation in Industry*, 2013, No. 1, pp. 12-19. EDN: PNCDID. [in Russian].

2. Malyshkin A.B. Problemy i perspektivy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov na neftekhimicheskikh predpriyatiyakh [Problems and Prospectives Technological Process Automation at Petrochemical Plants]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal — International Research Journal*, 2016, No. 5 (47), Ch. 3, pp. 134-137.

DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.097. EDN: VXMFBVH. [in Russian].

3. Pustovaya O.A., Pustovoi E.A. *Informatsionno-izmeritel'nye sistemy i ASU TP* [Information and Measurement Systems and Automated Control Systems]. M.-Vologda, Infra-Inzheneriya, 2022, 104 p. ISBN 978-5-9729-0829-5. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1903131> (accessed 06.12.2024). [in Russian].

4. Kryshko K.A., Bashirov M.G., Khafizov A.M. Coking Control System Acetylene Hydrogenation Catalyst in Ethane-Ethylene Fraction. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2022, No. 2 (630), pp. 38-41. DOI: 10.32935/0023-1169-2022-630-2-38-41. EDN: EKWCSX.

5. Sirotina E.V., Shvarev E.V., Kryshko K.A., Bashirov M.G., Khafizov A.M. Realizatsiya sistemy usovershenstvovannogo upravleniya proizvodstva etilen-propilena na baze Yokogawa Centum VP

[Implementation of the Advanced Management System for Ethylene-Propylene Production Based on Yokogawa Centum VP]. *Yuzhno Sibirskii nauchnyi vestnik — South-Siberian Scientific Bulletin*, 2020, No. 6, pp. 163-166. EDN: ABEPUT. [in Russian].

6. *Distributed Control System (DCS) Centum VP* [Electronic Resource]. URL: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/control-system/distributed-control-systems-dcs/centum-vp/#Details> (accessed 06.12.2024).

7. Verevkin A.P., Denisov S.V., Murtazin T.M., Ustyuzhanin K.Yu. Podgotovka dannykh dlya postroeniya virtual'nykh analizatorov v zadachakh usovershenstvovannogo upravleniya [Data Preparation for Building Virtual Analyzers in Advanced Control Tasks]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti — Automation in Industry*, 2019, No. 3, pp. 12-17. EDN: ZMBQDR. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 27.11.2024.

The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 18.11.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Научная статья

УДК 004.9

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-100-108

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ПРЕДПОЛЕТНОЙ ПОДГОТОВКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА



Юрий Александрович Жаринов

Yuri A. Zharinov

кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных технологий
Института нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Руслан Рустамович Латыпов

Ruslan R. Latypov

студент кафедры информационных технологий
Института нефтепереработки и нефтехимии,
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Актуальность

Использование виртуальной реальности в обучении объясняется её способностью значительно повысить вовлеченность в учебный процесс и его эффективность. Виртуальная реальность создает моделируемую среду, где стажеры могут безопасно практиковать навыки и сценарии, что особенно важно при обучении сложным или опасным операциям, таким как управление тяжелой техникой или беспилотными летательными аппаратами. Исследования показали, что обучение в виртуальной реальности увеличивает качество усвоения материала, снижает производственный травматизм и ускоряет адаптацию сотрудников. С увеличением числа беспилотных летательных аппаратов в России применение виртуальной реальности в обучении их управлению становится всё более значимым и востребованным, подчеркивая необходимость эффективных методов подготовки.

Цель исследований

Основной целью работы является повышение эффективности процесса обучения предполетной подготовке беспилотного летательного аппарата за счет разработки виртуального тренажера.

Методы исследования

Были задействованы следующие методы: обзор научной литературы, анализ использования существующих методов виртуальности реальности в образовании.

Результаты

Результатом выполненной работы являются обоснование необходимости использования и последующая разработка виртуального тренажера, способствующего стандартизации обучения и уменьше-

Ключевые слова

виртуальный тренажер, беспилотный летательный аппарат, предполетная подготовка, среда разработки, язык программирования, трехмерная модель, приложение, база данных, процесс, обучение

нию числа ошибок, допускаемых при предполетной подготовке беспилотного летательного аппарата и тем самым сокращению расходов, возникающих вследствие данных ошибок. Произведены поиск и анализ существующих аналогов программного продукта, осуществлен выбор средств разработки и, как итог, создан виртуальный тренажер.

Для цитирования: Жаринов Ю. А., Латыпов Р. Р. Разработка виртуального тренажера предполетной подготовки беспилотного летательного аппарата // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 100-108. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-100-108>.

Original article

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL SIMULATOR FOR PREFLIGHT TRAINING OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Relevance

The use of virtual reality in training is attributed to its ability to significantly increase engagement and effectiveness of the learning process. Virtual reality creates a simulated environment where trainees can safely practice skills and scenarios, which is especially important when learning complex or dangerous operations such as operating heavy machinery or drones. Studies have shown that virtual reality training increases the quality of learning, reduces workplace injuries, and speeds employee onboarding. With the increasing number of unmanned aerial vehicles in Russia, the use of virtual reality in training to operate them is becoming even more significant and in demand, emphasizing the need for effective training methods.

Aim of research

The main objective of the work is to improve the effectiveness of the preflight training process of an unmanned aerial vehicle by developing a virtual simulator.

Research methods

The following methods were involved: review of scientific literature, analyzing the use of existing virtual reality methods in education.

Results

The result of this work is the substantiation of the necessity of using and subsequent development of a virtual simulator, which contributes to the standardization of training and reducing the number of errors made during pre-flight training of unmanned aerial vehicles and thus reducing the costs arising from these errors. The existing analogs of the software product were searched and analyzed, development tools were selected and, as a result, the virtual simulator was created.

Keywords

virtual simulator, unmanned aerial vehicle, preflight training, development environment, programming language, three-dimensional model, application, database, process, training

For citation: Zharinov Yu. A., Latypov R. R. Razrabotka virtual'nogo trenazhera predpoletnoy podgotovki bespilotnogo letatel'nogo apparata [Development of a Virtual Simulator for Preflight Training of an Unmanned Aerial Vehicle]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 100-108 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-100-108>.

Виртуальная реальность представляет собой среду, которая воспроизводит искусственно созданный мир в цифровой форме с использованием технологических средств. Применение виртуальной реальности приводит к существенным изменениям в методах обучения. Благодаря интерактивному обучению обеспечивается высокий уровень вовлеченности и эффективности [1–5].

Экспертами «Аэронета» была выделена тенденция роста числа беспилотных летательных аппаратов в России. В 2021 г. было выпущено около 2500 аппаратов, а в 2022 г. этот показатель увеличился более чем до 5000 аппаратов (рисунок 1). Росавиация в настоящее время ведет учет более 70 000 гражданских беспилотных летательных аппаратов массой до 30 кг, а в 2022 г. было зарегистрировано 37 000 новых аппаратов [6].

Прогнозы аналитиков указывают на то, что доля беспилотных воздушных аппаратов типа коптеров будет продолжать демонстрировать тенденцию к росту [7]. Данные ожидания экспертов и текущая динамика объемов производ-

ства свидетельствуют о растущей значимости использования беспилотных летательных аппаратов в различных сферах, таких как геодезия, агробизнес, мониторинг и многие другие. Использование виртуальной реальности в обучении управлению беспилотными летательными аппаратами становится еще более актуальным, учитывая увеличение числа беспилотных аппаратов, и подчеркивает необходимость эффективных методов обучения предполетной подготовке беспилотного летательного аппарата.

Такие отрасли, как авиация, здравоохранение, оборона и производство всё чаще используют симуляторы виртуальной реальности для учебных целей [8, 9]. Однако при анализе рынка в сфере разработки тренажеров виртуальной реальности не было обнаружено прямых аналогов разрабатываемого программного продукта.

Рассмотрим декомпозицию процесса «Обучение предполетной подготовке беспилотного летательного аппарата» до внедрения виртуального тренажера (рисунок 2).

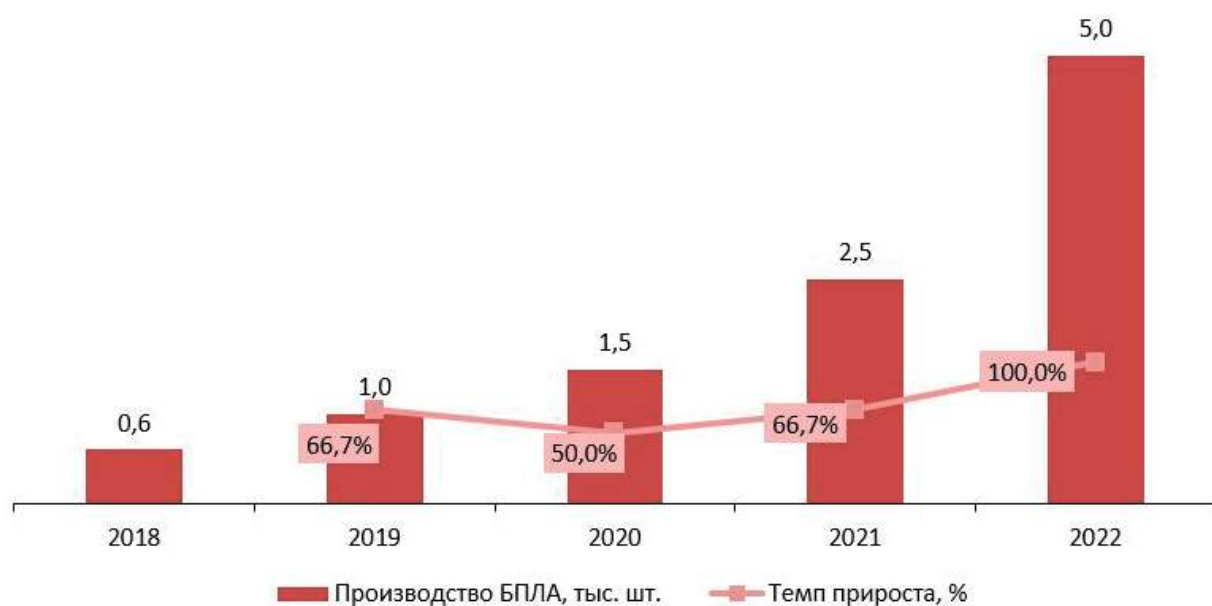


Рисунок 1. Динамика объемов производства беспилотных летательных аппаратов в России за 2018–2022 гг.

Figure 1. Dynamics of unmanned aerial vehicle production volumes in Russia for 2018–2022

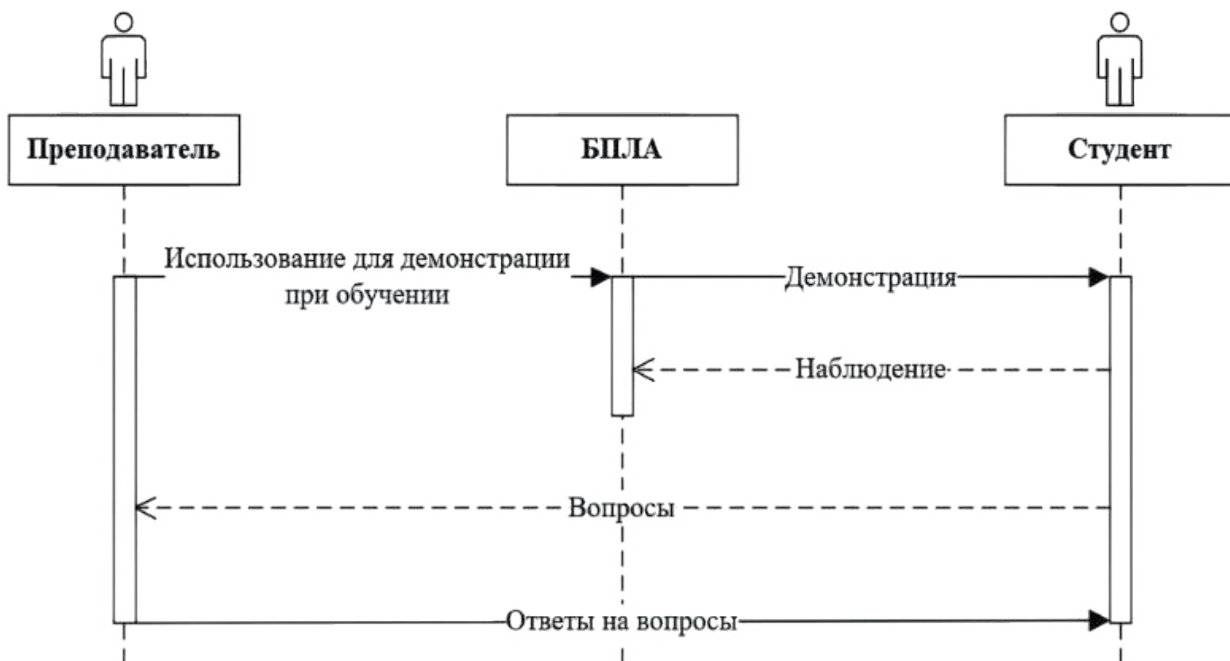


Рисунок 2. Диаграмма последовательности UML процесса «Обучение предполетной подготовке беспилотного летательного аппарата»

Figure 2. UML sequence diagram of the unmanned aerial vehicle pre-flight training process

При анализе данного процесса были выявлены два основных недостатка: отсутствие интерактивности и стандартизации при обучении. Внедрение разрабатываемого тренажера позволит устранить эти недостатки за счет интерактивного взаимодействия с беспилотным летательным аппаратом и его компонентами в виртуальном пространстве, а также внедрения стандартизированного подхода к обучению в тренажере.

Для создания тренажера была выбрана среда разработки Unity, программная часть написана на языке C# в Visual Studio, модели квадрокоптера и пульта управления смоделированы в редакторе Autodesk 3Ds Max [10–12]. Одним из решающих факторов выбора среды разработки Unity стало наличие большого числа готовых модулей, многие из которых распространяются по бесплатной лицензии, что значительно упрощает и ускоряет процесс разработки [13].

Тренажер является клиент-серверным приложением для Windows (рисунок 3). Это позволит получать информацию о

результатах как в самом тренажере, так и на отдельной веб-странице. Клиентская часть отвечает за взаимодействие с пользователем и отправку запросов на сервер для получения данных или выполнения определенных действий. Серверная часть отвечает за обработку запросов, полученных от клиентов, и обеспечивает доступ к различным ресурсам, таким как базы данных. В данном случае в роли клиента выступают обучающийся и преподаватель, взаимодействие происходит через очки виртуальной реальности и веб-страницу.

Первым этапом создания виртуального тренажера была подготовка среды разработки, включающей в себя: установку среды, установку редактора, выбор модулей, которые будут установлены вместе с редактором, получение лицензии, создание и первичную настройку проекта [14].

Следующим шагом разработки тренажера стало создание трехмерной модели беспилотного летательного аппарата и окружения. Для создания модели ква-

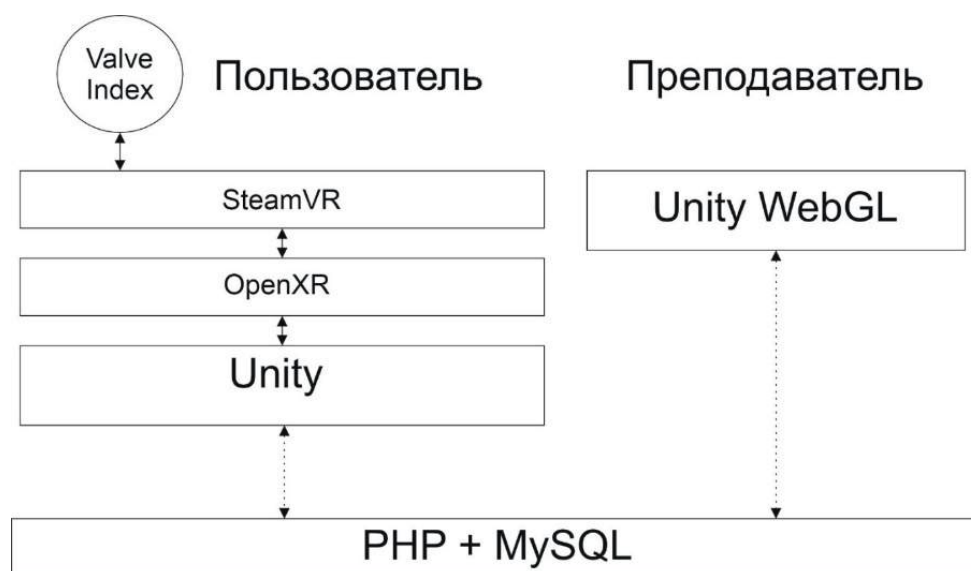


Рисунок 3. Архитектура виртуального тренажера

Figure 3. Architecture of the virtual simulator

дрокптера в руководстве пользователя были найдены чертежи аппарата, которые были перенесены в программу. Изображения были переведены в векторный формат, и по ним было начато моделирование квадрокоптера. Модель создавалась зеркальным методом. Итоговое число полигонов модели дрона составило 10640, что вполне соответствует стандартам low-poly моделирования. Следующим шагом стало создание UV развертки и текстурирование модели (рисунок 4).

Следующей необходимой трехмерной моделью была модель пульта управления, для ее создания был применен метод фотограмметрии. Фотограмметрия — процесс воссоздания физического объекта для изготовления точной трехмерной модели [15]. В модель необходимо было добавить состояния включенного и выключенного экрана. Это было реализовано с использованием двух различных текстур.

На следующем этапе разработки были заданы физические параметры всем объектам, перенесенным из среды моделирования трехмерных моделей. Для этого в проект был добавлен и использован

компонент Rigidbody. Далее все объекты были собраны в одной сцене и объединены в один префаб [16]. Помимо компонента Rigidbody в проект были также добавлены и настроены другие дополнительные модули и компоненты, необходимые для корректной работы тренажера и реализации всего задуманного функционала.

На заключительном этапе разработки созданы база данных и веб-страница, которые были размещены на хостинге и интегрированы в данный проект (рисунок 5).

В результате разработки был создан виртуальный тренажер предполетной подготовки, позволяющий проводить предполетную подготовку беспилотного летательного аппарата, фиксировать результаты выполнения в базе данных, предоставлять их как в самом виртуальном тренажере, так и на веб-странице с возможностью редактирования записей (рисунок 6).

После выполнения всех пунктов, необходимых для предполетной подготовки дрона, происходит завершение тренировки, результаты фиксируются в таблицу лидеров. Для удобства проверки

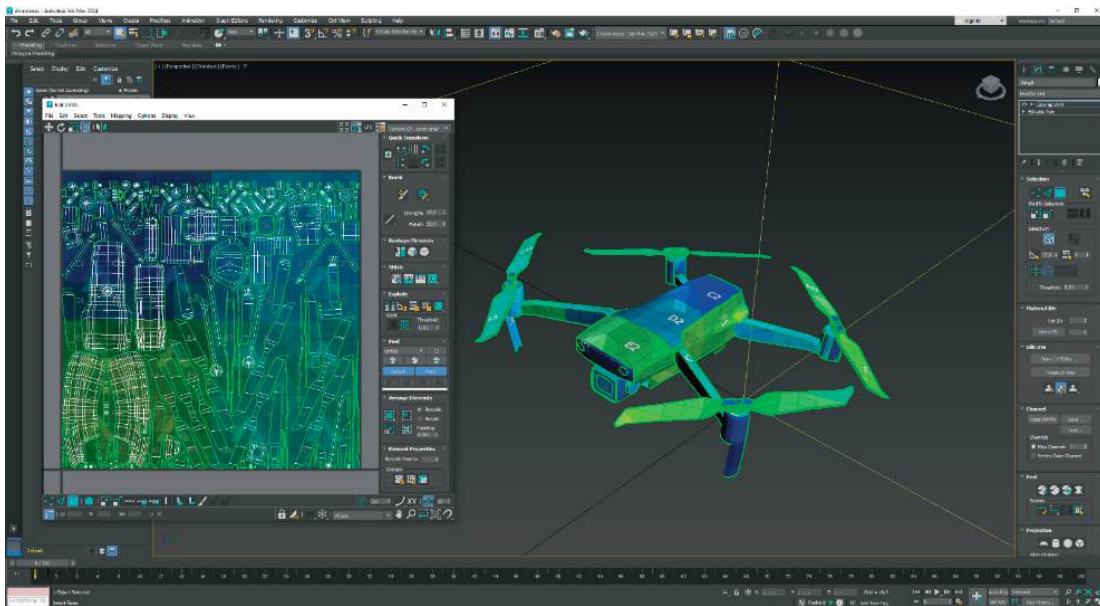


Рисунок 4. UV развертка модели

Figure 4. UV sweep of the model

Имя	Группа	Дата	Время	
Гость	Гость			
Руслан Латыпов	БАБ-20-21	2024-03-26	02:42	🗑️
Руслан Латыпов	БАБ-20-21	2024-03-26	03:14	🗑️
Руслан Латыпов	БАБ-20-21	2024-03-26	10:02	🗑️

Рисунок 5. Веб-страница с результатами тестирований

Figure 5. Web page with test results

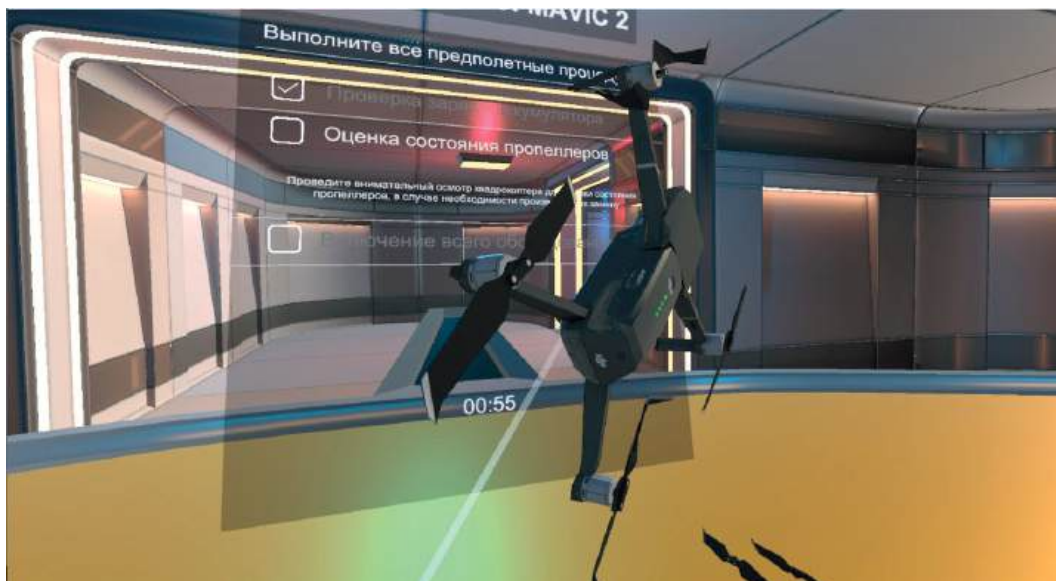


Рисунок 6. Процесс предполетной подготовки беспилотного летательного аппарата в разработанном тренажере

Figure 6. Unmanned aerial vehicle preflight training process in the developed simulator

необходимо было создать веб-форму таблицы результатов. Веб-приложение было размещено на хостинге, где ранее уже была размещена серверная часть разрабатываемого приложения. Для выполнения команд с сервера был добавлен файл скрипта на языке PHP (рисунок 7).

Интерфейс таблицы лидеров уже был реализован на Unity, в том числе сортировка и фильтр по маске. А так как данная среда разработки позволяет создавать мультиплатформенные приложения, возможно создание веб-приложения, используя те же исходные файлы. Для этого будет использован Unity WebGL.

```
<?php

$mysqli = new mysqli("localhost","*****","*****","test");

if ($mysqli -> connect_errno) {
    echo "Failed to connect to MySQL: " . $mysqli -> connect_error;
    exit();
}

if(isset($_REQUEST['name'])){
    $name = $_REQUEST['name'];
    $grp = $_REQUEST['grp'];
    $time = $_REQUEST['time'];
    $query = "INSERT INTO DJI(name,grp,date,time) VALUES ('$name',
        '$grp',now(),'$time')";

    $result = mysqli_query($mysqli, $query);
}

if(isset($_REQUEST['delete'])){
    $id = $_REQUEST['id'];
    $query = "DELETE FROM DJI WHERE ID = $id";

    $result = mysqli_query($mysqli, $query);
}

$query = "SELECT * FROM DJI";
$result = mysqli_query($mysqli, $query);

$json = mysqli_fetch_all ($result, MYSQLI_ASSOC);
echo json_encode($json, JSON_UNESCAPED_UNICODE);

?>
```

Рисунок 7. Скрипт на PHP

Figure 7. PHP script

Выводы

Обоснована необходимость использования и разработки виртуального тренажера, способствующего стандартизации обучения и уменьшению числа ошибок, допускаемых при предполетной подготовке беспилотного летательного аппара-

рата, а также сокращению расходов, возникающих вследствие данных ошибок. Произведены поиск и анализ существующих аналогов программного продукта, осуществлен выбор средств разработки, создан виртуальный тренажер.

Список источников

1. Кузнецов А.А. Виртуальная реальность в обучении: краткий обзор преимуществ метода // Международный журнал гуманитарных и естественных наук // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2022. № 7-1. С. 128-130. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-7-7-128-130.
2. Виртуальная реальность в образовании // ВШБИ НИУ ВШЭ [Электронный ресурс]. URL: <https://hsbi.hse.ru> (дата обращения: 14.02.2024).
3. Рахматуллаев А.Н. Технология виртуальной реальности // Молодой ученый. 2021. № 18 (360). С. 50-58. URL: <https://moluch.ru/archive/360/80615/>. EDN: IJVVII.
4. PwC's Study into the Effectiveness of VR for Soft Skills Training // PwC [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pwc.co.uk/issues/technology/immersive-technologies/study-into-vr-training-effectiveness.html> (дата обращения: 15.02.2024).
5. VR-тренажеры уменьшают число ошибок машинистов и ремонтных бригад // RZD. Digital [Электронный ресурс]. URL: <https://rzdigital.ru> (дата обращения: 01.02.2024).
6. Оценки рынка БПЛА // TAdviser [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tadviser.ru/a/341580> (дата обращения: 19.02.2024).
7. Рост производства беспилотных летательных аппаратов в России // ГидМаркет [Электронный ресурс]. URL: <https://gidmark.ru/news/rost-proizvodstva-bespilotnyih-letatelnyih-apparatov-v-rossii> (дата обращения: 19.02.2024).
8. Real Virtuality for Aircraft Inspection (ReVAI) Training System // LSCM [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lscm.hk/eng> (дата обращения: 19.02.2024).
9. Truck Preparation for Driving VR Training // Softonic [Электронный ресурс]. URL: <https://truck-preparation-for-driving-vr-training.en.softonic.com/> (дата обращения: 19.02.2024).
10. Худайбердиев С.А. Анализ самых актуальных серверных систем управления базами данных // Nazariy va amaliy tadqiqotlar xalqaro jurnali, 2023. № 5. С. 36-47. DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8159175>.
11. Прайс М.Д. С# 10 и .NET 6. Современная кросс-платформенная разработка. СПб.: Питер, 2023. 848 с. ISBN: 978-5-4461-2249-3.
12. Лакос Д. Современный C++: безопасное использование // М.: ДМК Пресс, 2022. 1042 с. ISBN: 978-5-93700-134-4.
13. Садыков М.Г. Использование Unity для разработки неигровых приложений // E-Scio. 2023. № 6.

14. Кирилов Н.А. Применение технологий виртуальной реальности в профессиональной подготовке специалистов в области геодезии // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2022. № 6. С. 28-38. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-6-28-38. EDN: JTGYII.

15. 3D-фотограмметрия: превращая фотографии в 3D-модели [Электронный ресурс] // Canon. URL: <https://www.canon.ru/pro/stories/3d-photogrammetry> (дата обращения: 20.03.2024).

16. Префабы (Prefabs) [Электронный ресурс] // Unity Documentation. URL: <https://docs.unity3d.com/ru/530/Manual/Prefabs.html> (дата обращения: 20.03.2024).

References

1. Kuznetsov A.A. Virtual'naya real'nost' v obuchenii: kratkii obzor preimushchestv metoda [Virtual Reality in Education: A Brief Overview of the Advantages of the Method]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk – International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2022, No. 7-1, pp. 128-130. DOI: 10.24412/2500-1000-2022-7-7-128-130. [in Russian].
2. *Virtual'naya real'nost' v obrazovanii* [Virtual Reality in Education]. HSBI HSE [Electronic Resource]. URL: <https://hsbi.hse.ru> (accessed 14.02.2024). [in Russian].
3. Rakhmatullaev A.N. Tekhnologiya virtual'noi real'nosti [Virtual Reality Technology]. *Molodoi uchenyi – Young Scientist*, 2021, No. 18 (360), pp. 50-58. URL: <https://moluch.ru/archive/360/80615/>. EDN: IJVVII. [in Russian].
4. *PwC's Study into the Effectiveness of VR for Soft Skills Training*. PwC [Electronic Resource]. URL: <https://www.pwc.co.uk/issues/technology/immersive-technologies/study-into-vr-training-effectiveness.html> (accessed 15.02.2024).
5. *VR-trenazhery umen'shayut chislo oshibok mashinistov i remontnykh brigad* [VR Simulators Reduce Errors by Drivers and Maintenance Crews]. RZD.Digital [Electronic Resource]. URL: <https://rzdigital.ru> (accessed 01.02.2024). [in Russian].
6. *Otsenki rynka BPLA* [UAV Market Estimates]. TAdviser [Electronic Resource]. URL: <https://www.tadviser.ru/a/341580> (accessed 19.02.2024). [in Russian].
7. *Rost proizvodstva bespilotnykh letatel'nykh apparatov v Rossii* [Growth of Drone Production in Russia]. GidMarket [Electronic Resource]. URL: <https://gidmark.ru/news/rost-proizvodstva-bespilotnyih-letatelnyih-apparatov-v-rossii> (accessed 19.02.2024). [in Russian].

8. *Real Virtuality for Aircraft Inspection (ReVAI) Training System*. LSCM [Electronic Resource]. URL: <https://www.lscm.hk/eng> (accessed 19.02.2024). [in Russian].
9. *Truck Preparation for Driving VR Training*. Softonic [Electronic Resource]. URL: <https://truck-preparation-for-driving-vr-training.en.softonic.com/> (accessed 19.02.2024). [in Russian].
10. Khudaiberdiev S.A. Analiz samykh aktual'nykh servernykh sistem upravleniya bazami dannykh [Analysing the Most Current Server-Based Database Management Systems]. *Nazariy va amaliy tadqiqotlar xalqaro jurnali*, 2023, No. 5, pp. 36-47. DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8159175>.
11. Prays M.D. *C# 10 i .NET 6. Sovremennaya kross-platfommennaya razrabotka* [C# 10 and .NET 6. Modern Cross-Platform Development]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2023. 848 p. ISBN: 978-5-4461-2249-3. [in Russian].
12. Lakos D. *Sovremennyyi C++: bezopasnoe ispol'zovanie* [Modern C++: Safe Use]. Moscow, DMK Press Publ., 2022. 1042 p. ISBN: 978-5-93700-134-4. [in Russian].
13. Sadykov M.G. Ispolzovaniye Unity dlya razrabotki neigrovykh prilozheniy [Using Unity to Develop Non-Gaming Applications] [Electronic Resource]. *E-Scio*, 2023, № 6. [in Russian].
14. Kirilov N.A. Primenenie tekhnologii virtual'noi real'nosti v professional'noi podgotovke spetsialistov v oblasti geodezii [The Use of Virtual Reality Technologies in the Training of Future Specialists in the Field of Geodesy]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii – Bulletin of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2022, No. 6, pp. 28-38. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-6-28-38. EDN: JTGYII. [in Russian].
15. *3D-fotogrammetriya: prevrashchaya fotografii v 3D-modeli* [3D Photogrammetry: Turning Photos into 3D Models]. Canon [Electronic Resource]. URL: <https://www.canon.ru/pro/stories/3d-photogrammetry> (accessed 20.03.2024). [in Russian].
16. *Prefaby* [Prefabs]. Unity Documentation [Electronic Resource]. URL: <https://docs.unity3d.com/ru/530/Manual/Prefabs.html> (accessed 20.03.2024). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 18.10.2024; одобрена после рецензирования 25.10.2024; принята к публикации 27.11.2024.

The article was submitted 18.10.2024; approved after reviewing 25.10.2024; accepted for publication 27.11.2024.

Научная статья

УДК 621.341

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-109-117

НАБЛЮДАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

*Олег Александрович Лысенко**Oleg A. Lysenko**кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электрическая техника»,
Омский государственный технический университет,
Омск, Россия*

Актуальность

Рассматривается синтез наблюдателя давления жидкости для насосной установки с асинхронным электроприводом. Данный тип электроприводов с центробежным насосом имеет широкое распространение в сельском и жилищно-коммунальном хозяйстве, промышленности и транспорте, что говорит об актуальности темы исследования. Данный электротехнический комплекс включает в себя источник электрической энергии, электрический двигатель, насос как исполнительный орган и технологический объект. Применение замкнутых обратных связей в регулируемых электроприводах насосных установок по контролю давления жидкости приводит к необходимости определения данной координаты. Данная задача может быть выполнена с помощью применения косвенных оценок давления с использованием наблюдателя Люенбергера на основе информации, получаемой с датчиков тока и напряжения асинхронного электропривода.

Цель исследования

Выполнить синтез наблюдателя давления насосной установки с асинхронным электроприводом.

Методы исследования

Для идентификации давления использовался наблюдатель Люенбергера. Проверка работоспособности синтезированного наблюдателя производилась с помощью имитационных моделей электропривода и наблюдателя в среде Simintech.

Результаты

Разработан наблюдатель давления электропривода насосной установки. Разработана имитационная модель электропривода насосной установки и наблюдателя давления в среде Simintech, позволяющая оценивать выходные координаты насоса в переходных режимах. Проведено сравнение величины оцениваемого давления, полученной с помощью синтезированного наблюдателя, с кривыми переходного процесса эталонного давления при изменении величины и частоты статорного напряжения, а также гидравлического сопротивления напорного трубопровода. В результате проведенной работы появилась возможность определять давление насоса по величинам тока и напряжения статора в динамике.

Ключевые слова

идентификация давления,
асинхронный двигатель,
трубопровод,
центробежный насос,
наблюдатель
Люенбергера

Для цитирования: Лысенко О. А. Наблюдатель давления насосной установки с асинхронным электроприводом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 109-117. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-109-117>.

Original article

PUMPING UNIT PRESSURE OBSERVER WITH ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

Relevance

The synthesis of a liquid pressure observer for a pumping unit with an asynchronous electric drive is considered. This type of electric drives with a centrifugal pump is widely used in agriculture and housing and communal services, industry, and transport, which indicates its relevance. This electrical engineering complex includes a source of electric energy, an electric motor, a pump as an executive body and a technological object. The use of closed feedback in adjustable electric drives of pumping units for monitoring liquid pressure leads to the need to determine this coordinate. This task can be accomplished by using indirect pressure estimates using the Luenberger observer, based on information obtained from current and voltage sensors of the asynchronous electric drive.

Aim of research

The main aim of the research perform a synthesis of a pressure observer for a pumping unit with an asynchronous electric drive.

Research methods

The Luenberger observer was used to identify the pressure. The performance of the synthesized observer was tested using simulation models of the electric drive and the observer in the Simintech environment.

Results

A pressure observer for the electric drive of a pumping unit has been developed. A simulation model of the electric drive of a pumping unit and a pressure observer has been developed in the Simintech environment, allowing the pump output coordinates to be estimated in transient modes. A comparison has been made of the estimated pressure value obtained using the synthesized observer with the transient process curves of the reference pressure, with changes in the value and frequency of the stator voltage, as well as the hydraulic resistance of the pressure pipeline. As a result of the work performed, it has become possible to determine the pump pressure based on the values of the stator current and voltage in dynamics.

Keywords

pressure identification, asynchronous motor, pipeline, centrifugal pump, Luenberger observer

For citation: Lysenko O. A. Nablyudatel' davleniya nasosnoy ustanovki s asinkhronnym elektroprivodom [Pumping Unit Pressure Observer with Asynchronous Electric Drive]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 109-117 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-109-117>.

Введение

Массовое применение электропривода центробежных насосов определяет актуальность исследования режимов работы таких установок. При этом постоянно возрастают требования к качеству

производственных процессов по перекачке невязких жидкостей [1–3].

Одним из способов улучшения качества производственных процессов является повышение уровня автоматизации. Существующий уровень автоматизации

предполагает внедрение частотно-регулируемого асинхронного электропривода, встроенного в автоматизированную систему управления технологическими процессами [4, 5]. При этом в качестве датчиков используются элементы непосредственного или прямого измерения регулируемых величин. Так, для контроля напора жидкости по перекачке жидкости используются датчики давления прямого измерения. К основным способам определения напора относятся применение следующих типов датчиков прямого измерения:

— тензометрические датчики основаны на изменении электрического сопротивления полупроводникового материала при деформации. Когда давление жидкости воздействует на мембрану датчика, она деформируется, в результате чего изменяется сопротивление материала. Изменение сопротивления преобразуется в электрический сигнал, который пропорционален давлению;

— емкостные датчики работают на основе изменения емкости между двумя электродами, когда давление жидкости изменяется. При увеличении давления мембрана между электродами деформируется, изменяя расстояние между ними и, следовательно, емкость. Этот измененный уровень емкости затем преобразуется в электрический сигнал, который представляет собой измеренное давление;

— электромагнитные датчики давления используют принцип электромагнитной индукции. Эти датчики могут иметь катушку и магнитный элемент; когда давление жидкости воздействует на мембрану, это приводит к изменению положения магнитного элемента, что изменяет магнитный поток через катушку. Это изменение генерирует электрический сигнал, который пропорционален давлению;

— пьезоэлектрические датчики основаны на пьезоэлектрическом эффекте, который проявляется в некоторых материалах, изменяющих электрический заряд при механическом воздействии. Когда давление жидкости воздействует на пьезоэлектрический кристалл, он производит электрический заряд, пропорциональный приложенному давлению. Этот заряд преобразуется в измеримый электрический сигнал;

— оптические датчики давления используют изменения в оптических свойствах (например преломление света), вызванные давлением. Эти датчики могут включать волоконно-оптические технологии, где изменение давления приводит к деформации волокна и изменению его оптических характеристик. Анализ этих изменений позволяет определить давление жидкости.

Применение датчиков прямого измерения давления жидкости часто связано с необходимостью их обслуживания и проверки, использованием отдельных линий связи и увеличением массы и габаритов насосной установки. В результате снижается надежность работы установки и увеличиваются затраты на ее обслуживание.

Косвенное измерение напора центробежного насоса с асинхронным электродвигателем имеет ряд преимуществ перед прямым измерением и использует информацию о токе и напряжении электродвигателя.

К недостаткам таких способов измерения напора станций перекачки жидкости можно отнести увеличенные массогабаритные показатели, необходимость регулярного обслуживания, использование линий связи, которые, в свою очередь, снижают надежность и качество передачи информации.

Альтернативой прямому измерению напора является косвенное или бездатчи-

ковое определение координат по параметрам тока и напряжения [6, 7].

Математическое описание

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (AD2rw) приводит в движение механическую подсистему и получает питание от частотно-регулируемого трехфазного источника напряжения (рисунок 1). Центробежный насос (Pump) приводится в движение от механической подсистемы. Центробежный насос работает на гидросеть без противодавления на резервуар с атмосферным давлением, на напорном трубопроводе установлен обратный клапан (InvValve). Регулирование подачи жидкости и гидравлического сопротивления осуществляется дроссельным способом с помощью задвижки (Valve), а также изменением частоты питающего напряжения источника.

Для моделирования динамических процессов, протекающих в электротехническом комплексе перекачки жидкости, используется математическое описание с использованием структурных схем, реализованное в среде Simintech [8]. Полученные схемы основаны на уравнениях, описывающих состояние асинхронной машины с двумя ветвями ротора (двумя клетками) в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ (1). На вход структурной системы подается двухфазное статорное напряжение $U_{s\alpha}-U_{s\beta}$ (предварительно преобразованное из трехфазного), а также момент нагрузки, обусловленный моментом сопротивления центробежного насоса, и угловая скорость вращения ω_m . Выходными координатами модели являются составляющие тока статора $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$, составляющие потокосцепления ротора и развиваемый электромагнитный момент T_e , являющийся суммой электромагнитного момента двух ветвей ротора.

$$\left\{ \begin{aligned} u_{s\alpha} &= R_S i_{s\alpha} + k_{is} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} &= R_S i_{s\beta} + k_{is} \frac{di_{s\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} \\ 0 &= -k_{R2} R_{R1} i_{s\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\alpha} + \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \\ &\quad - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\alpha} + Z_p \omega_m \psi_{R1\beta} \\ 0 &= -k_{R2} R_{R1} i_{s\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\beta} + \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \\ &\quad - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\beta} - Z_p \omega_m \psi_{R1\alpha} \\ 0 &= -k_{R1} R_{R2} i_{s\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R2\alpha} + \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} - \\ &\quad - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\alpha} + Z_p \omega_m \psi_{R2\beta} \\ 0 &= -k_{R1} R_{R2} i_{s\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R2\beta} + \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} - \\ &\quad - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\beta} - Z_p \omega_m \psi_{R2\alpha} \\ T_e &= \frac{3}{2} Z_p [k_{R2} (\psi_{R1\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R1\beta} i_{s\alpha}) + \\ &\quad + k_{R1} (\psi_{R2\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R2\beta} i_{s\alpha})] \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

$$\text{где } k_{R1} = \frac{L_{R1} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}; \quad k_{R2} = \frac{L_{R2} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2};$$

$$\sigma = L_{R1} L_{R2} - L_m^2; \quad T_{R1} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R1} L_{R2}};$$

$$T_{R2} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R2} L_{R1}};$$

$$k_{is} = \frac{L_S L_{R1} L_{R2} - L_S L_m^2 - L_{R1} L_m^2 - L_{R2} L_m^2 + 2L_m^3}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2};$$

$L_{R1}, L_{R2}, L_m, R_{R1}, R_{R2}, R_S$ — параметры схемы замещения;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ — $\alpha\beta$ составляющие тока статора (А);

$\psi_{R1\alpha}, \psi_{R1\beta}, \psi_{R2\alpha}, \psi_{R2\beta}$ — $\alpha\beta$ составляющие потокосцепления ротора (В·с).

Математический аппарат наблюдателя Люенбергера использовался для идентификации состояния асинхронной машины с двойной беличьей клеткой, а именно вычисления потокосцепления ротора, электромагнитного момента, момента нагрузки и угловой скорости

где $\hat{\omega}_m$ — оценка угловой скорости;

$\hat{\psi}_{R1\alpha}, \hat{\psi}_{R1\beta}, \hat{\psi}_{R2\alpha}, \hat{\psi}_{R2\beta}, \hat{i}_{S\alpha}, \hat{i}_{S\beta}$ — оценки потокоцеплений ротора для первой и второй клеток соответственно;

$\hat{i}_{S\alpha}, \hat{i}_{S\beta}$ — оценки проекций пространственных векторов тока статора;

$\Delta \hat{i}_{S\alpha} = i_{S\alpha} - \hat{i}_{S\alpha}; \Delta \hat{i}_{S\beta} = i_{S\beta} - \hat{i}_{S\beta}$ — невязки токов статора;

$kLLs$ — коэффициент усиления невязок тока;

$K_{Tnp}, K_{Tmi}, K_{Tmd}$ — коэффициенты усиления составляющих момента сопротивления $\hat{T}_L$ (пропорциональный, интегральный, дифференциальный).

Расход жидкости насоса определяется как отношение гидравлической мощности развиваемой насосом к развиваемому давлению:

$$\hat{q} = \frac{\hat{N}_{hyd}}{\hat{H}_{CP}}.$$

С другой стороны, гидравлическая мощность насоса определяется через угловую скорость вращения крыльчатки и момент сопротивления, создаваемый насосом:

$$\hat{N}_{hyd} = \hat{\omega}_m (\hat{T}_L - T_0), \quad (3)$$

где T_0 — момент трения.

Напор насоса может быть представлен как полином второй степени, аппроксимирующий напорно-расходную характеристику:

$$\hat{H}_{CP} = \rho \left(\frac{\omega_{nom}}{\hat{\omega}_m} \right)^2 \left(\left(C_0 - C_1 \hat{q} \left(\frac{\omega_{nom}}{\hat{\omega}_m} \right) \right) - C_2 \left(\hat{q} \left(\frac{\omega_{nom}}{\hat{\omega}_m} \right) \right)^2 - C_3 \left(q_{nom} - \hat{q} \left(\frac{\omega_{nom}}{\hat{\omega}_m} \right) \right)^2 \right), \quad (4)$$

где ρ — плотность жидкости;

ω_{nom}, q_{nom} — номинальная угловая скорость и номинальная подача насоса;

C_0, C_1, C_2, C_3 — коэффициенты полинома второй степени, определяемые по данным напорной характеристики методом наименьших квадратов.

Для насосной установки, работающей с ненулевым давлением сети, в питающем трубопроводе напор жидкости насосной установки определяется как сумма напора, развиваемого насосом, и напора во всасывающем трубопроводе:

$$\hat{H}_{OutT} = \hat{H}_{InT} + \hat{H}_{CP}, \quad (5)$$

где $\hat{H}_{OutT}$ — напор на выходе насосной установки;

$\hat{H}_{CP}$ — напор, развиваемый насосом;

$\hat{H}_{InT}$ — напор всасывающего трубопровода.

Имитационное моделирование наблюдателя напора

Исследование режимов работы наблюдателя напора производилось с помощью имитационной модели в программной среде Simintech (рисунок 1).

Математическое описание моделей наблюдателя напора соответствует системам дифференциальных уравнений (2)–(5). В качестве примера (эталонная модель) насосной установки был использован насосный агрегат мощностью 90 кВт и производительностью 200 м³/ч.

Поведение наблюдателя и всей динамической системы исследовалось при изменении гидравлического сопротивления системы, а частоты питающего напряжения — при одновременном изменении его величины. Временные диаграммы изменения гидравлической проводимости (степени открытия задвижки) и частоты питающего напряжения и приведены на рисунке 2, временные диаграммы наблюдаемого давления и эталонного давления — на рисунке 3.

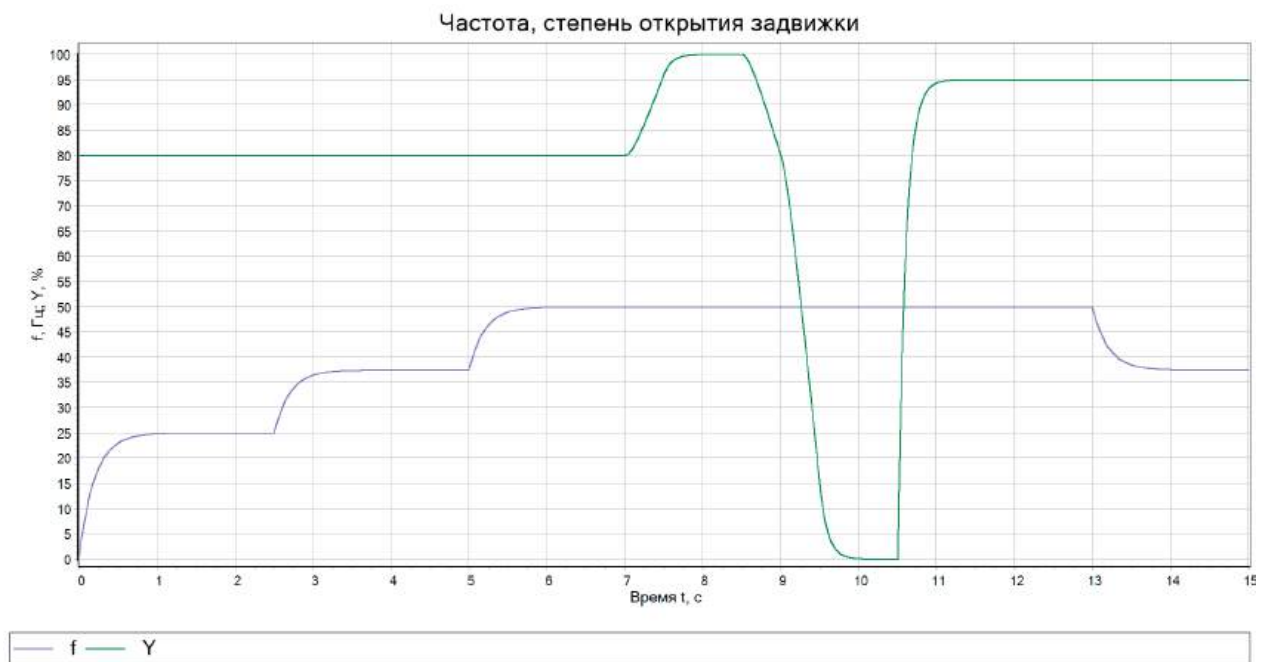


Рисунок 2. Временные диаграммы степени открытия задвижки и частоты питающего напряжения

Figure 2. Timing diagrams of the degree of opening of the valve and the frequency of the supply voltage

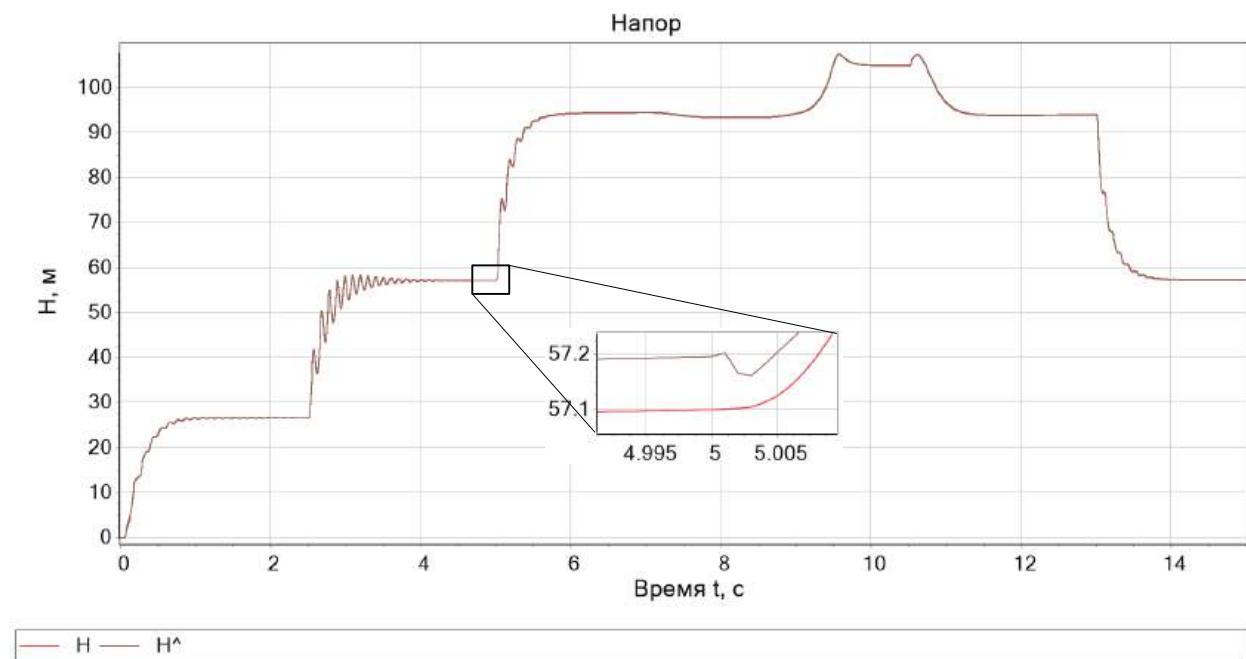


Рисунок 3. Временные диаграммы наблюдаемого давления и эталонного давления

Figure 3. Time diagrams of observed pressure and reference pressure

Выводы

Оценка давления центробежного насоса в динамических режимах работы предполагает идентификацию параме-

тров состояния электропривода в целом, используя информацию о величинах тока и напряжения электродвигателя. Из данных, представленных на рисун-

ках 2 и 3, видно, что наблюдатель напора центробежного насоса с асинхронным электроприводом обладает устойчивостью в динамических режимах работы. Идентифицированные значения давления асимптотически сходятся к соответствующим значениям давления модели насосной установки. Погрешность наблюдателя напора центробежного насоса в динамике составляет 1,0 %, в

установившемся режиме работы — 0,2 %.

В целом, представленный наблюдатель обладает работоспособностью в широких диапазонах входных воздействий, при этом целесообразно провести дополнительные исследования его поведения в замкнутой системе управления электропривода, при работе регуляторов и соответствующих им возмущающих воздействий.

Список источников

1. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Деговцов А.В., Донской Ю.А., Булат А.В., Зуев А.С., Якимов С.Б. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. № 4. С. 25-30. EDN: WICEHL.
2. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 9. С. 203-215. DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4351. EDN: XDAVMM.
3. Сабра К., Али М.С. Особенности работы центробежных насосов с использованием преобразователя частоты вращения // Природообустройство. 2013. № 5. С. 64-67. EDN: RQREWX.
4. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Электротехнологические установки для нефтедобычи. Омск: Омский государственный технический университет, 2015. 160 с. ISBN 978-5-8149-1990-8. EDN: UXHCPH.
5. Ren Y., Wang R., Rind S.J., Zeng P., Jiang L. Speed Sensorless Nonlinear Adaptive Control of Induction Motor Using Combined Speed and Perturbation Observer. Control Engineering Practice. 2022. Vol. 123 (4). P. 105166. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105166.
6. Torres L., Verde C., Rojas J. Minimal-Order Observers for Locating Leaks in a Pipeline with a Branch // Convocatoria 2017, and CONACyT-Secretaría de energía, Proyecto 280170: Cero incidentes en la red de ductos de México', IFAC-PapersOnLine. Jan. 2019. Vol. 52, No. 23. P. 67–72, DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.011.
7. Luo Y., Han Y., Zhang F. Research on the Operation Condition Indicator for Centrifugal Pump Based on Sensorless Monitoring Technology // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part e: Journal of Process Mechanical Engineering. 2021. No. 235. P. 514-526. DOI: 10.1177/0954408920971123.
8. Цвенгер И.Г. Применение методов параллельного программирования в SIMINTECH // Вестник Технологического университета. 2024. Т. 27, № 4. С. 127-133. DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_4_127. EDN: LBSGMJ.
9. Hernandez-Solis A., Carlsson F. Diagnosis of Submersible Centrifugal Pumps: A Motor Current and Power Signature Approaches // EPE Journal. 2015. No. 20. P. 58-64. DOI: 10.1080/09398368.2010.11463749.
10. Синолицкий А.Ф., Осадчук Ю.Г., Козакевич И.А. Исследование наблюдателя Люенбергера для бездатчикового векторного управления при работе на низкой скорости // Электротехнические и компьютерные системы. 2011. № 3 (79). С. 38-39. EDN: OJPATH.

References

1. Ivanovskii V.N., Sabirov A.A., Degovtsov A.V., Donskoi Yu.A., Bulat A.V., Zuev A.S., Yakimov S.B. Voprosy energoeffektivnosti ustanovok elektropivodnykh tsentrobezhnykh nasosov [Problems of Energy Efficiency of Electric-Driven Centrifugal Pumping Units]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa – Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2016, No. 4, pp. 25-30. EDN: WICEHL. [in Russian].
2. Kladiev S.N. Obzor i kriticheskii analiz sovremennogo sostoyaniya i putei sovershenstvovaniya sistem elektropitaniya i avtomaticheskogo upravleniya ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov v preryvistykh rezhimakh ekspluatatsii neftyanykh skvazhin [Review and

Critical Analysis of the Current State and Ways to Improve Regulated Power Supplies and Automatic Control Systems for Electric Centrifugal Pumping Units in Intermittent Operation of Oil Wells]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, Vol. 334, No. 9, pp. 203-215. DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4351. EDN XDAVMM. [in Russian].

3. Sabra K., Ali M.S. Osobennosti raboty tsentrobeznykh nasosov s ispol'zovaniem preobrazovatelya chastoty vrashcheniya [Features of the Operation of Centrifugal Pumps Using a Rotation Speed Converter]. *Prirodoobustroystvo – Prirodoobustroystvo*, 2013, No. 5, pp. 64-67. EDN: RQREWX. [in Russian].

4. Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Anikin V.V. *Elektrotekhnologicheskie ustanovki dlya neftedobychi* [Electrotechnological Installations for Oil Production]. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2015, 160 p. ISBN 978-5-8149-1990-8. EDN: UXHCPH. [in Russian].

5. Ren Y., Wang R., Rind S.J., Zeng P., Jiang L. Speed Sensorless Nonlinear Adaptive Control of Induction Motor Using Combined Speed and Perturbation Observer. *Control Engineering Practice*, 2022, Vol. 123 (4), pp. 105166. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105166.

6. Torres L., Verde C., Rojas J. Minimal-Order Observers for Locating Leaks in a Pipeline with a Branch, *Convocatoria 2017; and CONACyT-Secretaría de energía, Proyecto 280170: Cero incidentes en la red de ductos de México*, IFAC-

PapersOnLine, Jan. 2019, Vol. 52, No. 23, pp. 67–72. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.011.

7. Luo Y., Han Y., Zhang F. Research on the Operation Condition Indicator for Centrifugal Pump Based on Sensorless Monitoring Technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part e: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2021, No. 235, pp. 514-526. DOI: 10.1177/0954408920971123.

8. Tsvenger I.G. Primenenie metodov parallel'nogo programmirovaniya v SIMINTECH [Application of Parallel Programming Methods in SIMINTECH]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Technological University*, 2024, Vol. 27, No. 4, pp. 127-133. DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_4_127. EDN: LBSGMJ. [in Russian].

9. Hernandez-Solis A., Carlsson F. Diagnosis of Submersible Centrifugal Pumps: A Motor Current and Power Signature Approaches. *EPE Journal*, 2015, No. 20, pp. 58-64. DOI: 10.1080/09398368.2010.11463749.

10. Sinolitsii A.F., Osadchuk Yu.G., Kozakevich I.A. Issledovanie nablyudatelya Lyuenbergera dlya bezdatchikovogo vektornogo upravleniya pri rabote na nizkoi skorosti [Analysis of Luenberger Observer Performance for Speed Sensorless Induction Motor Control at the Low Speed Operation]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy – Electrical and Computer Systems*, 2011, No. 3 (79), pp. 38-39. EDN: OJPATH. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 05.12.2024.

The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 28.11.2024; accepted for publication 05.12.2024.

Научная статья

УДК 004.032.26

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-118-129

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА



Денис Альбертович Сафиев

Denis A. Safiev

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



Руслан Рифович Туктаров

Ruslan R. Tuktarov

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



Регина Тагировна Хазиева

Regina T. Khazieva

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

Актуальность

По мере усиления глобального фокуса на сокращении выбросов углерода и снижении зависимости от ископаемого топлива, индустрия возобновляемой энергии, в том числе солнечная энергетика, испытывает значительный рост. Эффективное управление и оптимизация солнечных энергетических ресурсов становятся ключевыми моментами для удовлетворения растущего спроса на энергию.

Одной из основных проблем солнечной энергетики является её непостоянный и прогнозируемый характер, зависящий от времени суток, погодных условий и сезонных изменений. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования этих изменений может значительно улучшить эффективность и надежность солнечных энергетических систем.

Быстрое развитие технологий искусственного интеллекта и машинного обучения открывает новые возможности для улучшения процессов прогнозирования и управления в солнечной энергетике. Алгоритмы искусственного интеллекта могут анализировать большие объемы данных и делать точные прогнозы, оптимизируя работу солнечных электростанций.

Ключевые слова

искусственный интеллект, прогнозирование выработки солнечной энергии, управление распределением энергии, машинное обучение, нейронные сети, регрессионные модели, методы подкрепления, статистический анализ, временные ряды, валидация моделей, эффективность и точность моделей

Развитие искусственного интеллекта в сфере альтернативной энергетики способствует повышению энергоэффективности.

Цель исследования

В данной работе осуществляется исследование способа прогнозирования и управления производством солнечной энергии с помощью искусственного интеллекта, основной задачей является разработка и внедрение методов искусственного интеллекта для оптимизации процессов прогнозирования и управления производством солнечной энергии с целью повышения эффективности, надежности и экономической выгоды солнечных энергетических систем.

Методы исследования

Определяется растущее значение солнечной энергии в устойчивом производстве энергии. Традиционные модели прогнозирования с трудом справлялись со сложными нелинейными закономерностями, но появление методов машинного обучения значительно повысило точность и надёжность в этой области. Рассматриваются различные методики машинного обучения, используемые для прогнозирования солнечной энергии: линейная регрессия, CatBoost, XGBoost, искусственные нейронные сети.

Результаты

Авторами получены оценки способа прогнозирования и управления производством солнечной энергии с помощью искусственного интеллекта, эффективности и точности моделей искусственного интеллекта на основе собранных данных. Использованы статистические методы для оценки значимости результатов.

Для цитирования: Сафиев Д. А., Туктаров Р. Р., Хазиева Р. Т. Прогнозирование и управление производством солнечной энергии с помощью искусственного интеллекта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 118-129. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-118-129>.

Original article

PREDICT AND MANAGE SOLAR ENERGY PRODUCTION WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Relevance

As the global focus on reducing carbon emissions and reducing dependence on fossil fuels intensifies, the renewable energy industry, including solar energy, is experiencing significant growth. Efficient management and optimization of solar energy resources are becoming key to meeting the growing demand for energy.

One of the main problems of solar energy is its unstable and predictable nature, depending on the time of day, weather conditions and seasonal changes. Using artificial intelligence to predict these changes can significantly improve the efficiency and reliability of solar energy systems.

The rapid development of artificial intelligence and machine learning technologies opens up new opportunities to improve forecasting and control processes in solar energy. Artificial intelligence algorithms can analyze large amounts of data and make accurate predictions, optimizing the operation of solar power plants.

The development of artificial intelligence in the field of alternative energy will contribute to the rapid growth of energy efficiency.

Aim of research

In this work, the study of the method of forecasting and managing solar energy production using artificial intelligence is carried out, the main task

Keywords

artificial intelligence, solar energy generation forecasting, energy distribution management, machine learning, neural networks, regression models, reinforcement methods, statistical analysis, time series, model validation, model efficiency and accuracy

is to develop and implement artificial intelligence methods to optimize the processes of forecasting and managing solar energy production, in order to improve the efficiency, reliability and economic benefits of solar energy systems.

Research methods

The growing importance of solar energy in sustainable energy production is determined. Traditional forecasting models struggled to cope with complex nonlinear patterns, but the advent of machine learning techniques has greatly improved accuracy and reliability in this area. Various machine learning techniques used to predict solar energy are considered: linear regression, CatBoost, XGBoost, artificial neural networks.

Results

The authors evaluated the method of predicting and managing solar energy production using artificial intelligence, the efficiency and accuracy of artificial intelligence models based on the collected data. Use of statistical methods to assess the significance of the results.

For citation: Tuktarov R.R., Safiev D.A., Khazieva R.T. Prognozirovaniye i upravleniye proizvodstvom solnechnoy energii s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta [Predict and Manage Solar Energy Production with Artificial Intelligence]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 118-129 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-118-129>.

Прогнозирование погоды для оптимизации солнечной энергии

Множество исследований сосредоточено на использовании искусственного интеллекта (ИИ) для повышения точности прогнозирования погоды и ее влияния на производство солнечной энергии. Исследования включают модели машинного обучения для прогнозирования солнечного излучения, облачности, осадков, атмосферного давления, температуры воздуха, относительной влажности и скорости ветра.

Прогнозирование погоды играет ключевую роль в оптимизации производства солнечной энергии, поскольку эффективность солнечных электростанций напрямую зависит от уровня солнечного излучения, облачности и других метеорологических параметров. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования погоды может в значительной степени повысить точность прогнозов и, как следствие, эффективность производства энергии.

Методы, которые могут быть применены:

— *модели машинного обучения.*

Алгоритмы машинного обучения, такие как нейронные сети, случайные леса или градиентный бустинг, для анализа и обработки метеорологических данных (атмосферного давления, температуры воздуха, относительной влажности и скорости ветра) учитывают различные факторы (географическое расположение солнечной электростанции, временные тренды и сезонные изменения) для более точного прогнозирования солнечного излучения;

— *интеграция данных солнечных электростанций.* Сбор данных о производстве энергии с солнечных электростанций и использование этой информации в моделях прогнозирования погоды позволяют создавать персонализированные модели прогнозирования, учитывающие конкретные характеристики и условия конкретной солнечной электростанции. Использование метеорологических данных высокого разрешения. Интеграция

данных с различных источников, включая спутниковые изображения, радары, метеостанции и даже датчики на солнечных панелях, для создания более подробных и точных моделей прогнозирования. Это позволяет учесть местные особенности и быстро реагировать на изменения в погоде;

— *обратная связь и обучение в реальном времени.* Использование обратной связи от солнечных электростанций для корректировки и улучшения моделей прогнозирования в реальном времени. Это позволяет создавать адаптивные системы, способные быстро реагировать на изменения погоды и оптимизировать производство энергии;

— *управление солнечными электростанциями.* Некоторые исследования фокусируются на разработке интеллектуальных систем управления для солнечных электростанций с использованием методов машинного обучения и оптимизации. Эти методы включают в себя оптимизацию углов наклона солнечных панелей, управление хранилищем энергии и динамическое адаптивное управление производством.

Исследователи также обращают внимание на использование ИИ для прогнозирования спроса на электроэнергию и управления распределением солнечной энергии в электрических сетях. Это включает оптимизацию ресурсов и балансировку нагрузки в сети потребителей.

При применении ИИ для мониторинга состояния солнечных панелей есть несколько различных способов, которыми солнечные фермы могут развернуть проверку с помощью ИИ. Наиболее распространенным способом является использование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) или дрона. БПЛА предоставляют операторам солнечных ферм бесконтактный способ контроля качества своих солнечных панелей с

помощью аэрофотоснимков. Изображения, собранные БПЛА над солнечной фермой, могут обрабатываться алгоритмом либо в облаке, либо на устройстве. Алгоритм ИИ может информировать контролера о качестве панелей, о том, какие фотоэлектрические панели имеют видимые признаки дефектного оборудования. Используя ИИ с автоматической классификацией дефектов, контролеры качества могут сократить расходы, обследуя все свое предприятие за несколько часов вместо того, чтобы нанимать кого-то на несколько дней для проведения технического обслуживания. Кроме того, автоматическая идентификация дефектных панелей может сократить время проверки с помощью маркировки на основе местоположения, что повышает эффективность.

Литературный обзор технологий

Обзор литературных источников выявил следующие технологии, используемые для прогнозирования солнечной энергии:

- линейная регрессия;
- CatBoost;
- XGBoost;
- метод прогнозирования на основе искусственной нейронной сети (ИНС).

Линейная регрессия

Целью модели является выделение наиболее подходящей линии, которая минимизирует разницу между прогнозируемыми значениями и фактическими [1]. Минимизация выполняется с помощью метода наименьших квадратов, с помощью которого определяется линия по минимуму суммы квадратов разностей между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями. Линейная регрессия может быть дополнительно расширена до множественной, где имеется более одной независимой переменной

[2]. Уравнение для множественной линейной регрессии имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (1)$$

где y — зависимая переменная;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ — независимые переменные;

b_0 — перехват;

$b_1, b_2, \dots, b_n$ — коэффициенты, определяющие влияние каждой независимой переменной на зависимую переменную.

Как только модель линейной регрессии обучена на ретроспективных данных, ее можно использовать для прогнозирования будущих значений зависимой переменной на основе значений независимых переменных.

Метод CatBoost

Метод CatBoost, как алгоритм повышения градиента, работает путём минимизации заданной функции потерь при помощи добавления деревьев решений в ансамбль. Используется аддитивная модель, в которой каждое новое дерево подгоняется к остаточным ошибкам существующего ансамбля [3]. Окончательное предсказание — это сумма предсказаний, сделанных всеми деревьями в ансамбле.

Фундаментальные компоненты и математические принципы CatBoost включают комбинацию повышения градиента и обработки категориальных признаков:

1. $L(y, F(x))$ — функция потерь, используемая в CatBoost. Эта функция представляет ошибку между истинной целью y и прогнозом модели $F(x)$;

2. $F(x) = \sum M \cdot m = 1fm(x)$ — предсказание с помощью ансамблевой модели, где M — это количество деревьев, $fm(x)$ представляет выходные данные каждого отдельного дерева;

3. Шаг градиентного спуска — на каждой итерации новое дерево подгоняется к отрицательному градиенту функции

потерь для каждой выборки i в отношении текущего модельного прогноза:

$$r_{im} = - \frac{\partial L(y_i, F(x_i))}{\partial F(x_i)}. \quad (2)$$

Метод XGBoost

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) является улучшенным алгоритмом машинного обучения, который относится к семейству Gradient Boosting. XGBoost использует специально разработанную структуру и алгоритм повышения производительности, что определяет его эффективным с точки зрения вычислений. Метод имеет встроенный механизм для обработки пропущенных значений во время обучения [4].

Алгоритм включает в себя методы регуляризации L_1 и L_2 , контролирующие сложность модели для предотвращения переобучения. XGBoost позволяет определять свои собственные целевые функции и критерии оценки.

Модель прогнозирования методом XGBoost имеет следующий вид:

$$f(x) = \sum_{k=1}^K f_k(x_i).$$

На каждой итерации новые деревья подгоняются к отрицательному градиенту функции потерь:

$$r_{ik} = - \frac{\partial L(y_i, \hat{y}_i)}{\partial \hat{y}_i}, \quad (3)$$

где r_{ik} — отрицательный градиент функции потерь по отношению к текущему прогнозу.

Метод прогнозирования на основе искусственной нейронной сети

Метод прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети, особенно в последовательной модели, предполагает использование архитектуры глубокого обучения, предназначенной для обработки последовательных данных, таких как временные ряды, текстовые данные или любые данные с

определённым порядком или последовательностью [5].

Процесс обучения включает в себя подачу последовательных данных в модель и обновление весов модели, чтобы минимизировать определённую функцию потерь [6]. Нейронная сеть прямого действия (представленная в исследовании) выражается следующим образом:

Ввод: $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Вес: $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$.

Смещение: b .

Функция активации:

$$\sigma(z) = \begin{cases} 0, & \text{если } z < 0 \\ z, & \text{если } z \geq 0 \end{cases}$$

Таким образом, $\sigma(z) = \max(0, z)$, т. е. если значение $z \geq 0$, функция вернёт значение z , иначе она вернёт 0. Это делает функцию ReLU простой и эффективной, она широко используется в нейронных сетях, поскольку обеспечивает быструю обучаемость и хорошую способность преодолевать проблему затухания градиента.

$$z = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n + b. \quad (4)$$

Проведение исследования

Набор данных о выработке электроэнергии собирается на уровне инвертора — к каждому инвертору подключено несколько линий солнечных панелей. Данные датчиков собираются на уровне предприятия — единый массив датчиков оптимально размещён на предприятии (таблица 1).

Дата, время — информация о временном промежутке, начиная с 15.05.2024 и заканчивая 16.06.2024, в виде 00:00 (дд.мм.гггг чч:мм). Измерения производились через каждые 15 мин;

PDC — значение выработки мощности постоянного тока, кВт;

PAC — значение выработки мощности переменного тока, кВт;

TA — температурное значение на солнечной станции, °C;

TM — значение показания модуля температуры, °C;

Ir — электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца, его количество за 15-минутный интервал времени, кВт/м²;

H — время, ч;

D — день;

Таблица 1. Данные о выработке электроэнергии

Table 1. Data on electricity generation

Дата, время	<i>PDC</i>	<i>PAC</i>	<i>TA</i>	<i>TM</i>	<i>Ir</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>DW</i>	<i>MI5</i>
15.05.2024 00:00	0	0	25,2	22,9	0	0	1	4	1
15.05.2024 00:15	0	0	25,1	22,8	0	0	1	4	2
15.05.2024 00:30	0	0	24,9	22,6	0	0	1	4	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29.05.2024 09:00	6317.0	618,7	24,4	40,1	0,5	9	15	4	37
29.05.2024 09:15	8053.6	788,2	25,4	47,3	0,7	9	15	4	38
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16.06.2024 23:15	0	0	22,9	21,3	0	23	33	1	94
16.06.2024 23:30	0	0	22,9	21,2	0	23	33	1	95
16.06.2024 23:45	0	0	22,892	21,2	0	23	33	1	96

DW — день недели;

M15 — 15-минутный отрезок времени за месяц.

На рисунке 1 представлена корреляционная матрица зависимостей параметров набора данных, представленных в таблице 1.

Корреляционная матрица представлена в виде графика, в котором коэффициент корреляции между всеми парами переменных отображается 5-ю уровнями коэффициента корреляции. Показано, насколько сильно и в каком направлении (положительном или отрицательном) связаны между собой переменные. Значения коэффициента корреляции варьируются от 1 до 0 (взятые по

модулю), где 1 означает идеальную положительную корреляцию, а 0 — отсутствие корреляции. На графике корреляционной матрицы видно, какие параметры имеют сильную корреляцию между собой (близкие к 1), какие — слабую (близкие к 0). Например, температура модуля и температура окружающей среды, уровень солнечного излучения имеют положительную корреляцию.

Проведено краткосрочное прогнозирование выработки мощности переменного тока (рисунок 2) и постоянного тока (рисунок 3) на сутки вперёд с использованием методов CatBoost, XGBoost, ИНС и линейной регрессии.

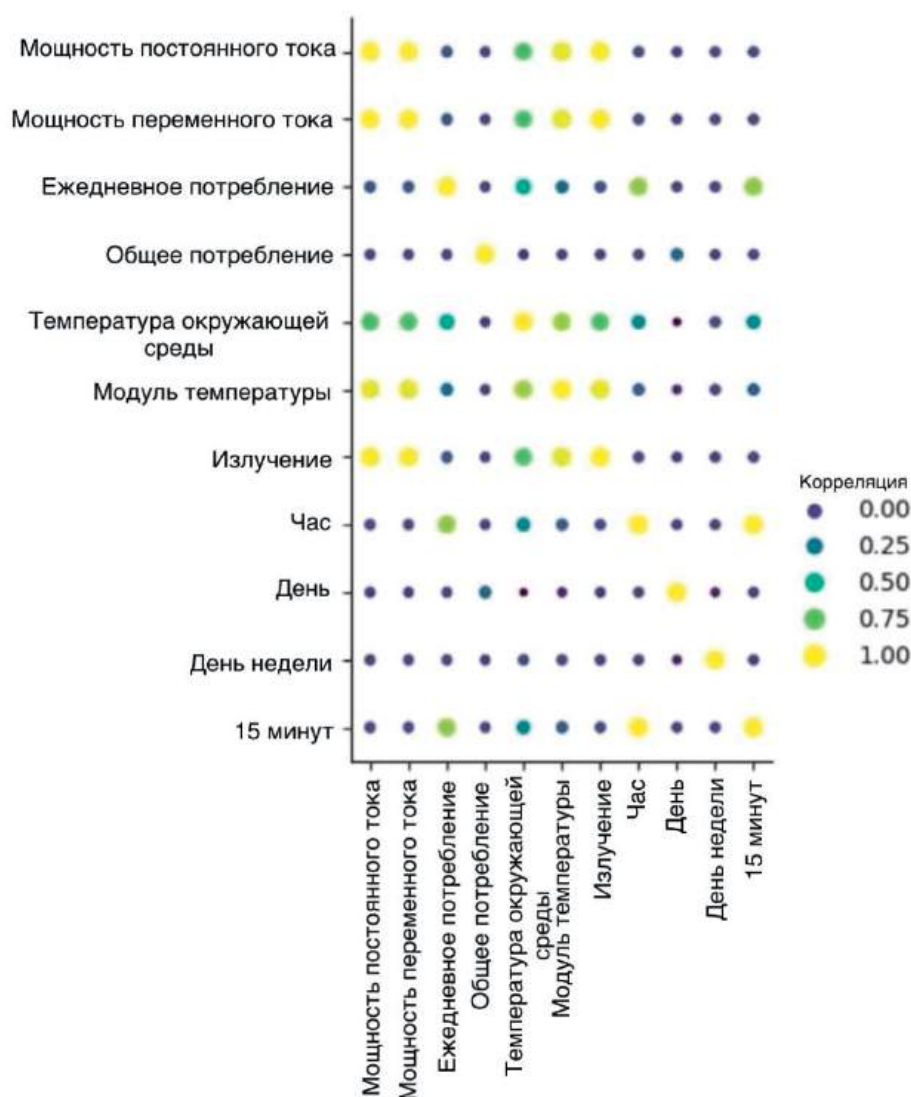


Рисунок 1. Корреляционная матрица параметров набора данных

Figure 1. Correlation matrix of dataset parameters

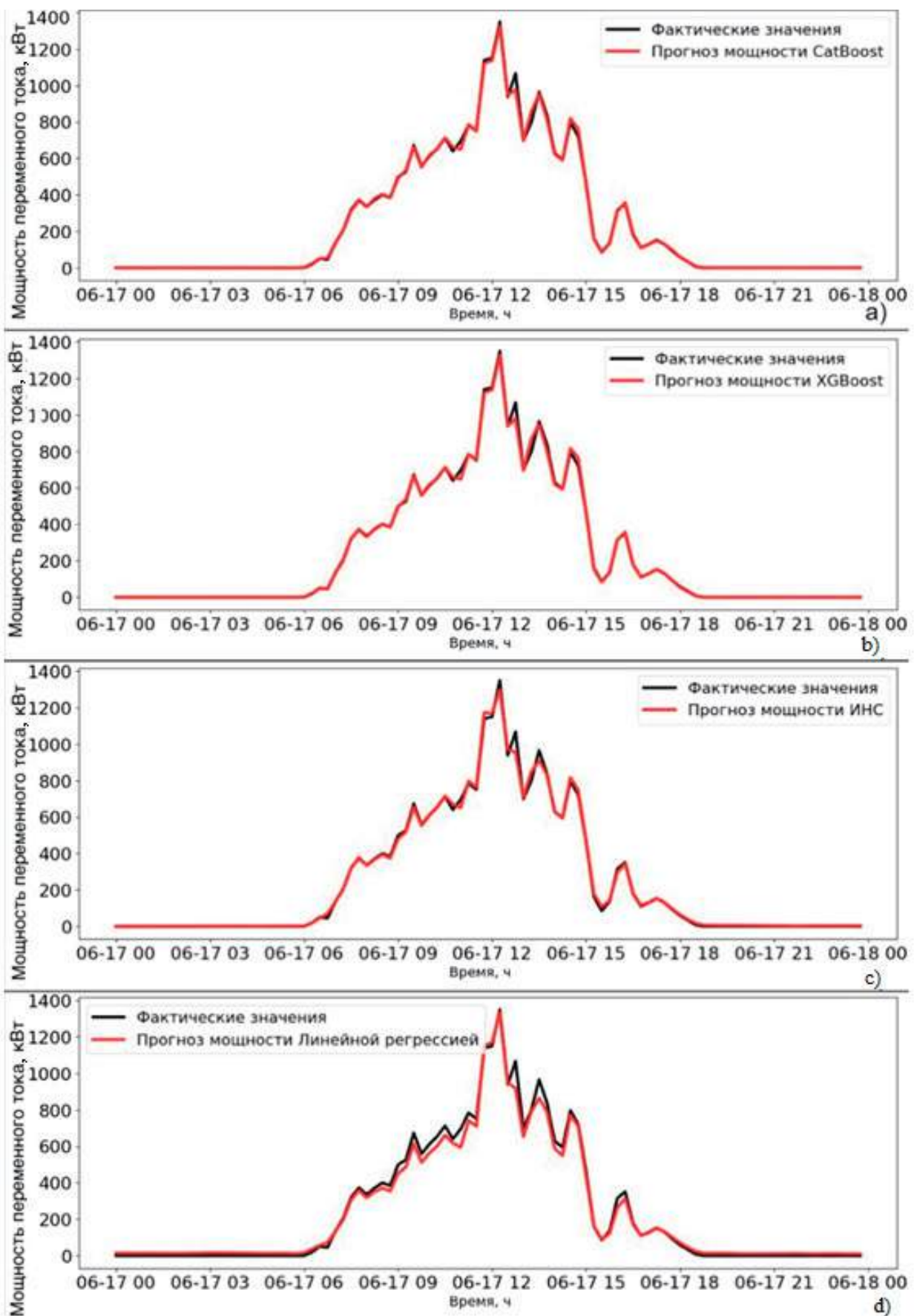


Рисунок 2. Прогнозирование выработки мощности переменного тока методами: CatBoost (a), XGBoost (b), ИНС (c), линейной регрессии (d)

Figure 2. Prediction of AC power generation using the following methods: CatBoost (a), XGBoost (b), INS (c), linear regression (d)

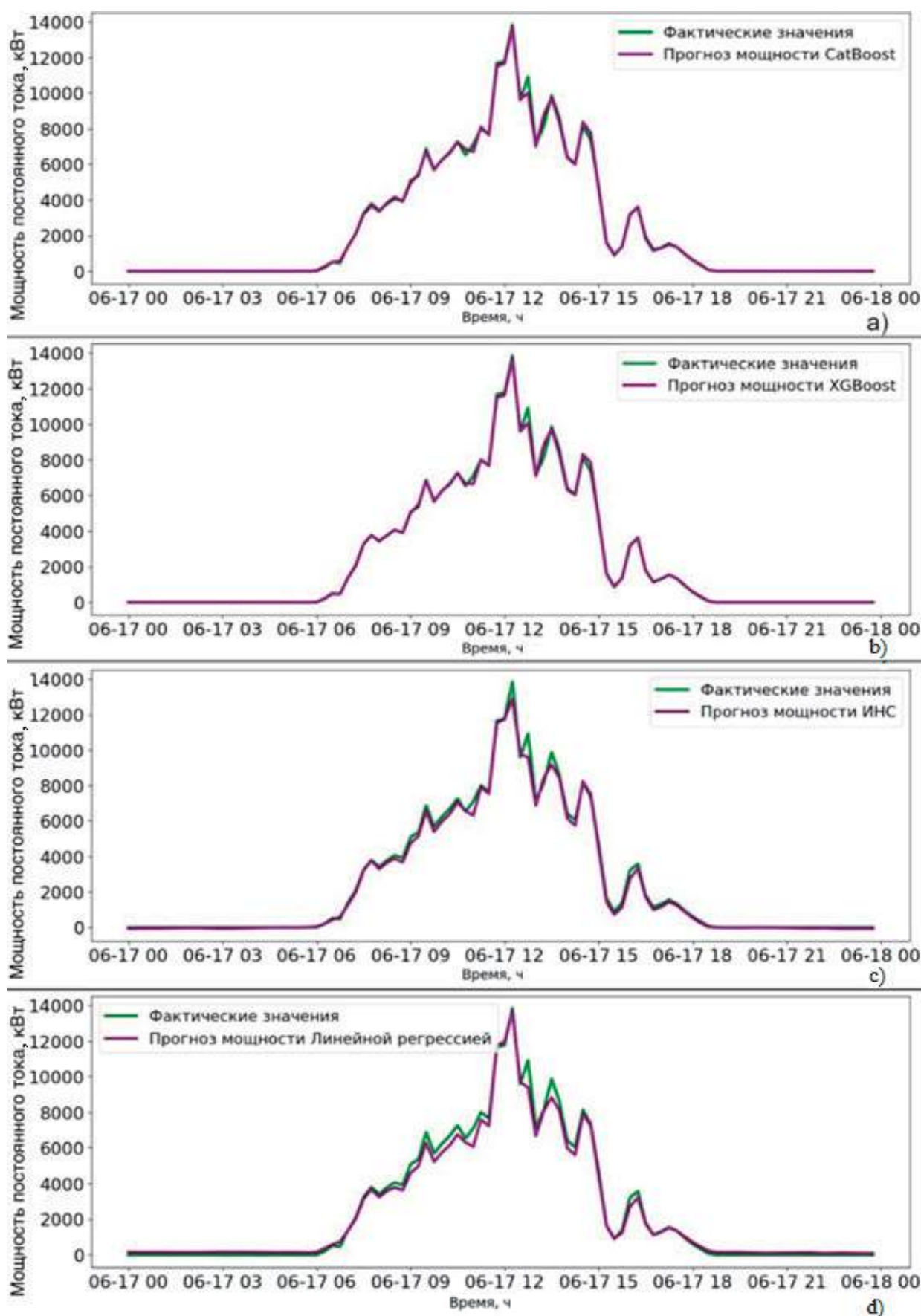


Рисунок 3. Прогнозирование выработки мощности постоянного тока методами: CatBoost (a), XGBoost (b), ИНС (c), линейной регрессии (d)

Figure 3. Forecasting DC power generation using the following methods: CatBoost (a), XGBoost (b), INS (c), linear regression (d)

В таблице 2 отображены средние значения абсолютной процентной ошибки (MAPE) для прогнозирования мощности переменного тока (PAC) и мощности постоянного тока (PDC).

При прогнозировании мощности PAC XGBoost демонстрирует низкие значения MAPE = 2,44 %, что указывает на высокий уровень точности прогнозирования мощности переменного тока. CatBoost показывает чуть более высокий показатель MAPE = 3,33 % (соответствует требуемой точности). Метод на основе ИНС демонстрирует более высокий показатель MAPE = 7,09 %, линейная регрессия имеет значение ошибки – 14,01 %, что демонстрируют графики прогнозов (рисунки 2, 3).

При прогнозировании мощности PDC аналогичным образом XGBoost обеспечивает низкий показатель MAPE = 2,22 % для прогнозирования мощности постоянного тока, что подчёркивает его сильную прогностическую способность. CatBoost имеет MAPE = 4,04 %, что также соответствует требуемой точности. Для метода на основе ИНС MAPE = 8,09 %, также наблюдалось при прогнозировании мощности переменного тока: линейная регрессия показывает самый высокий показатель MAPE = 13,46 %, что указывает на меньшую точность прогнозирования мощности.

Таблица 2. Ошибка прогнозирования мощности переменного и постоянного тока

Table 2. Error in predicting AC and DC power

Значение метрики MAPE, %							
При прогнозировании PAC				При прогнозировании PDC			
XGBoost	CatBoost	ИНС	Линейная регрессия	XGBoost	CatBoost	ИНС	Линейная регрессия
2,44	3,33	7,09	14,01	2,22	4,04	8,09	13,46

Выводы

Использование ИИ для прогнозирования производства солнечной энергии позволяет повысить точность управления энергоресурсами и снизить затраты. В дальнейшем можно рассматривать более сложные модели, такие как нейронные сети, для улучшения точности прогнозов.

Прогнозирование и управление производством солнечной энергии с использованием искусственного интеллекта представляют собой перспективную и активно развивающуюся область в сфере возобновляемой энергетики. Использование методов искусственного интеллекта, таких как машинное обучение, нейронные сети и алгоритмы оптимизации, позволяет существенно повысить

эффективность и надежность солнечных энергетических систем.

По результатам исследования установлено, что метод линейной регрессии неэффективен при прогнозировании солнечной энергии из-за сложностей установления взаимосвязей между входными и выходными данными.

Методы CatBoost и XGBoost, использующие деревья решений, продемонстрировали перспективные возможности прогнозирования. Они эффективно использовали сложность данных, что привело к высокой точности прогнозирования выходной мощности переменного тока, превосходящей традиционные методы.

Искусственные нейронные сети, разработанные для обработки последова-

тельных данных, продемонстрировали высокую точность в прогнозировании солнечной энергии. Однако расхождения в прогнозировании периодов пикового времени указывают на необходимость дальнейшего уточнения гиперпараметров модели.

Список литературы

1. Корнеев В.П., Хрисанфова К.С. Применение полиномиальных признаков в задачах линейной регрессии // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 94-5. С. 154-156. DOI: 10.18411/trnio-02-2023-275.
2. Бойко Т.А. Разработка алгоритма построения модели множественной линейной регрессии // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 8, № 12. С. 113-119. EDN: YUVRRR.
3. Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Ключев Р.В., Гаврина О.А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 7. С. 115-125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527. EDN: YAUTKG.
4. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining – KDD’16. 2016. P. 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
5. Попов А.Н., Венгерский А.Д. Разработка модели машинного обучения для прогнозирования генерации электроэнергии солнечными панелями на основе алгоритма градиентного бустинга // Интеллектуальная энергетика: сб. науч. ст. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Барнаул: Межрегиональный центр электронных образовательных ресурсов, 2021. С. 101-103. EDN: OIYEIV.
6. Саетова Л.Г., Горохов М.М. Нейронная сеть и регрессия: описание линейной регрессии в нейронных сетях // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. тр. науч.-техн. конф. в рамках Всеросс. молодёжн. науч. форума «Общение студентов и аспирантов в научной и профессиональной сферах» (Ижевск, 26 мая 2021 г.). Ижевск: Ижевский государственный технический университет

Таким образом, применение искусственного интеллекта в производстве солнечной энергии не только улучшает экономическую эффективность данной отрасли, но также способствует устойчивому развитию и уменьшению зависимости от традиционных источников энергии.

им. М.Т. Калашникова, 2021. С. 15-21. EDN: QRGOWW.

7. Васина Д.И. Описание программы для проведения анализа выработки мощности постоянного и переменного токов солнечной электростанции // Актуальные вопросы энергетики: матер. Всеросс. научн.-практ. конф. с международ. участием (Омск, 25-26 мая 2023 г.) / Редколлегия: П.А. Батраков. Омск: Омский государственный технический университет, 2023. С. 133-137. EDN: LYCVKT.

References

1. Korneev V.P., Khrisanfova K.S. Primenenie polinomial'nykh priznakov v zadachakh lineinoi regressii [Application of Polynomial Features in Linear Regression Problems]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya – Trends in the Development of Science and Education*, 2023, No. 94-5, pp. 154-156. DOI: 10.18411/trnio-02-2023-275. [in Russian].
2. Boiko T.A. Razrabotka algoritma postroeniya modeli mnozhestvennoi lineinoi regressii [Development of Algorithm for Generation of Multiple Linear Regression Model]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya – Economics and Management: Problems, Solutions*, 2018, Vol. 8, No. 12, pp. 113-119. EDN: YUVRRR. [in Russian].
3. Morgoeva A.D., Morgoev I.D., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Prognozirovaniye potrebleniya elektricheskoi energii promyshlennym predpriyatiem s pomoshch'yu metodov mashinnogo obucheniya [Forecasting of Electric Energy Consumption by an Industrial Enterprise Using Machine Learning Methods]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, Vol. 333, No. 7, pp. 115-125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527. EDN: YAUTKG. [in Russian].
4. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on*

Knowledge Discovery and Data Mining – KDD’16, 2016, pp. 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.

5. Popov A.N., Vengerskii A.D. Razrabotka modeli mashinnogo obucheniya dlya prognozirovaniya generatsii elektroenergii solnechnymi panyami na osnove algoritma gradientnogo bustinga [Development of a Machine Learning Model for Predicting Electricity Generation by Solar Panels Based on a Gradient Boosting Algorithm]. *Sbornik nauchnykh statei «Intellectual’naya energetika» kafedry «Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatii» AltGTU im. I.I. Polzunova* [Collection of Scientific Articles «Intellectual Power Engineering» of the Department «Power Supply of Industrial Enterprises» AltSTU named after I.I. Polzunov]. Barnaul, Mezhhregional’nyi tsentr elektronnykh obrazovatel’nykh resursov, 2021, pp. 101-103. EDN: OIYEIV. [in Russian].

6. Saetova L.G., Gorokhov M.M. Neironnaya set’ i regressiya: opisanie lineinoi regressii v neironnykh setyakh [Neural Network and Regression: Description of Linear Regression in Neural Networks]. *Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii» v ramkakh Vserossiiskogo molodezhnogo nauchnogo foruma*

«Obshchenie studentov i aspirantov v nauchnoi i professional’noi sferakh», Izhevsk, 26 maya 2021 g. [Proceedings of the Scientific and Technical Conference «Communication of Students and Postgraduates in Scientific and Professional Fields» within the framework of the All-Russian Youth Scientific Forum, Izhevsk, May 26, 2021]. Izhevsk, Izhevskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. M.T. Kalashnikova, 2021, pp. 15-21. EDN: QRGOWW. [in Russian].

7. Vasina D.I. Opisanie programmy dlya provedeniya analiza vyrabotki moshchnosti postoyannogo i peremennogo tokov solnechnoi elektrostantsii [Description of the Program for Analyzing the Power Generation of Direct and Alternating Currents of a Solar Power Plant]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual’nye voprosy energetiki»*, Omsk, 25-26 maya 2023 g. [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation «Topical Issues of Power Engineering», Omsk, May 25-26, 2023]. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2023, pp. 133-137. EDN: LYCVKT. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 28.11.2024.

The article was submitted 14.11.2024; approved after reviewing 21.11.2024; accepted for publication 28.11.2024.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. Т. 20, № 4. С. 130–142. ISSN 1999-5458 (print)
Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2024. Vol. 20. No. 4. P. 130–142. ISSN 1999-5458 (print)

Научная статья

УДК 004.89

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-130-142

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА НЕФТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕМАНТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



Максим Алексеевич Шишенков

Maksim A. Shishenkov

*научный сотрудник лаборатории автоматизации,
ООО «НИИ Транснефть»,
Москва, Россия*

Актуальность

В статье представлен метод автоматизированной обработки инженерно-технической информации, содержащейся в схемах проектной документации. Рассмотрены требования нормативно-законодательной базы к наличию информационных моделей объектов капитального строительства. Информационная модель автоматизированной системы управления технологическим процессом определена как описание ее структурного и функционального строения, позволяющего проводить его анализ. Приведен краткий обзор актуальных подходов к составлению информационных моделей объектов капитального строительства, в частности, объектов трубопроводного транспорта нефти. Предложен подход к автоматизированному созданию информационной модели из машиночитаемых схем документации, разработанных в векторном редакторе или САПР. Рассмотрены методы и инструментарий кодирования информации в схемах, обеспечивающие однозначное преобразование схемы в онтологическую модель. Приведен пример онтологической модели для интерпретации информации, кодируемой в машиночитаемых схемах объектов трубопроводного транспорта нефти. Показан вид разработанного прототипа программного обеспечения, обеспечивающего перевод схем документации в наполнение онтологической модели. Применение подхода семантического моделирования показано на примере формирования объектной модели блока измерения качества нефти. Отмечены масштабируемость представленного подхода и повышенная скорость формирования информационной модели в сравнении с ее параллельной разработкой.

Актуальность работы обусловлена потребностью в снижении трудоемкости создания информационных моделей объектов капитального строительства в части автоматизированных систем управления технологическими процессами, применением современных подходов к разработке машинно-интерпретируемых документов и подходов к автоматизации работы с онтологическими моделями.

Цель исследования

Разработать и провести прототипирование подхода к созданию машинно-интерпретируемых схем в свободно распространяемом про-

Ключевые слова

онтология,
проектирование,
автоматизация,
технологический процесс,
конфигурирование,
АСУТП, САПР

граммном обеспечении, информация из которых может быть преобразована в информационную модель объекта.

Методы исследования

Разработка методологии онтологического описания информационного наполнения схем документации и прототипирование программного обеспечения, реализующего данную методологию.

Результаты

Представлен подход к семантическому описанию объекта капитального строительства в машинно-интерпретируемых схемах. Разработан прототип программного обеспечения интерпретации схем векторного редактора и систем автоматизации проектирования для загрузки их наполнения в онтологическую модель, разработанную в онтологическом редакторе.

Благодарности: Автор выражает благодарность А. Т. Яровому и Е. С. Чужинову за наставничество в ходе создания рассматриваемых в статье подхода и прототипа.

Для цитирования: Шишенков М. А. Информационное моделирование объектов транспорта нефти с применением семантических технологий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 130-142. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-130-142>.

Original article

INFORMATION MODELING OF OIL TRANSPORT OBJECTS USING SEMANTIC TECHNOLOGIES

Relevance

The article presents a method for automated processing of engineering and technical information contained in design documentation diagrams. The requirements of the regulatory framework for the availability of information models of capital construction projects are considered. The information model of an automated process control system is defined as a description of its structural and functional structure, allowing for its analysis. A brief overview of current approaches to compiling information models of capital facilities, in particular, oil pipeline transport facilities, is provided. An approach is proposed for automated creation of an information model from machine-readable documentation diagrams developed in a vector editor or CAD. Methods and tools for encoding information in diagrams are considered, providing an unambiguous transformation of the diagram into an ontological model. An example of an ontological model for interpreting information encoded in machine-readable diagrams of oil pipeline transport facilities is given. Shown is the type of developed software prototype that provides the translation of documentation schemes into the content of the ontological model. The application of the semantic modeling approach is shown by the example of the formation of an object model of an oil quality measurement unit. The scalability of the presented approach and the increased speed of formation of the information model in comparison with its parallel development are noted.

The relevance of the work is due to the need to reduce the labor intensity of creating information models of capital construction projects in terms of automated process control systems, the use of modern approaches to the development of machine-interpretable documents and approaches to automating work with ontological models.

Keywords

ontology, design, automation, technological process, configuration, process control system, CAD

Aim of research

Develop and prototype an approach to creating machine-interpretable diagrams in freely distributed software, information from which can be converted into an information model of an object.

Research methods

Development of a methodology for ontological description of the information content of documentation schemes and prototyping software that implements this methodology.

Results

An approach to the semantic description of a capital construction object in machine-interpretable diagrams is presented. A prototype of software for interpreting vector editor circuits and design automation systems has been developed to load their content into an ontological model developed in the ontology editor.

Acknowledgments: The author expresses gratitude to A. T. Jarovoy and E. S. Chuzhinov for mentoring during the creation of the approach and prototype discussed in the article.

For citation: Shishenkov M. A. Informatsionnoye modelirovaniye ob'yektov transporta nefti s primeneniye semanticheskikh tekhnologiy [Information Modeling of Oil Transport Objects Using Semantic Technologies]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 130-142 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-130-142>.

Введение

Согласно статье 57.5 градостроительного кодекса Российской Федерации (ГрК РФ), объекты капитального строительства (ОКС), финансируемые из бюджета, должны сопровождаться информационными моделями [1]. При проектировании объектов трубопроводного транспорта нефти, в частности при описании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), в состав проектной документации включается раздел «Автоматизация», на который распространяется указанное требование ГрК РФ.

Государственные и международные стандарты, рассматривающие различные предметные области [2–4], определяют информационные модели как множества фактов, концепций и обобщений, позволяющих описывать процессы, объекты, явления и все отношения между ними. В контексте данной статьи под информационной моделью АСУТП будем понимать совокупность структурных и функ-

циональных взаимосвязей составляющих объекта и данных о нем.

Ввиду того, что разработка документации зачастую ведется с использованием нескольких систем автоматизации проектных работ (САПР), информационная модель должна позволять вмещать в себя данные из схем разных видов и типов, выполненных различными разработчиками в разных САПР. Поскольку формирование Модели требует трудоемкого анализа документации и приведения данных к единому формату записи, предлагается подход к автоматизации указанных процессов.

В настоящий момент широкое распространение имеет подход формирования информационных моделей на основе 3D схем ОКС в проприетарных САПР. Однако у данного подхода имеется ряд недостатков. Так, формирование 3D схемы ОКС должно вестись в ручном режиме параллельно с разработкой остального пакета документации. Также 3D схема ОКС преимущественно содер-

жит пространственные отношения между объектами и не отражает функциональных связей.

В целях снижения трудоемкости процесса формирования информационных моделей предлагается автоматизированное формирование модели из двумерных схем документации с использованием свободно распространяемого программного обеспечения (ПО) и инструментария семантического моделирования.

Методы

Обзор литературы

Онтологические модели применяются в промышленности в целях конфигурирования оборудования и ПО [5–8]. Стандарт ГОСТ ИСО 15926 утверждает структуру онтологических моделей в нефтегазовой отрасли [9]. При моделировании строительных работ находит применение основанная на указанном стандарте методология CFINOS.

В работе [10] рассмотрено применение онтологического подхода для описания слабо формализованной информации об объектах ТЭК. В работе представлена разработанная система поддержки концептуального проектирования. Приведены подходы для описания таксономии, партономии, процессной модели, модели требований. Расчетные модели находятся вне базы знаний, также как и модули оптимизации результатов. Представленный в работе прототип реализован на базе свободно распространяемого программного обеспечения построения диаграмм draw.io, языка программирования Python и базы данных для формирования полного цикла разработки конфигураций оборудования установки комплексной подготовки газа. Подход апробирован на одном из газовых месторождений «Газпром Нефть», отмечено снижение трудоемкости проектных работ.

Статья [11] рассматривает автоматизированное наполнение экземплярами онтологической модели из двумерных строительных чертежей с использованием САПР OntoCAD. Онтологическая модель разработана в ПО Protégé. Рассматриваемый САПР использует разработанный Autodesk формат DXF и парсер FreeCAD, поддерживает загрузку стандартных для семантических моделей файлов «.owl». Данные файлы содержат деревья классификации объектов модели. Свойства объектов определяются их геометрией и взаимным расположением на рабочем пространстве. На текущий момент САПР OntoCAD не поддерживает схемы других видов и типов.

Для работы с онтологическими моделями могут быть использованы большие языковые модели (large language models, LLM), что рассмотрено в работе [12]. В работе представлен плагин, разработанный к редактору онтологий Protégé. Данный плагин позволяет задействовать запросы к языковой модели GPT-3 для перевода предложений на естественном языке в набор выражений в функциональном синтаксисе OWL. Плагин может быть применен для автоматизированного анализа документов, написанных в декларативной форме, в частности, нормативной документации и технических заданий.

Следует отметить, что использование LLM в настоящий момент не является надежным, что вызвано случайностью результатов работы моделей. Технологии, позволяющие LLM преобразовывать изображения в их текстовое описание, находятся на стадии прототипирования. Инструменты для преобразования моделей САПР в онтологические описания являются предпочтительными, поскольку имеют детерминированный результат и требуют меньших вычислительных мощностей.

Онтологические модели могут разрабатываться как набор файлов-документов, взаимная совместимость которых обеспечивается единством формата описания [13]. Интеграция нескольких онтологий основана на принципах алгебры множеств, что позволяет вести разработку онтологий с опорой на уже имеющиеся модели. Таким образом, *формирование информационной модели возможно осуществлять путем последовательной оцифровки схем документации, нормализации и интеграции полученных данных.*

Подход семантического описания объекта в схемах

На основании предпосылок, полученных в ходе анализа открытых источников, осуществлена разработка подхода наполнения онтологических моделей данными схмотехнических документов. Данный подход не зависит от рассматриваемой предметной области и видов и типов схем, указанных в [14]. Принцип составления онтологической модели из

различных схем и документов отражен на рисунке 1.

При разработке подхода онтологического описания рассматривалась документация на блок измерения качества нефти. Анализировались концепты и роли, отраженные в следующих документах:

- технологическая схема;
- структурная схема;
- схема соединений внешних проводов;
- схема автоматизации;
- табличные документы.

Создание онтологически-интерпретируемой схемы должно сопровождаться разработкой соответствующему данной схеме шаблону онтологической модели. *Схема является графической моделью объекта, онтологическая модель задает правила интерпретации схемы и выступает средством хранения, анализа и уточнения информации, представленной на схеме.*

В онтологии должны содержаться иерархия и описание классов и связей

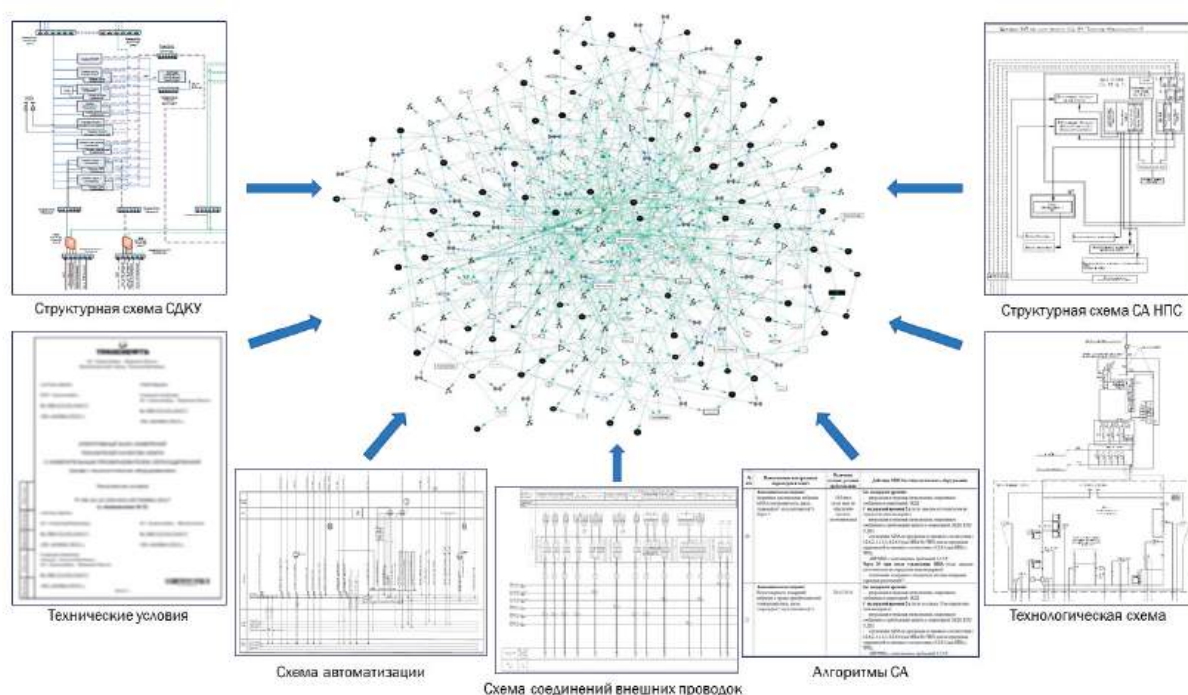


Рисунок 1. Принцип составления онтологической модели из различных схем и документов

Figure 1. The principle of compiling an ontology from various diagrams and documents

модели. Также могут быть описаны атрибуты и аннотации, применяемые для уточнения объектов модели. При разработке метамодели рекомендуется руководствоваться одной из методологий онтологического моделирования [15–20]. Пример онтологической модели объекта транспорта нефти в редакторе онтологий Protégé представлен на рисунке 2.

Базовым элементом онтологической модели выступает триплет «субъект — предикат — объект». В онтологических моделях в формате триплетов описываются отношения классов, индивидов, атрибуты и аннотации к ним. Графическое отображение триплета представлено на рисунке 3.

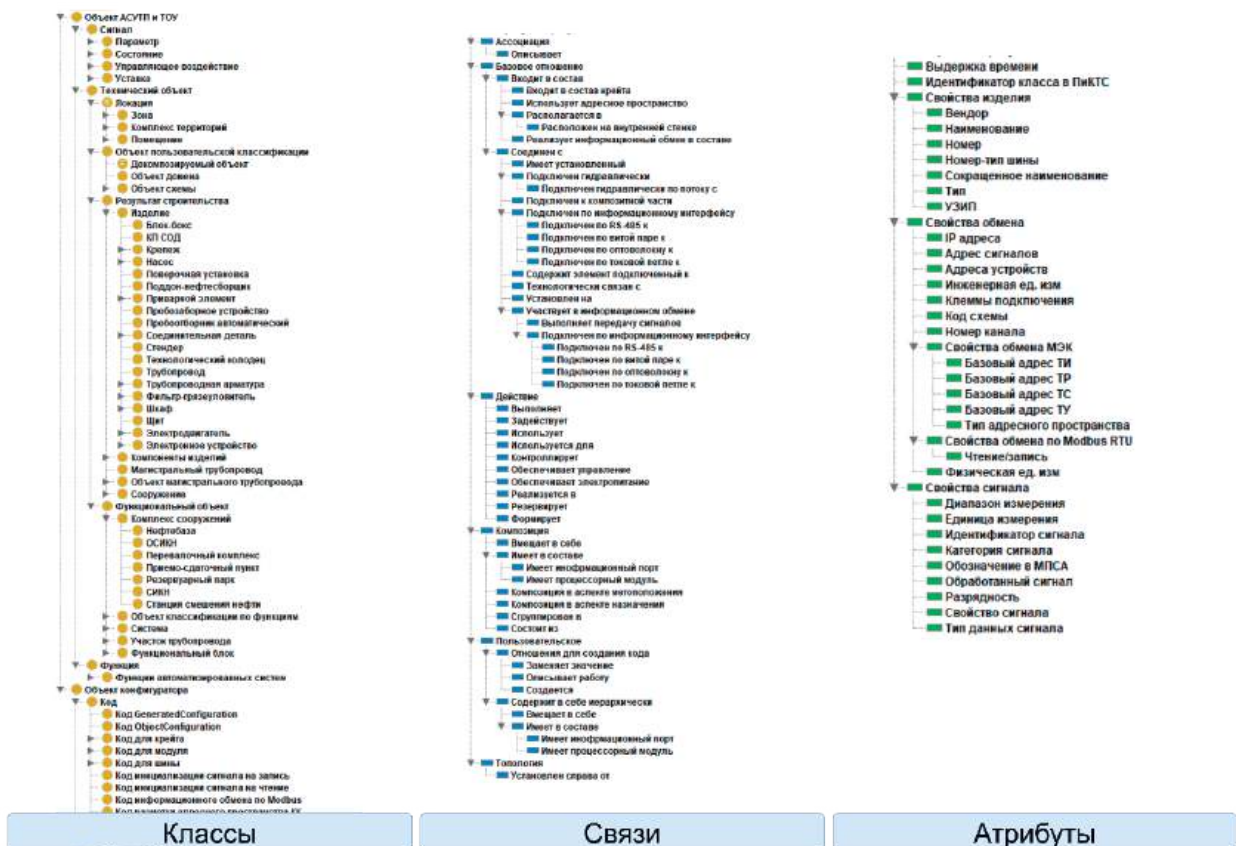


Рисунок 2. Структура классов, связей и атрибутов онтологической модели для оцифровки схем документации

Figure 2. The structure of classes, relationships and attributes of the ontological model for the digitization of documentation schemes



Рисунок 3. Графическое представление триплета

Figure 3. Graphical display of a triplet

Результаты

Реализация подхода семантического описания в векторном редакторе

Подход семантического описания в схемах реализован на примере свободно распространяемого векторного редактора «draw.io» [21]. Данный векторный редактор позволяет сохранять схемы в формате «.xml», что обеспечивает их машинную читаемость. Подход актуален для схем САПР, поддерживающих сохранение схем и чертежей в форматах разметки «.xml», «.html», «.yaml», «.json».

Для обеспечения машинной интерпретируемости схемы графические примитивы должны содержать в себе информацию, отражающую привязку объекта к классу онтологии. Для редактора «draw.io» Предлагается осуществлять данную привязку путем указания идентификатора класса онтологической модели в меню «Стиль» графического примитива, что отражено на рисунке 4. Для САПР идентификатор класса может быть указан в свойствах графического объекта.

Для отображения объекта на схеме «draw.io» может быть использован любой графический примитив, предоставляемый встроенной библиотекой редактора графов. Для приведения вида объектов машинно-интерпретируемой схемы к общепринятым условно-графическим обозначениям могут быть использованы пользовательские библиотеки графических примитивов. Примеры пользовательских условно-графических обозначений представлены на рисунке 5.

Связи объектов между собой кодируются их соединением

Стиль соединения не влияет на его интерпретацию при ее занесении в онтологическую модель.

Стрелка без указания наименования трактуется как связь «Соединен с». Уточнение данной связи (например, до связей «Подключен к», «Установлен на» и т.д.) осуществляется по правилам онтологической модели машиной логического вывода исходя из классов соединяемых объектов, набора их связей и атрибутов. Стрелка с указанием наименова-

Редактировать стиль:

```
http://bik_metamodel.ru#OWLClass 4b47a6f5 e751 43dd
98c4 96491d4fd8;shape=stencil(tVRtboMwDD1N/k5A1A
N0bLtHSLxiNU1QSL9uP4Op1LAGTRNIKMjP8fOzE0fIum9VB6IqW
iE/RFWVRUEr2deZrfoOdGTwogKqXgJ7+hj8Ea5o4sSBroWAcfDK
T1Hsac/wyVp754gEvesTz5OfyBQ6iiluTDalvydWR/wniBAmkYy
K6uvvtG+7bYjLjfSmtA/lq+tdjzhVXG51cKsRl/+n1TUhucst60
bp4yH4szMvxYRhrpbv+3wY58Oaq/MbrdXe+kAm/8c4i4c2NvYMC
+VkrBOnD7BQzZCSX4QFXbzhhbIAZrkisBa7HjbqV4Rb5BeNA/bv
NQdMyXZptoepqKGOIQ1uuC0jfHnCT2iMzfQ77UruQH71fUT5+R6
BHw==);whiteSpace=wrap;html=1;fontSize=15;
```

Отмена

Применить

Рисунок 4. Кодирование класса в стиле графического примитива

Figure 4. Coding a class in the style of a graphical primitive

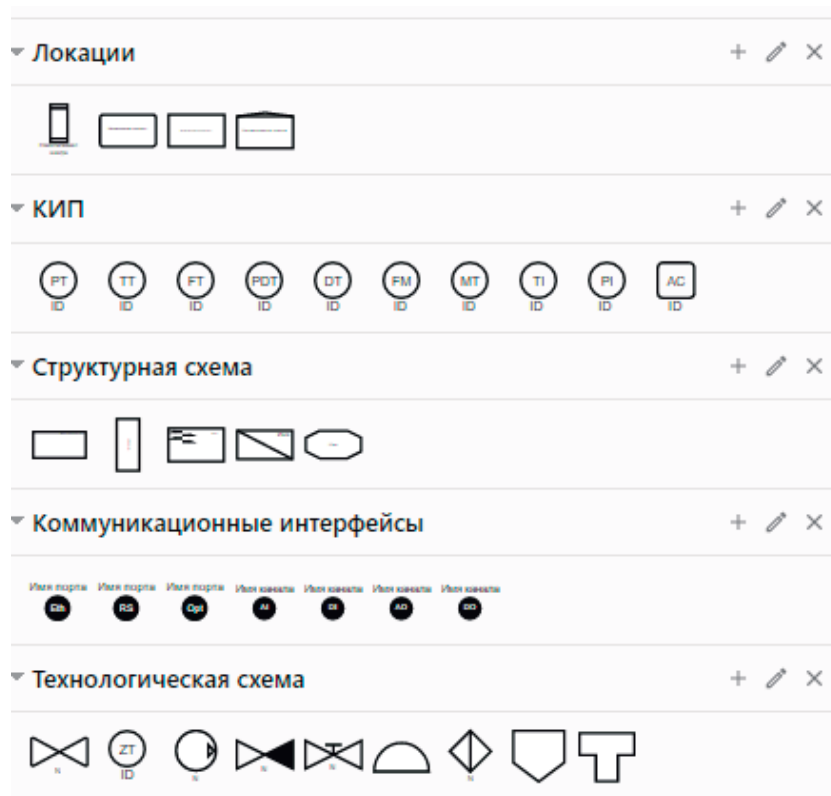


Рисунок 5. Библиотеки условно-графических примитивов

Figure 5. Libraries of conditional graphic primitives

ния связи определяется как указание связи, атрибута или аннотации, в зависимости от того, как представлено указанное наименование в онтологии. Пример кодирования на схеме высказывания «Преобразователь давления PT101 Yokogawa EJX310A установлен на двухвентильном блоке» представлен на рисунке 6.

Связи на схеме также могут быть указаны путем вложения одних объектов схемы внутри других. Данный способ

преимущественно используется для отображения моделей «часть — целое».

Фрагмент схемы гидравлической принципиальной блока измерения качества нефти, воспроизведенный с использованием пользовательских графических примитивов, представлен на рисунке 7.

Для обеспечения целостности проекта, разделенного на схемы, необходимо и достаточно, чтобы каждый объект, представленный на нескольких схемах проекта, имел одинаковые наи-

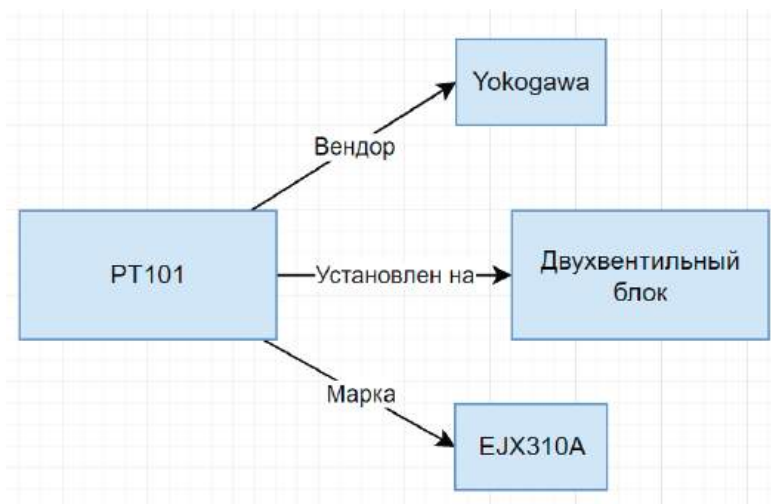


Рисунок 6. Графическое отображение наполнение онтологической модели

Figure 6. Graphic display of the content of the ontological model

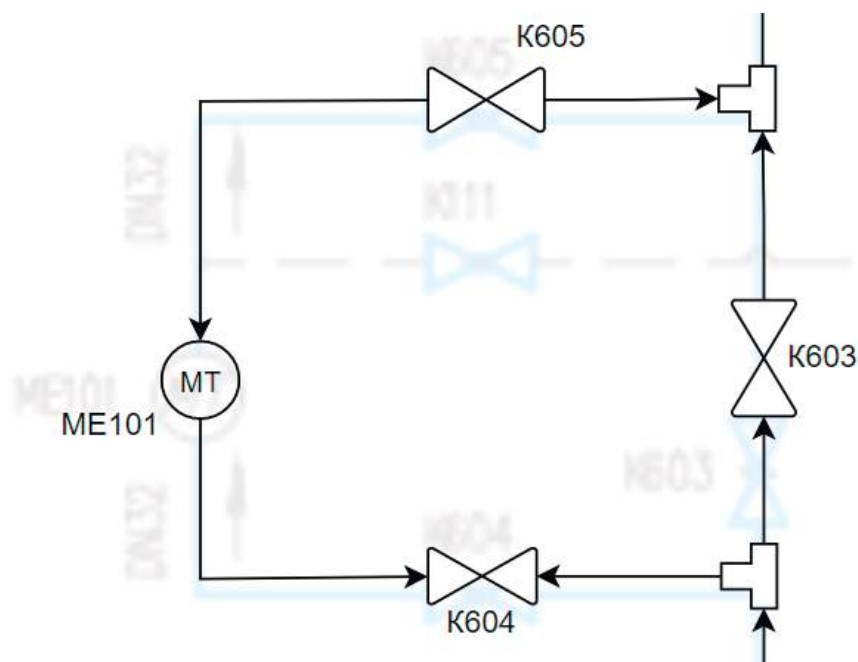


Рисунок 7. Фрагмент технологической схемы в векторном редакторе

Figure 7. Fragment of a technological diagram in a vector editor

менования на всех рассматриваемых схемах. При этом представление объекта, его классификация, набор связей и используемый графический примитив могут отличаться для каждой схемы или дублироваться при необходимости.

Обсуждение

ПО преобразования данных из схем в онтологию

Предлагаемый подход может быть реализован в ПО, что было опробовано в прототипе на языке программирования. Для работы с онтологическими моделями, представленными в формате «.owl», применялась свободно распространяемая программная библиотека «owlready» [22], для работы с файлами в формате «.rdf» и «.rdfs» могут быть использованы свободно-распространяемые программные библиотеки «rdflib» [23]. Входными данными прототипа выступают схемы документации в машиночитаемом формате «.xml». Поддерживаются схемы, разработанные в вектор-

ном редакторе «draw.io», также могут быть использованы «.xml» файлы САПР «ЕЗ» и «ModelStudio», распространенных в проектировании объектов транспорта нефти.

В прототип загружается шаблон онтологической модели формата «.owl», разработанный в свободно распространяемом редакторе Protégé [24], который содержит типовые структуры и правила построения ОКС в части АСУ ТП объектов транспорта нефти. После загрузки данных прототип осуществляет интерпретацию «.xml» файлов и преобразование интерпретированной информации в наполнение онтологической модели ОКС. Таким образом, формирование информационной модели ОКС объекта транспорта нефти в части АСУТП происходит автоматизировано. Вид окна программы представлен на рисунке 8.

Окно программы содержит поля загрузки исходных данных, граф онтологии, составленный из объединенных данных схем, таблицу связей объектов модели, таблицы подсчета числа связей

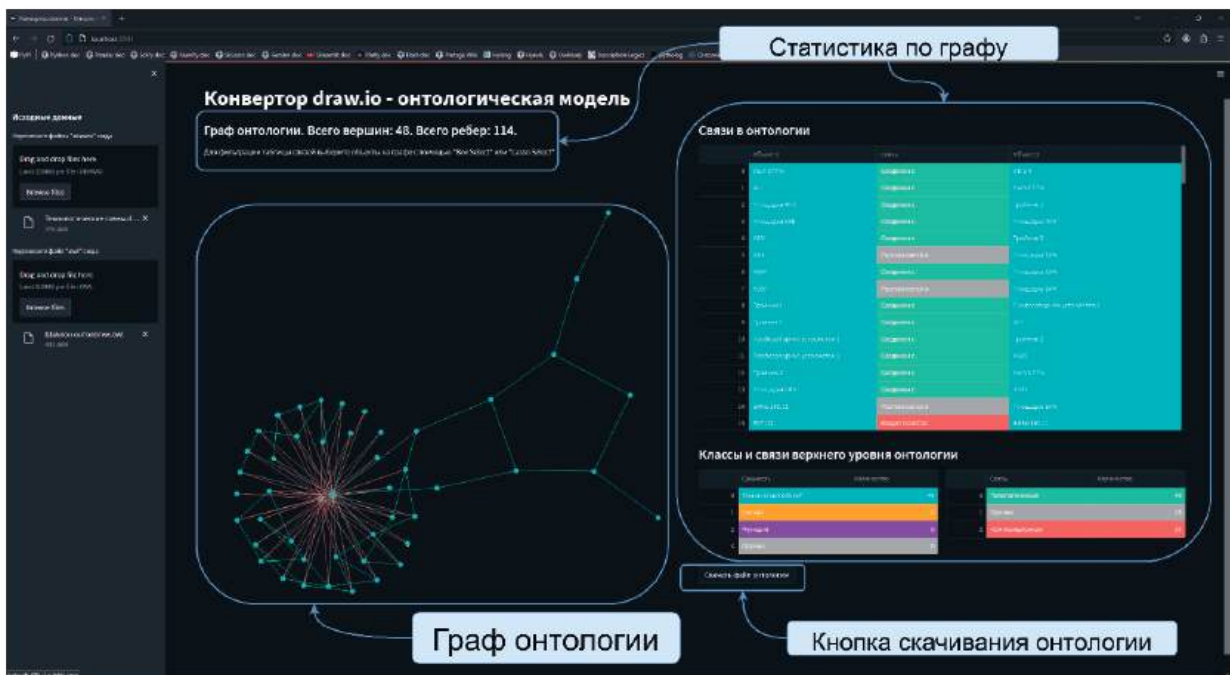


Рисунок 8. Вид прототипа преобразования схем в онтологию

Figure 8. View of the prototype for converting diagrams into ontology

и объектов модели. Посредством кросс-фильтрации ПО позволяет рассматривать различные срезы модели, извлекая связанные сведения об объектах из документов.

Полученная в ходе обработки документов онтологическая модель сохраняется в файле стандартного формата «.owl» [25], который поддерживается широким спектром ПО. *Различные инструменты поддерживают механизмы визуализации, позволяющие анализировать как модель, так и ее наполнение.*

Выводы

Онтологическая модель может применяться как источник консолидированных данных от разных разработчиков для автоматизированного формирования программного обеспечения, конфигурации АСУТП и документации объектов транспорта нефти. Автоматизированное

наполнение онтологической модели из схем документации упрощает процесс создания информационной модели ОКС объектов транспорта нефти в части АСУТП.

Предложенный подход актуален для схем из САПР и может быть использован для двумерной схемы из любой предметной области. Подход является масштабируемым в зависимости от возможностей стилизации и указания свойств графических примитивов в применяемом САПР.

Информационная модель ОКС выступает в качестве инструмента точного ответа на следующие комплексные вопросы: какую функцию выполняет оборудование, что входит в состав системы, сборки. Модель может стать основой первоисточника данных, описывающих структурное и функциональное строение объекта на всех стадиях жизненного цикла.

Список источников

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/866/> (дата обращения: 20.05.2024).
2. ГОСТ Р МЭК 61360-2-2013. Стандартные типы элементов данных с ассоциированной схемой классификации электрических компонентов. Ч. 2. Словарная схема EXPRESS. М.: Стандартинформ, 2016. 157 с.
3. ГОСТ Р 57269-2016. Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 36 с.
4. ГОСТ Р 56174-2014. Информационные технологии (ИТ). Архитектура служб открытой Грид-среды. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
5. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С. Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики // Онтология проектирования. 2023. Т. 13, № 4 (50). С. 548-561. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561. EDN: AJKTDZ.
6. Doukari O., Wakefield J., Martinez P., Kassem M. An Ontology-Based Tool for Safety Management in Building Renovation Projects // Journal of Building Engineering. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108609>.
7. Single J.I., Schmidt J., Denecke J. Ontology-Based Computer Aid for the Automation of HAZOP Studies. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. No. 68. P. 104321. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104321.
8. Cao J., He Y.-L., Zhu Q.X. An Ontology-Based Procedure Knowledge Framework for the Process Industry // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2020. No. 99. P. 10.1002/cjce.23873. DOI: 10.1002/cjce.23873.
9. ГОСТ Р ИСО 15926-2-2010. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интеграция данных жизненного цикла для перерабатывающих предприятий, включая нефтяные и газовые производственные предприятия. Часть 2. Модель данных. М.: Стандартинформ, 2013. 257 с.
10. Глухих И.Н., Шевелев Т.Г., Панов Р.А., Изотов А.М., Писарев М.О., Лисс Д.А., Быков В.С., Абрамов А.В., Нониева К.З. Автоматическое конфигурирование системы подготовки газа на основе онтологических моделей // Онтология проектирования. 2022. Т. 12, № 4 (46). С. 518-531. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-518-531.
11. Häfner P., Häfner V., Wicaksono H., Ovtcharova J. Semi-Automated Ontology Population from Building Construction Drawings // International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development. 2013. P. 379-386. DOI: 10.5220/0004626303790386.
12. Mateiu P., Groza A. Ontology Engineering with Large Language Models // 25th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC). 2023. DOI:10.1109/SYNASC61333.2023.00038.
13. Мартынов В.В., Скуратов А.К., Филосова Е.И., Фандрова Л.П., Шаронова Ю.В. Технологии и операции управления онтологическими ресурсами на примере нефтедобывающей области // Сетевое научное издание «Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана». 2016. № 7. С. 151-159.
14. ГОСТ 2.701-2008. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.
15. ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021. Информационные технологии (ИТ). Онтологии высшего уровня (TLO). Ч. 1. Требования. М.: Стандартинформ, 2021. 28 с.
16. ГОСТ Р 59798-2021 Информационные технологии (ИТ). Онтологии высшего уровня (TLO). Ч. 2. Базисная формальная онтология (BFO). М.: Стандартинформ, 2021. 36 с.
17. Otte J.N., Beverley J., Ruttenberg A. BFO: Basic Formal Ontology. Applied Ontology. 2022. No. 17 (1). P. 17-43.
18. Dolce Ontology Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://www.loa.istc.cnr.it/dolce/overview.html> (дата обращения: 20.05.2024).
19. Almeida J.P.A., Guizzardi G., Sales T.P., Falbo R.A. gUFO: A Lightweight Implementation of the Unified Foundational Ontology (UFO) [Электронный ресурс]. 2019. URL: <http://purl.org/nemo/doc/gufo> (дата обращения: 20.05.2024).
20. Common Core Ontologies [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/Common-CoreOntology/CommonCoreOntologies-ontology-repository.com> (дата обращения: 20.05.2024).
21. Векторный редактор диаграмм diagrams.net [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/jgraph/drawio/commit/9201e58e3814a3f2dea1d04edc953ee6a2851cb5> (дата обращения: 20.05.2024).
22. Lamy J.B. Owlready: Ontology-Oriented Programming in Python with Automatic Classification and High-Level Constructs for Biomedical Ontologies. Artificial Intelligence in Medicine. 2017. No. 80. P. 11-28. DOI: 10.1016/j.artmed.2017.07.002.

23. Библиотека языка Python для работы с файлами форматов .rdf и .rdfs [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/RDFLib/rdfLib> (дата обращения: 20.05.2024).

24. Musen M.A. Protégé Team. The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward // *AI Matters*. 2015. Jun. 1(4). P. 4-12. DOI: 10.1145/2757001.2757003.

25. W3C Specifications [Электронный ресурс]. URL: [https://www.w3.org/TR/?tags\[0\]=data](https://www.w3.org/TR/?tags[0]=data) (дата обращения: 20.05.2024).

References

1. *Gradostroitel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii* [Town Planning Code of the Russian Federation]. [Electronic Resource]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/866/> (accessed 20.05.2024). [in Russian].
2. *GOST R MEK 61360-2-2013. Standartnye tipy elementov dannykh s assotsirovannoi skhemoi klassifikatsii elektricheskikh komponentov. Ch. 2. Slovarnaya skhema EXPRESS* [State Standard MEK 61360-2-2013. Standard Data Element Types with Associated Classification Scheme for Electric Components. Part 2. EXPRESS Dictionary Schema]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 157 p. [in Russian].
3. *GOST R 57269-2016. Integrirovannyy podkhod k upravleniyu informatsiei zhiznennogo tsikla antropogennykh ob'ektov i sred. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 57269-2016. Integrated Approach to Lifecycle of Anthropogenic Objects and Environment Information Management. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 36 p. [in Russian].
4. *GOST R 56174-2014. Informatsionnye tekhnologii (IT). Arkhitektura sluzhb otkrytoi Grid-sredy. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 56174-2014. Information Technologies. The Open Grid Services Architecture. Terms and Definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 p. [in Russian].
5. Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V., Maiorov G.S. Razrabotka ontologii dlya avtomatizatsii vychislitel'nykh protsessov pri proektirovanii truboprovodnykh sistem energetiki [Development of Ontologies for Automating Computational Processes in the Energy Pipeline System Design]. *Ontologiya proektirovaniya — Ontology of Designing*, 2023, Vol. 13, No. 4 (50), pp. 548-561. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561. EDN: AJKTDZ. [in Russian].
6. Doukari O., Wakefield J., Martinez P., Kassem M. An Ontology-Based Tool for Safety Management in Building Renovation Projects. *Journal of Building Engineering*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108609>.
7. Single J.I., Schmidt J., Denecke J. Ontology-Based Computer Aid for the Automation of HAZOP Studies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, No. 68, pp. 104321. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104321.
8. Cao J., He Y.-L., Zhu Q.X. An Ontology-Based Procedure Knowledge Framework for the Process Industry. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, No. 99, pp. 10.1002/cjce.23873. DOI: 10.1002/cjce.23873.
9. *GOST R ISO 15926-2-2010. Sistemy promyshlennoi avtomatizatsii i ikh integratsiya. Integratsiya dannykh zhiznennogo tsikla dlya pererabatyvayushchikh predpriyatii, vkluchaya neftnyane i gazovye proizvodstvennye predpriyatiya. Chast' 2. Model' dannykh* [State Standard R ISO 15926-2-2010. Industrial Automation Systems and Integration. Integration of Life-Cycle Data for Process Plants Including Oil and Gas Production Facilities. Part 2. Data Model]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 257 p. [in Russian].
10. Glukhikh I.N., Shevelev T.G., Panov R.A., Izotov A.M., Pisarev M.O., Liss D.A., Bykov V.S., Abramov A.V., Nonieva K.Z. Avtomaticheskoe konfigurirovanie sistemy podgotovki gaza na osnove ontologicheskikh modelei [Automatic Configuration of the Gas Treatment System Based on Ontological Models]. *Ontologiya proektirovaniya — Ontology of Designing*, 2022, Vol. 12, No. 4 (46), pp. 518-531. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-4-518-531. [in Russian].
11. Häfner P., Häfner V., Wicaksono H., Ovtcharova J. Semi-Automated Ontology Population from Building Construction Drawings. *International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development*, 2013, pp. 379-386. DOI: 10.5220/0004626303790386.
12. Mateiu P., Groza A. Ontology Engineering with Large Language Models. *25th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC)*. 2023. DOI: 10.1109/SYNASC61333.2023.00038.
13. Martynov V.V., Skuratov A.K., Filsova E.I., Fandrova L.P., Sharonova Yu.V. Tekhnologii i operatsii upravleniya ontologicheskimi resursami na primere neftedobyvayushchei oblasti [Technologies and Operations for Managing Ontological Resources Using the Example of the Oil Producing Region]. *Setevoe nauchnoe izdanie «Nauka i obrazovanie. MG TU im. N.E. Bauman» — Online Scientific Edition «Science and Education»*, 2016, No. 7, pp. 151-159. [in Russian].
14. *GOST 2.701-2008. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentatsii (ESKD). Skhemy*.

Vidy i tipy. Obshchie trebovaniya k vypolneniyu [State Standard 2.701-2008. Unified System for Design Documentation. Diagrams. Kinds and Types. General Requirements for Fulfillment]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 16 p. [in Russian].

15. *GOST R ISO/MEK 21838-1-2021. Informatsionnye tekhnologii (IT). Ontologii vysshego urovnya (TLO). Ch. 1. Trebovaniya* [State Standard R ISO/MEK 21838-1-2021. Information Technology. Top-Level Ontologies (TLO). Part 1. Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 28 p. [in Russian].

16. *GOST R 59798-2021. Informatsionnye tekhnologii (IT). Ontologii vysshego urovnya (TLO). Ch. 2. Bazisnaya formal'naya ontologiya (BFO)* [State Standard R 59798-2021. Information Technology. Top-Level Ontologies (TLO). Part 2. Basic Formal Ontology (BFO)]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 36 p. [in Russian].

17. Otte J.N., Beverley J., Ruttenberg A. BFO: Basic Formal Ontology. *Applied Ontology*, 2022, No. 17 (1), pp. 17-43.

18. *Dolce Ontology Overview* [Electronic Resource]. URL: <https://www.loa.istc.cnr.it/dolce/overview.html> (accessed 20.05.2024).

19. Almeida J.P.A., Guizzardi G., Sales T.P., Falbo R.A. *gUFO: A Lightweight Implementation of the Unified Foundational Ontology (UFO)*

[Electronic Resource]. 2019. URL: <http://purl.org/nemo/doc/gufo> (accessed 20.05.2024).

20. *Common Core Ontologies* [Electronic Resource]. URL: https://github.com/CommonCoreOntology/CommonCoreOntologies_ontologyrepository.com (accessed 20.05.2024).

21. *Vektorny redaktor diagramm diagrams.net* [Vector Diagram Editor Diagrams.net]. [Electronic Resource]. URL: <https://github.com/jgraph/drawio/commit/9201e58e3814a3f2deald04edc953ee6a2851cb5> (accessed 20.05.2024). [in Russian].

22. Lamy J.B. Owlready: Ontology-Oriented Programming in Python with Automatic Classification and High-Level Constructs for Biomedical Ontologies. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2017, No. 80, pp. 11-28. DOI: 10.1016/j.artmed.2017.07.002.

23. *Biblioteka yazyka Python dlya raboty s failami formatov .rdf i .rdfs* [Python Library for Working with .rdf and .rdfs Files]. [Electronic Resource]. URL: <https://github.com/RDFLib/rdfliib> (accessed 20.05.2024).

24. Musen M.A. Protégé Team. The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward. *AI Matters*, 2015, Jun. 1(4), pp. 4-12. DOI: 10.1145/2757001.2757003.

25. *W3C Specifications* [Electronic Resource]. URL: [https://www.w3.org/TR/?tags\[0\]=data](https://www.w3.org/TR/?tags[0]=data) (accessed 20.05.2024).

Статья поступила в редакцию 16.10.2024; одобрена после рецензирования 23.10.2024; принята к публикации 30.10.2024.

The article was submitted 16.10.2024; approved after reviewing 23.10.2024; accepted for publication 30.10.2024.

Научная статья

УДК 681.514

doi: 10.17122/1999-5458-2024-20-4-143-153

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ИНДУКЦИОННОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПЛОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

**Павел Александрович Хлюпин****Pavel A. Khlupin**

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

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

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

**Петр Игоревич Васильев****Petr I. Vasiliev**

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

Актуальность

Добыча, хранение, транспортировка и переработка нефти зачастую требует сопровождения нагревательными процессами с тщательным контролем входных и выходных параметров. Наиболее эффективной технологией нагрева в комплексах добычи, переработки и трубопроводного транспорта нефти является индукционный нагрев. Специфика тепловой обработки нефти предусматривает поддержание определенного температурного режима, при котором достигается снижение ее вязкости до необходимого уровня, при этом не допускается коксование. Технология индукционного нагрева позволяет регулировать выходную мощность, а значит, и температуру нагрева в широком диапазоне (1–100 %), что позволяет поддерживать заданный температурный режим воздействия на нефть. Энергетически эффективно применение резонансного режима для индукционных нагревательных систем. Одним из методов регулирования мощности резонансных систем является плотно-импульсная модуляция, обеспечивающая поддержание резонансного режима и широкий диапазон регулирования системы.

Ключевые слова

индукционный нагрев
вязкой нефти,
система управления
мощности нагрева,
микроконтроллер,
плотно-импульсная
модуляция

Цель исследования

Разработать алгоритм работы модулятора, позволяющий сократить объем занимаемой памяти на микроконтроллере и управлять мощностью нагрева индукционной нагревательной установки.

Методы исследования

В данном исследовании использованы следующие методы: математическое моделирование, принципы модуляции сигналов, компьютерное моделирование работы плотно-импульсного модулятора.

Результаты

Создана схема плотно-импульсной модуляции на AVR микроконтроллере ATmega328, а также программный код для схемы плотно-импульсного модулятора.

Для цитирования: Хлюпин П. А., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И. Микропроцессорная система регулирования мощности индукционной нагревательной системы на основе плотно-импульсной модуляции // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. № 4. Т. 20. С. 143-153. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-143-153>.

Original article

MICROPROCESSOR POWER CONTROL SYSTEM FOR INDUCTION HEATING SYSTEM BASED ON PULSE-DENSITY MODULATION

Relevance

Oil production, storage, transportation and refining often require accompanying heating processes with careful control of input and output parameters. The most effective heating technology in oil production, refining and pipeline transportation complexes is induction heating. The specifics of oil heat treatment involve maintaining a certain temperature regime, which reduces its viscosity to the required level, while preventing coking. Induction heating technology allows regulating the output power, and therefore the heating temperature, in wide ranges (1–100 %), which allows maintaining a given temperature regime of action on oil. The use of a resonant mode for induction heating systems is energetically efficient. One of the methods for regulating the power of resonant systems is dense-pulse modulation, which ensures the maintenance of a resonant mode and a wide range of system regulation.

Aim of research

Develop an algorithm for the operation of a modulator that allows reducing the amount of memory occupied on the microcontroller and controlling the heating power of an induction heating unit.

Research methods

The following methods were used in this study: mathematical modeling, principles of signal modulation, computer modeling of the operation of a pulse-dense modulator.

Results

A dense-pulse modulation circuit has been created on the AVR microcontroller ATmega328, as well as a program code for the dense-pulse modulator circuit.

Keywords

induction heating
of viscous oil, efficient
heating power control
system, microcontroller,
pulse-density modulation

For citation: Khlopun P. A., Aflyatunov R. R., Vasiliev P. I. Mikroprotsessornaya sistema regulirovaniya moshchnosti induktsionnoy nagrevatel'noy sistemy na osnove plotno-impul'snoy modulyatsii [Microprocessor Power Control System for Induction Heating System Based on Pulse-Density Modulation]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* – *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2024, No. 4, Vol. 20, pp. 143-153 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2024-20-4-143-153>.

Наиболее эффективными способами регулирования мощности для резонансного режима работы системы индукционного нагрева являются способы, которые не вносят изменений в определенные параметры сигнала переменного тока. К таким параметрам относятся форма импульсов переменного тока, частота их следования и фаза. Исключая возможность регулировки данных параметров, можно сделать вывод о том, что оставшиеся параметры переменного тока (амплитуда и плотность импульсов) подвержены регулированию (модуляции) без нарушения резонансного режима работы инвертора [1–6].

Амплитудная модуляция обеспечивает возможность регулировки мощности резонансной системы индукционного нагрева за счет изменения величины постоянного напряжения, подаваемого на силовую часть инвертора, в результате чего меняется амплитуда переменного напряжения на выходе инвертора и, как следствие, потребляемая системой мощность. Данный способ регулирования мощности реализуется дополнительными устройствами, такими как регулируемый автотрансформатор для понижения напряжения питающей сети переменного тока перед выпрямителем инвертора, а также чоппер, обеспечивающий понижение напряжения в цепи питания постоянного тока после выпрямителя инвертора. Использование автотрансформатора сильно увеличивает массу и габариты всей системы ввиду прямой зависимости между мощностью индукционной нагревательной системы, массой и габаритами трансформатора [2, 3, 7–9]. Применение чоппера также требует дополнительного пространства в корпусе индукционной нагревательной системы, гораздо меньшего, чем в случае применения автотрансформатора, однако стоимость такого устройства регулирования мощности будет не сильно отли-

чаться от применения автотрансформатора ввиду необходимости использования сопоставимых по мощности с индукционной нагревательной системой дорогих полупроводниковых транзисторов. Таким образом, амплитудная модуляция может быть реализована исключительно аппаратным решением, что сильно влияет на итоговую массу, габариты и стоимость системы индукционного нагрева.

В отличие от амплитудной модуляции плотно-импульсная модуляция (ПИМ) может быть реализована программным образом на едином микроконтроллере системы управления резонансным инвертором в совокупности с различными защитами и функциями, такими как фазовая автоподстройка частоты.

ПИМ осуществляет модуляцию входного сигнала по плотности импульсов, пропуская часть из них на выход модулятора в зависимости от выбранного уровня модуляции в процентах (от 0 % до 100 %). При этом форма входного сигнала и фаза остаются неизменными. Существует несколько алгоритмов реализации плотно-импульсной модуляции: применение диффузии ошибки и наложение шаблонов на входной сигнал.

Упрощенно — принцип диффузии ошибки построен на алгоритме, осуществляющем сведение к нулю ошибки между заданным значением мощности и регулируемым в процессе следования сигнала. Такой алгоритм пропускает на выход модулятора импульс входного сигнала в зависимости от предыдущего состояния системы и ошибки, полученной в ходе сравнения текущего значения мощности с заданным. Основным недостатком такого алгоритма является высокий процент ошибки на начальных тактах сигнала (рисунок 1) [1]. Лишь после 10 такта ошибка среднего значения становится ниже 10 %. Это значит, что время релаксации системы в процессе

регулировки мощности зависит от частоты входного сигнала. Так, например, для частоты входного сигнала 100 кГц время релаксации системы с точностью до 10 % не превышает 0,1 мс, а с точностью до 2 % – 0,5–0,6 мс [1]. Такая задержка не является существенной, однако может потребовать дополнительных настроек коэффициентов в случае применения модулятора в связке с PID регулятором для контроля температуры нагреваемого объекта. Помимо этого, на расчет ошибки диффузии в процессе следования сигнала требуются затраты оперативной памяти микроконтроллера [10–12].

Применение шаблонов для реализации плотно-импульсной модуляции решает проблему длительного процесса релаксации системы. Нет необходимости в расчетах, все шаблоны хранятся в энергонезависимой памяти микроконтроллера и применяются к входному сигналу в зависимости от выбранного значения уровня мощности. Входной сигнал (рисунок 2, а) поступает на вход микро-

контроллера, где при помощи счетчика происходит прерывание сигнала в соответствии с выбранным шаблоном. Количество кадров шаблона влияет на точность настройки уровня мощности. Так, для шага регулировки 10 % необходим шаблон с 10-ю кадрами. Каждый кадр соответствует одному периоду входного сигнала. У кадров есть очередность. Примеры выходного сигнала ПИМ для 10 %, 20 %, 30 %, 40 % и 100 % мощности приведены на рисунке 2, *b–f*. Наличие кадра в шаблоне записано как «1», что равноценно пропуску входного импульса соответствующей очередности на выход модулятора. Отсутствие кадра записывается в шаблоне как «0», и соответствующий кадру период входного сигнала на выход модулятора не попадает. Например, для шаблона ПИМ 40 % на выход модулятора пропускаются первый, четвертый, шестой и девятый период входного сигнала. Равномерное распределение кадров по шаблону обеспечивает снижение низкочастотной модуляции сигнала. Низкочастотная

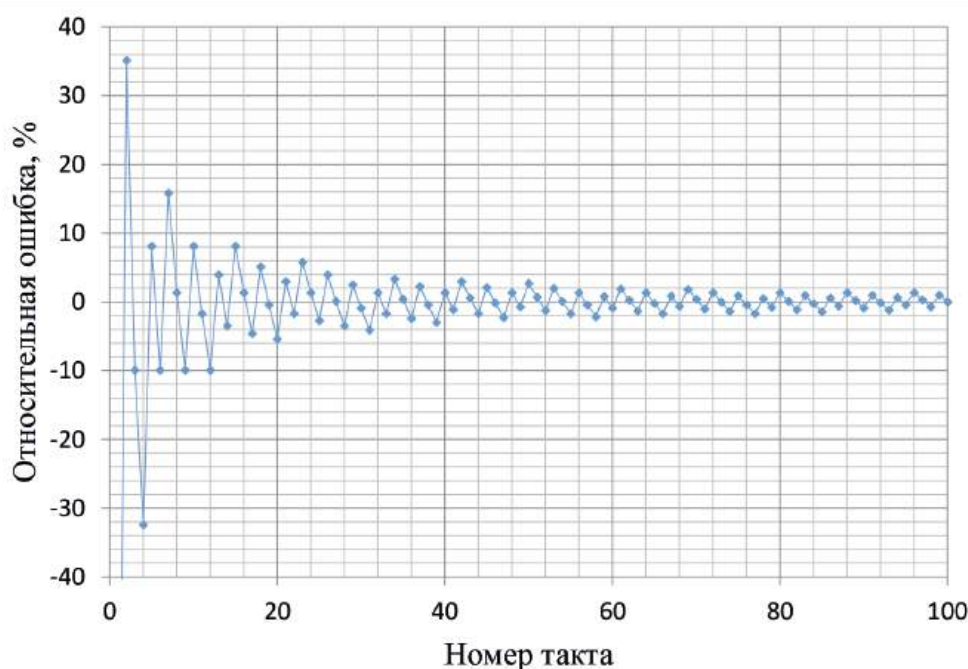


Рисунок 1. Ошибка среднего значения для принципа диффузии ошибки в ПИМ

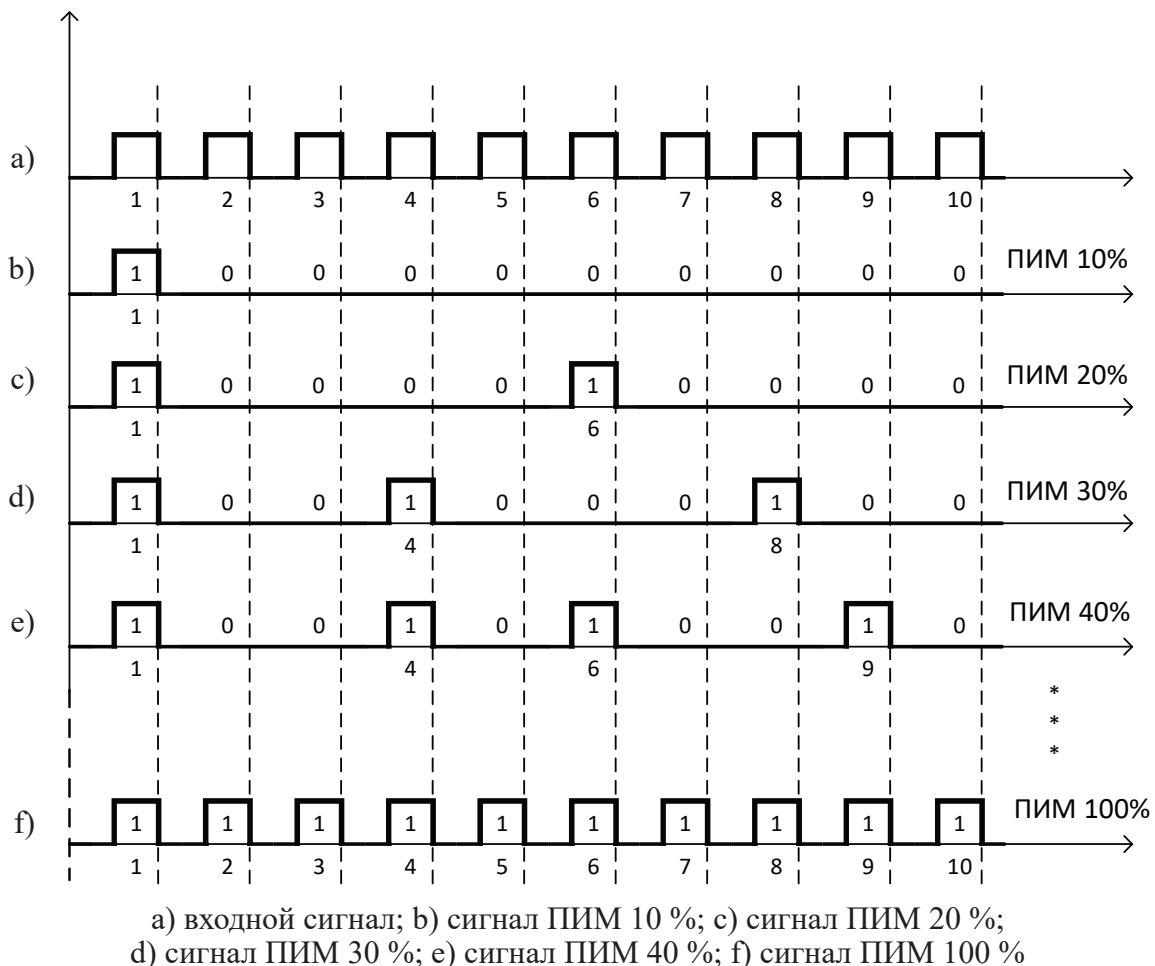
Figure 1. Mean value error for the error diffusion principle in PDM

составляющая модуляции сигнала (до 20 кГц) приводит к гулу согласующего трансформатора, а также способна сбить режим работы автогенераторной системы резонансного инвертора [13–16].

Шаблоны плотно-импульсного модулятора с шагом регулировки 10 % будут занимать 12,5 байт энергонезависимой памяти микроконтроллера. Для шага 1 % необходимо хранить в памяти 100 шаблонов объемом по 100 бит, что соответствует 1250 байт. Для микроконтроллеров AVR младших серий данный объем занимаемой памяти может быть существенным. Так, например, для микроконтроллера ATtiny 2113 объем Flash памяти

составляет 2КБ, и 1250 байт, выделенных под шаблоны ПИМ, займут 62,5 % общей памяти.

Авторами предложено решение, позволяющее более чем в 2 раза сократить объем занимаемой памяти микроконтроллера. Решение основано на инверсии шаблонов с 1 % до 49 %, что соответствует шаблонам с 99 % до 51 %. Шаблоны 0 % и 100 % соответствуют состояниям «включено» и «выключено», когда входной сигнал полностью не пропускается на выход модулятора либо полностью пропускается. Реализовать такой режим работы можно при помощи логического элемента «И», на вход которого будут поданы сигнал ПИМ и вход-



a) input signal; b) PDM signal 10 %; c) PDM signal 20 %;
d) PDM signal 30 %; e) PDM signal 40 %; f) PDM signal 100 %

Рисунок 2. Схема наложения шаблонов в ПИМ

Figure 2. Pattern superposition scheme in PDM

ной сигнал. Таким образом, в памяти микроконтроллера будут храниться лишь шаблоны с 1 % по 50 %. Пример инверсии шаблона 40 % в 60 % приведен на рисунке 3.

Инверсия шаблона может быть выполнена как программным путем, так и аппаратным, при помощи внешнего логического элемента «исключающее ИЛИ». Авторами реализован аппаратный способ ввиду снижения нагрузки на

микроконтроллер. По этой же причине использован дискретный логический элемент «И» для модуляции входного сигнала. Для исследования работы плотно-импульсного модулятора с возможностью инверсии шаблонов была собрана схема, приведенная на рисунке 4.

Схема ПИМ собрана на распространенном AVR микроконтроллере ATmega328. Входной сигнал поступает

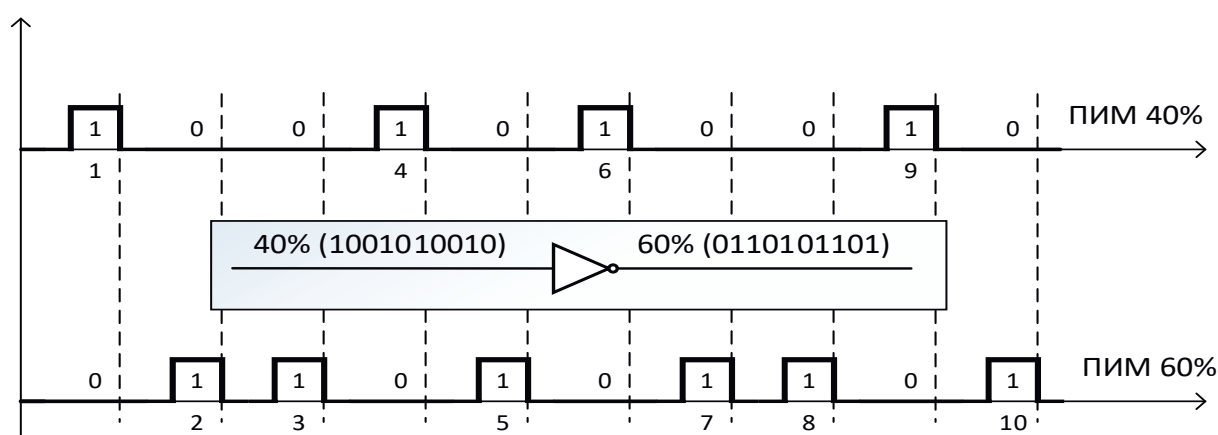


Рисунок 3. Инверсия шаблона ПИМ 40 % в 60 %

Figure 3. Inversion of the PDM template 40 % in 60 %

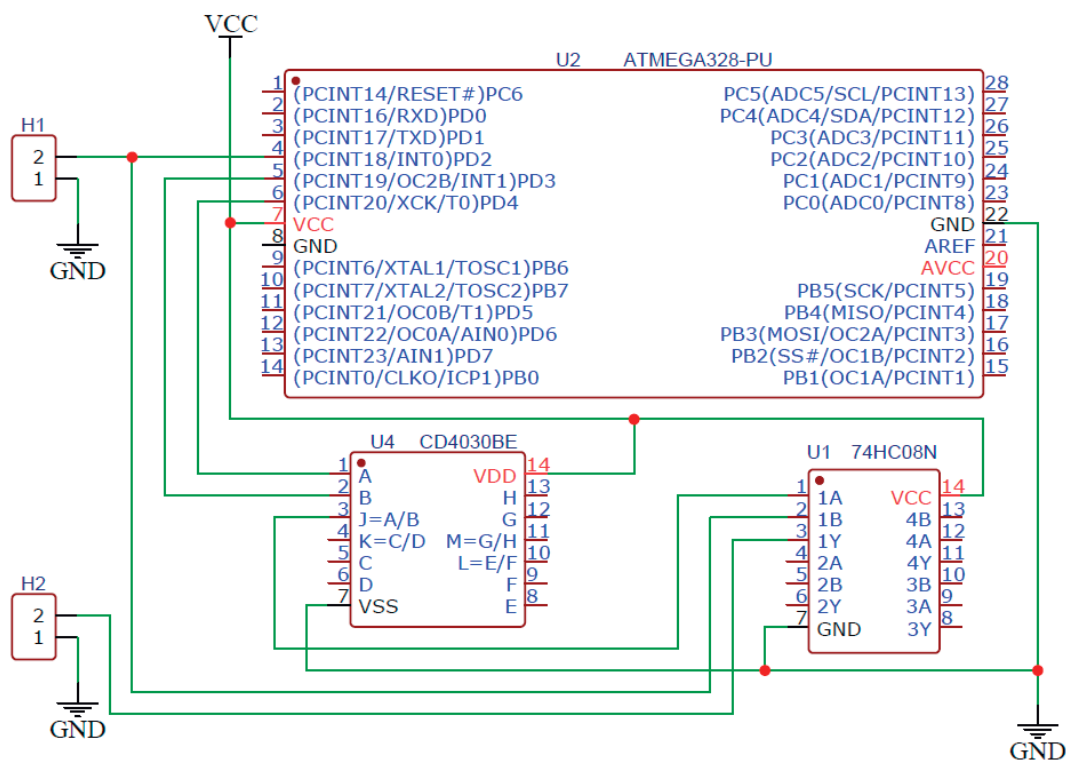


Рисунок 4. Схема реализации ПИМ на базе ATmega328

Figure 4. PDM circuit based on ATmega328

на цифровой вход PD2. После модуляции входного сигнала в соответствии с алгоритмом работы модулятора, представленном на рисунке 5, сигнал ПИМ поступает на цифровой вывод PD3. Для примера построен шаблон, соответствующий 25 % мощности. Входной модулируемый сигнал поступает на скоростной счетчик импульсов, осуществляющий счет по заднему фронту импульса. При достижении 100 счетчик сбрасывается, и цикл счета повторяется. Во время счета выходной сигнал от счетчика поступает на компараторы, количество которых должно быть равно общему количеству импульсов, пропущенных на выход модулятора, для 25 % это 25 компараторов. На каждом компараторе устанавливается значение такта, на котором будет пропущен на выход импульс входного сигнала. Выходы всех компараторов объединены на логическом элементе «ИЛИ», реализованном программным путем. Таким образом, на выходе модулятора будут лишь те импульсы, поряд-

ковый номер которых (по ходу счета от 0 до 100) будет соответствовать номеру, записанному в памяти (шаблону).

На цифровом выводе PD4 установлен логический ноль. Сигнал ПИМ и логический ноль поступают на входы логического элемента «исключающее ИЛИ» (CD4030). Таким образом, при смене логического нуля на единицу будет происходить инверсия сигнала модуляции, что в конечном итоге приведет к переводу шаблона 25 % в шаблон, соответствующий 75 % мощности. Выход логического элемента «исключающее ИЛИ» соединен с входом логического элемента «И» (74НС08), на второй же вход поступает входной модулируемый сигнал. На выходе логического элемента «И» можно наблюдать выходной сигнал с плотно-импульсно модуляцией, соответствующий выбранной мощности (шаблону). Программный код для описанной ранее схемы плотно-импульсного модулятора приведен на рисунке 6.

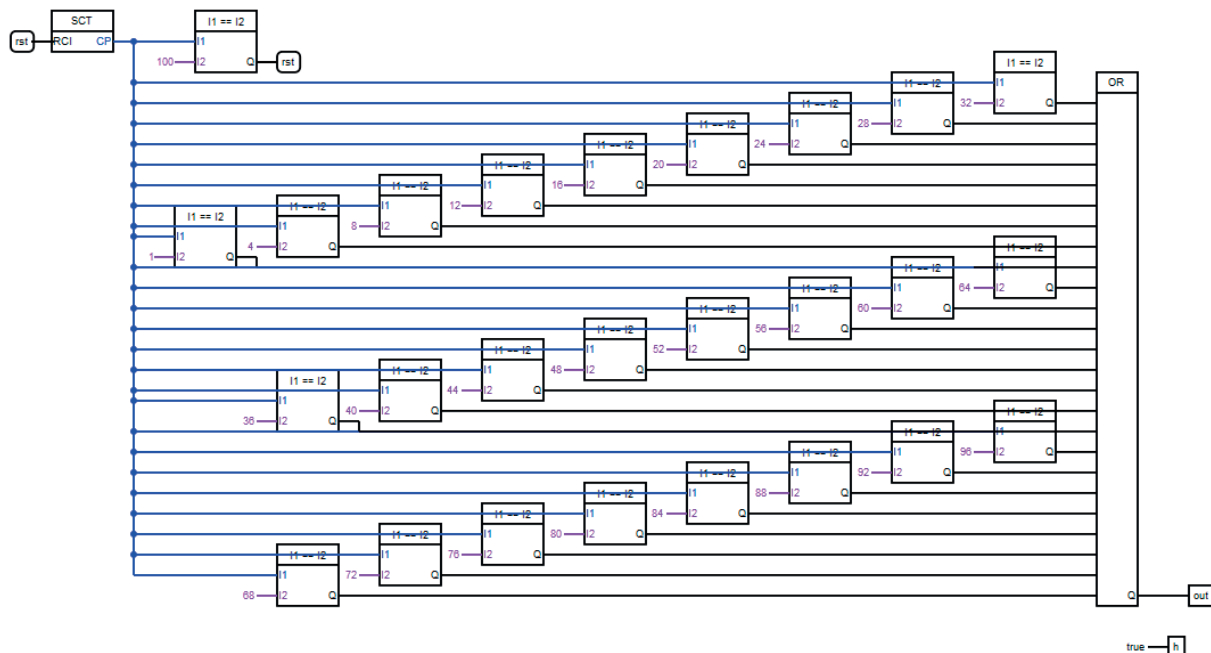


Рисунок 5. Алгоритм работы плотно-импульсного модулятора, составленный в визуальной среде программирования FLProg

Figure 5. The algorithm of operation of the tight-pulse modulator, compiled in the visual programming environment FLProg

```

bool _gtv1;
int _SCT_1_CPOP = 0;
bool _SCT_1_RCPiOS = 0;
void setup()
{
    pinMode(4, OUTPUT);
    digitalWrite(4, 0);
    pinMode(3, OUTPUT);
    digitalWrite(3, 0);
    pinMode(2, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), _SCT_1coutFunction, FALLING);
}
void loop()
{
    //Плата:1
    if(_gtv1)
    {
        if(!_SCT_1_RCPiOS)
        {
            _SCT_1_CPOP = 0;
            _SCT_1_RCPiOS = 1;
        }
        else
        {
            _SCT_1_RCPiOS = 0;
        }
        _gtv1 = (_SCT_1_CPOP) == (100);
        digitalWrite(4, (((_SCT_1_CPOP) == (32)) || ((_SCT_1_CPOP) == (28)) || ((_SCT_1_CPOP) == (24)) ||
        ((_SCT_1_CPOP) == (20)) || ((_SCT_1_CPOP) == (16)) || ((_SCT_1_CPOP) == (12)) || ((_SCT_1_CPOP) == (8)) ||
        ((_SCT_1_CPOP) == (4)) || ((_SCT_1_CPOP) == (1)) || ((_SCT_1_CPOP) == (64)) || ((_SCT_1_CPOP) == (60)) ||
        ((_SCT_1_CPOP) == (56)) || ((_SCT_1_CPOP) == (52)) || ((_SCT_1_CPOP) == (48)) || ((_SCT_1_CPOP) == (44)) ||
        ((_SCT_1_CPOP) == (40)) || ((_SCT_1_CPOP) == (36)) || ((_SCT_1_CPOP) == (96)) || ((_SCT_1_CPOP) == (92)) ||
        ((_SCT_1_CPOP) == (88)) || ((_SCT_1_CPOP) == (84)) || ((_SCT_1_CPOP) == (80)) || ((_SCT_1_CPOP) == (76)) ||
        ((_SCT_1_CPOP) == (72)) || ((_SCT_1_CPOP) == (68)))));
        digitalWrite(3, 0);
    }
    void _SCT_1coutFunction()
    {
        _SCT_1_CPOP = _SCT_1_CPOP + 1;
    }
}

```

Рисунок 6. Программный код ПИМ 25/75 %

Figure 6. PDM program code 25/75 %

Результат работы программного кода с шаблоном 25 % представлен на рисунке 7, а, где синий канал — входной сигнал, желтый канал — сигнал на выходе плотно-импульсного модулятора. Замена

свободной переменной с логического нуля на единицу приводит к инверсии сигнала модуляции и изменению шаблона на 75 % (рисунок 7, б).



a)



b)

a) 25 % мощности из 100 %; b) 75 % мощности из 100 %

a) 25 % of power out of 100 %; b) 75 % of power out of 100 %)

Рисунок 7. Результат работы программного кода ПИМ

Figure 7. The result of the PDM program code operation

Актуальной является разработка плотно-импульсного модулятора на основе семейства микроконтроллеров STM32 серии H7 и G4 ввиду их высокой производительности, возможности работы в реальном времени и цифровой обработки сигналов с низким энергопотреблением.

Выводы

Таким образом, доказана эффективность использования шаблонов при регулировании мощности резонансных индукционных нагревательных систем

методом плотно-импульсной модуляции сигнала. Является актуальной разработка микропроцессорной системы управления на основе данного метода регулирования мощности. Разработанное программное обеспечение позволит решить проблему постоянной корректировки коэффициентов модулятора совместно с ПИД-регулятором для управления температурой нагреваемого объекта, сократить вдвое объем памяти, занимаемой микроконтроллером, а также решить проблему длительного процесса релаксации системы.

Список источников

1. Белоусов А.С. Необходимость определения оптимальной температуры подготовки высоковязкой нефти в условиях Крайнего Севера. Вестник науки, 2024, № 1. С. 1940-1943.
2. Esteve V., et al. Improving the Efficiency of IGBT Series-Resonant Inverters Using Pulse Density Modulation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. March 2011. Vol. 58, No. 3. P. 979-987. DOI: 10.1109/TIE.2010.2049706.
3. Fujita H., Akagi H. Pulse-Density Modulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage-Source Inverter for Induction Melting Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. March-April 1996. Vol. 32, No. 2. P. 279-286. DOI: 10.1109/28.491475.
4. Pholsriphim A., Nurach S., Lenwari W. Half-Bridge Resonance Inverter for Induction Heating Using Digital-Controlled Pulse Density Modulation Technique // 12th IEEE Conference on ICIEA. June 2017. P. 1084-1086. DOI: 10.1109/ICIEA.2017.8283001.
5. Sarnago H., Lucía Ó., Burdío J. M. Interleaved Resonant Boost Inverter Featuring SiC Module for High-Performance Induction Heating // IEEE Transactions on Power Electronics. Feb. 2017. Vol. 32, No. 2. P. 1018-1029, DOI: 10.1109/TPEL.2016.2554607.
6. Макулов И.А., Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Высокотехнологичные системы индукционного нагрева на ДНС // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всеросс. науч.-техн. конф.: в 2 Т. Уфа: УГНТУ, 2009. Т. 2. С. 21-25. EDN: TLDNKD.
7. Макулов И.А., Мамаев Н.М., Конесев С.Г. Применение систем среднечастотного индукционного нагрева при транспортировке нефтепро-

дукта // Нефтегазовое дело. 2008. Т. 6, № 2. С. 75-80. EDN: JWEXNN.

8. Конесев С.Г., Хлюпин П.А., Макулов И.А. Проблемы и способы решения трубопроводного транспорта вязкой нефти // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2009. Т. 2. С. 16-20. EDN: TLDNKN.

9. Конесев С.Г., Хлюпин П.А., Садиков М.Р. Анализ эффективности применения нагревательных систем при перекачке вязких нефтей // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. (с междунар. участием). Уфа: УГНТУ, 2011. С. 212-219. EDN: TLDNMB.

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

11. Конесев С.Г., Макулов И.А., Хлюпин П.А. Электротехнологии как средство повышения надежности и безопасности систем трубопроводного транспорта // Энергетика и энергоэффективные технологии: сб. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. 2007. С. 150-151. EDN: TSRTAV.

12. Макулов И.А., Никитин Ю.А. Оборудование и особенности применения индукционного нагрева в нефтегазовой промышленности // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2014. № 3. С. 50-53. EDN: SYPBWJ.

13. Sude Hatem. Simulation and Implementation of an Induction Heating System for Heating Brittle Thin Metal Sheets by Various Excitation Current Frequencies // International Journal of Engineering

Research and Development. 2024. No. 16. P. 895-908. <https://doi.org/10.29137/umagd.1439051>.

14. Aflyatunov R.R., Khazieva R.T., Vasilyev P.I. Development and Research of an Induction Heating System for a Long Pipeline // *Journal of Physics: Conference Series*, 2022. No. 16. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012039.

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

16. Gholami M., Verougstraete B., Vanoudenhoven R., Baron G.V., Van Assche T., Denayer J.F.M. Induction Heating as an Alternative Electrified Heating Method for Carbon Capture Process // *Chemical Engineering Journal*. 2022. P. 431-436.

References

1. Belousov A.S. Neobkhodimost' opredeleniya optimal'noi temperatury podgotovki vysokovyazkoi nefi v usloviyakh Krainego Severa [The Need to Determine the Optimal High-Viscosity Preparation Temperatures Oil in the Conditions Far North]. *Vestnik nauki — Science Bulletin*, 2024, No. 1, pp. 1940-1943. [in Russian].

2. Esteve V., et al. Improving the Efficiency of IGBT Series-Resonant Inverters Using Pulse Density Modulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, March 2011, Vol. 58, No. 3, pp. 979-987. DOI: 10.1109/TIE.2010.2049706.

3. Fujita H., Akagi H. Pulse-Density Modulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage-Source Inverter for Induction Melting Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, March-April 1996, Vol. 32, No. 2, pp. 279-286. DOI: 10.1109/28.491475.

4. Pholsriphim A., Nurach S., Lenwari W. Half-Bridge Resonance Inverter for Induction Heating Using Digital-Controlled Pulse Density Modulation Technique. *12th IEEE Conference on ICIEA*, June 2017, pp. 1084-1086. DOI: 10.1109/ICIEA.2017.8283001.

5. Sarnago H., Lucía Ó., Burdío J. M. Interleaved Resonant Boost Inverter Featuring SiC Module for High-Performance Induction Heating. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Feb. 2017, Vol. 32, No. 2, pp. 1018-1029, DOI: 10.1109/TPEL.2016.2554607.

6. Makulov I.A., Konesev S.G., Khlyupin P.A. Vysokotekhnologichnye sistemy induktsionnogo nagreva na DNS [High-Tech Induction Heating Systems at the Booster Pump Station]. *Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektrotekhnologii,*

elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii»: v 2 T. [Collection of Scientific Papers of the II All-Russian Scientific and Technical Conference «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of Enterprises»: in 2 Vol.]. Ufa, UGNTU Publ., 2009, Vol. 2, pp. 21-25. EDN: TLDNKD. [in Russian].

7. Makulov I.A., Mamaev N.M., Konesev S.G. Primenenie sistem srednechastotnogo induktsionnogo nagreva pri transportirovke nefteprodukta [Application of Medium-Frequency Induction Heating Systems in the Transportation of Petroleum Products]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2008, Vol. 6, No. 2, pp. 75-80. EDN: JWEXNN. [in Russian].

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

9. Konesev S.G., Khlyupin P.A., Sadikov M.R. Analiz effektivnosti primeneniya nagrevatel'nykh sistem pri perekachke vyazkikh neftei [Analysis of the Efficiency of Using Heating Systems for Pumping Viscous Oils]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii»* [Collection of Scientific Papers of the All-Russian Scientific and Technical Conference (with international participation) «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, UGNTU, 2011, pp. 212-219. EDN: TLDNMB. [in Russian].

10. 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].

11. Konesev S.G., Makulov I.A., Khlyupin P.A. Elektrotekhnologii kak sredstvo povysheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem truboprovodnogo transporta [Electrical Technologies as a Means of Increasing the Reliability and Safety of Pipeline Transport]. *Energetika i energoeffektivnye tekhnologii: Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoi*

nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Power Engineering and Energy Efficient Technologies: Collection of Reports of the II International Scientific and Technical Conference]. 2007, pp. 150-151. EDN: TSRTAV. [in Russian].

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

13. Sude Hatem. Simulation and Implementation of an Induction Heating System for Heating Brittle Thin Metal Sheets by Various Excitation Current Frequencies. *International Journal of Engineering*

Research and Development, 2024, No. 16, pp. 895-908. <https://doi.org/10.29137/umagd.1439051>.

14. Aflyatunov R.R., Khazieva R.T., Vasilyev P.I. Development and Research of an Induction Heating System for a Long Pipeline. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, No. 16. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012039.

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

16. Gholami M., Verougstraete B., Vanoudenhoven R., Baron G.V., Van Assche T., Denayer J.F.M. Induction Heating as an Alternative Electrified Heating Method for Carbon Capture Process. *Chemical Engineering Journal*, 2022, pp. 431-436.

Статья поступила в редакцию 20.11.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 05.12.2024.

The article was submitted 20.11.2024; approved after reviewing 28.11.2024; accepted for publication 05.12.2024.

ОБ АВТОРАХ

Афлятунов Радмир Рифович

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

Бакиров Аяз Азатович

аспирант кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Баширов Мусса Гумерович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Васильев Петр Игоревич

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

Головин Максим Михайлович

аспирант кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Горбунов Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и автоматизация технологических процессов», Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

Жаринов Юрий Александрович

кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных технологий Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Каримов Руслан Динарович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Крышко Константин Алексеевич

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

Латыпов Руслан Рустамович

студент кафедры информационных технологий Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Лысенко Олег Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Ляпушкин Сергей Викторович

кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Портнягин Николай Николаевич

доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Рогинская Любовь Эммануиловна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Сафиев Денис Альбертович

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

Сираев Фанис Фанилович

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

Туктаров Руслан Рифович

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

Хазиева Регина Тагировна

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

Хакимьянов Марат Ильгизович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Хафизов Алик Мусаевич

кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

Хлюпин Павел Александрович

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

Шабанов Виталий Алексеевич

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

Шабо Камил

кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации производственных процессов, Технический институт (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный Федеральный Университет имени М.К. Аммосова в г. Нерюнгри», Нерюнгри, Россия

Шишенков Максим Алексеевич

научный сотрудник лаборатории автоматизации, ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

Яшин Антон Николаевич

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

ABOUT THE AUTHORS

Aflyatunov Radmir R.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Bakirov Ayaz A.

Postgraduate Student of Aviation Heat Engineering and Thermal Power Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Bashirov Mussa G.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Golovin Maksim M.

Postgraduate Student of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of the Oil and Gas Industry, Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, Moscow, Russia

Gorbunov Anton S.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Power Supply and Automation of Technological Processes Department, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

Karimov Ruslan D.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Aviation Heat Engineering and Thermal Power Engineering Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Khafizov Alik M.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Lecturer of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Khakimyanov Marat I.

Doctor of Engineering Sciences, Associate 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 Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khlupin Pavel A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kryshko Konstantin A.

Senior Lecturer of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Latypov Ruslan R.

Student of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

Lyapushkin Sergey V.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Lysenko Oleg A.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Portnyagin Nikolay N.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of the Oil and Gas Industry, Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, Moscow, Russia

Roginskaya Lyubov E.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Electromechanics Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Safiev Denis A.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Shabanov Vitaliy A.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Shabo Kamil

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Production Processes, Technical Institute (branch) of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov» in Neryungri», Neryungri, Russia

Shishenkov Maksim A.

Researcher at the Automation Laboratory, Research Institute of Transneft LLC, Moscow, Russia

Siraeв Fanis F.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Tuktarov Ruslan R.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Vasiliev Petr I.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Yashin Anton N.

Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zharinov Yuri A.

Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor of Information Technology Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Salavat), Salavat, Russia

СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАННЫХ В 2024 ГОДУ

Андреанов В. С., Кича М. А. Возможности радиопередатчиков для подводной связи в информационных системах, № 3, С. 117-124.

Андрянов А. И. К исследованию динамики импульсного преобразователя постоянного напряжения с входным фильтром, № 2, С. 9-21.

Баширов М. Г., Крышко К. А., Хафизов А. М. Алгоритмическое обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы процесса гидрирования ацетилена, № 4, С. 84-91.

Баширов М. Г., Крышко К. А., Хафизов А. М. Программно-техническая реализация информационно-измерительной и управляющей системы процесса гидрирования ацетилена, № 4, С. 92-99.

Воротников М. Ю., Лимарев А. С., Николаев А. А. Разработка математической модели электромобиля, № 2, С. 37-49.

Гашенко Ю. В. Метрологический анализ системы измерения плотности пожароопасных жидкостей с применением волоконно-оптического преобразователя, № 2, С. 152-161.

Гизатуллин Ф. А., Абдрахманов В. Х., Габидуллина З. Г. Установка для оптической регистрации процессов образования искровых разрядов в полупроводниковых свечах и воспламенения горючих смесей в условиях испытательных стендов, № 3, С. 9-16.

Гизатуллин Ф. А., Демин А. Ю. Совершенствование средств контроля эффективности систем зажигания авиационных двигателей, № 1, С. 34-44.

Гирник А. С., Федянин А. Л. Исследование электромеханических перегрузок тяговых двигателей электровозов при нарушении режима эксплуатации, № 1, С. 19-33.

Горбунов А. С., Каримов Р. Д., Рогинская Л. Э., Бакиров А. А., Хакимьянов М. И. Оптимизация параметров электрогенераторов малой мощности для ветроэнергетических установок, № 4, С. 31-49.

Жаринов Ю. А., Латыпов Р. Р. Разработка виртуального тренажера предполетной подготовки беспилотного летательного аппарата, № 4, С. 100-108.

Зайцева А. А., Белявцев М. В., Зайцев Е. А., Кильмаков Д. К., Култаев Д. Р., Сайфутдинова З. Р. Синтез алгоритма управления двигателями вертолета в условиях структурной и параметрической неопределенности, № 2, С. 123-128.

Зайцева А. А., Белявцев М. В., Зайцев Е. А., Кильмаков Д. К., Силин И. П., Гаврилов В. Ф. Синтез интегрированной системы управления многодвигательной силовой установки вертолета по комплексу внутрдвигательных параметров, № 1, С. 97-105.

Закирничная М. М., Варламов В. А., Палладина Я. А. Оценка влияния коэффициента масштабирования базовой функции вейвлет-преобразования на степень проявления основных неисправностей центробежных насосных агрегатов в вейвлет-картинах, № 1, С. 106-120.

Закирничная М. М., Палладина Я. А. Выявление основных неисправностей центробежных насосных агрегатов с помощью колориметрического показателя амплитуды на основании моделирования вейвлет-картин, № 3, С. 98-106.

Зиннатуллин В. Ф., Коледин С. Н. Метод минимизации остатков в процессе компаундирования бензинов, основанный на интеграции линейного программирования и нейронной сети, № 1, С. 132-140.

Зыкин П. В., Хамитов Р. Н., Жеребцов С. Н., Ганичева Л. С. Синтез следящей системы управления электроприводами подачи и главного движения токарного станка с числовым программным управлением, № 1, С. 65-74.

Кантюков Н. Р., Хазиева Р. Т. Разработка модели зарядной станции для электромобиля, № 2, С. 64-75.

Китабов А. Н., Абуталипов У. М., Горбунов Д. Д., Хакимьянов М. И. Алгоритмическое и математическое обеспечение информационно-измерительной системы определения энергопотребления штанговых скважинных насосных установок, № 2, С. 89-102.

Китабов А. Н., Иванов А. В., Ткаченко М. Н., Абуталипов У. М. Разработка информационно-измерительной системы идентификации режимов течения водогазовой смеси, № 2, С. 76-88.

Корнеев П. Е., Игнатьев А. А. Разработка учебно-исследовательского лабораторного стенда промышленной автоматизации, № 2, С. 103-114.

Кузьминская Е. В., Скороспешкин М. В., Осипов В. В. Поверка цифровых средств измерений с использованием машинного зрения, № 3, С. 125-134.

Кулакова Е. С., Батыркаева А. М. Интеллектуальная система управления опосредованными выбросами кампуса, № 3, С. 89-97.

Кулакова Е. С., Батыркаева А. М. Разработка системы экологического мониторинга атмосферы с использованием возможностей нейронной сети, № 2, С. 115-122.

Купцов Д. В., Хазиева Р. Т. Повышение энергетической эффективности зарядных устройств путем использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, № 3, С. 56-66.

Лысенко О. А. Наблюдатель давления насосной установки с асинхронным электроприводом, № 4, С. 109-117.

Максудов Д. В. Влияние мощности барьерного разряда на эффективность образования озона в озонаторе сотовой структуры, № 3, С. 47-55.

Макулов И. А., Васильев П. И., Хазиева Р. Т. Моделирование процесса индукционного нагрева трубопровода для промышленного оборудования, № 3, С. 38-46.

Переверзин П. В., Переверзин А. П., Фетисов В. С., Миловзоров Д. Г. Разработка современных систем измерения глубины погружения бурильной колонны в процессе каротажа на бурильных трубах, № 3, С. 135-144.

Петушков М. Ю., Холодилов С. С. Применение вейвлет-анализа для синхронизации сигнала тока при диагностике синхронных двигателей с постоянными магнитами, № 3, С. 17-27.

Портнягин Н. Н., Головин М. М. Учет влияния динамической задержки намагничивания электротехнической стали в системах управления электроприводом, № 4, С. 21-30.

Саттаров Р. Р., Махиянов А. В., Миниахметова С. О. Компьютерное моделирование ветроустановки на основе двух синхронных генераторов с постоянными магнитами, № 3, С. 28-37.

Саттаров Р. Р., Махиянов А. В. Упрощенная компьютерная модель ветроэнергетической системы на основе двух магнитоэлектрических генераторов с реконфигурируемыми обмотками, № 1, С. 45-54.

Сафиев Д. А., Туктаров Р. Р., Хазиева Р. Т. Прогнозирование и управление производством солнечной энергии с помощью искусственного интеллекта, № 4, С. 118-129.

Сидоров С. В., Сушков В. В., Сухачев И. С. Моделирование однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью на модульной лабораторной установке, № 1, С. 9-18.

Сираев Ф. Ф., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т. Математическое и компьютерное моделирование преобразователя для малой ветроустановки, № 1, С. 75-89.

Сираев Ф. Ф., Хазиева Р. Т. Проектирование частотно-регулируемого электропривода с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором для магистрального насосного агрегата, № 4, С. 59-72.

Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Димукашева Г. Е., Коломеец Д. А. Преобразование тепловой энергии в электричество: потенциал и эффективность термоэлектрических генераторов на основе элементов Пельтье, № 1, С. 55-64.

Сухачев И. С., Шеломенцев В. А., Хмара Г. А., Сидоров С. В., Попов Е. И., Швецова А. А. Идентификация состояния силовых трансформаторов 110(35)/10 кВ на основе анализа данных тепловизионного обследования и методов искусственного интеллекта, № 2, С. 22-36.

Хазиева Р. Т. Методика выбора оптимального места расположения солнечной электростанции, № 1, С. 121-131.

Хазиева Р. Т. Проектирование солнечной электростанции, № 2, С. 50-63.

Хайдаров И. И., Шарипов Р. Р. Бездатчиковая система управления синхронным двигателем, № 1, С. 90-96.

Хакимов Э. Р., Сулейманов И. Н. Моделирование блока управления маршрутизационного и коммутационного оборудования, № 3, С. 107-116.

Хлютин П. А., Афлятунов Р. Р., Васильев П. И. Микропроцессорная система регулирования мощности индукционной нагревательной системы на основе плотно-импульсной модуляции, № 4, С. 143-153.

Храмкин И. А., Савиных М. А., Пономарев С. В. Оценка погрешности квантования при измерении среднеквадратических значений синусоидальных сигналов, № 2, С. 139-151.

Хузин Т. Р., Закирничная М. М. Интеллектуальная информационная система для вибродиагностики насосных агрегатов, основанная на теории детерминированного хаоса, № 2, С. 29-138.

Хурамышин Д. Р., Уликанов Р. Р., Коледин С. Н. Разработка программного обеспечения для определения объема фаз двухфазной смеси в трубопроводе стенда, № 3, С. 145-156.

Шабанов В. А., Хазиева Р. Т., Хакимьянов М. И. Кафедре электротехники и электрооборудования предприятий УГНТУ 70 лет, № 4, С. 9-20.

Шабо К., Ляпушкин С. В. Оптимизация динамических режимов асинхронного позиционного электропривода с тиристорным регулятором тока ротора, № 4, С. 50-58.

Шарилов Р. Р., Хайдаров И. И. Программный комплекс для реализации асинхронного частотного пуска высоковольтных двигателей и снижения времени перерыва в работе двигателя при кратковременной потере питания, № 1, С. 141-148.

Шишеников М. А. Информационное моделирование объектов транспорта нефти с применением семантических технологий, № 4, С. 130-142.

Шумихин А. Ю., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т. Компьютерное моделирование работы релейной защиты подстанции в пакете MATLAB SIMULINK, № 1, С. 67-79.

Яшин А. Н. Преобразование ваттметрограммы электропривода установки штангового глубинного насоса в динамограмму, № 3, С. 80-88.

Яшин А. Н. Исследование влияния параметров балансирующего уравновешивающего контргруза на выходные параметры электротехнического комплекса установки штангового глубинного насоса, № 4, С. 73-83.

LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2024

- Andrianov V. S., Kicha M. A.* Capabilities of radio transmitters for underwater communication in information systems, № 3, P. 117-125.
- Andriyanov A. I.* To study the dynamics of a pulse-width converter with an input filter, № 2, P. 9-21.
- Bashirov M. G., Kryshko K. A., Khafizov A. M.* Algorithmic support of information-measuring and control system of the acetylene hydrogenation process, № 4, P. 84-91.
- Bashirov M. G., Kryshko K. A., Khafizov A. M.* Software and technical implementation of the information measuring and control system of the acetylene hydrogenation process, № 4, P. 92-99.
- Gashenko Yu. V.* Metrological analysis of a system for measuring the density of flammable liquids using a fiber-optic transducer, № 2, P. 152-161.
- Girnik A. S., Fedyanin A. L.* Investigation of electro-mechanical overloads of electric locomotives traction engines in case of operating conditions violation, № 1, P. 19-33.
- Gizatullin F. A., Abdrakhmanov V. Kh., Gabidullina Z. G.* Installation for optical registration of the processes of formation of spark discharges in semiconductor spark plugs and ignition of flammable mixtures under test bench conditions, № 3, P. 9-16.
- Gizatullin F. A., Demin A. Yu.* Improving technique for efficiency control of aircraft engine ignition systems, № 1, P. 34-44.
- Gorbunov A. S., Karimov R. D., Roginskaya L. E., Bakirov A. A., Khakimyanov M. I.* Optimization of parameters of low-power electric generators for wind power plants, № 4, P. 31-49.
- Kantyukov N. R., Khazieva R. T.* Development of a charging station model for an electric vehicle, № 2, P. 64-75.
- Khakimov E. R., Suleymanov I. N.* Modeling of the control module of routing and switching equipment, № 3, P. 107-116.
- Khaydarov I. I., Sharipov R. R.* Sensorless synchronous motor control system, № 1, P. 90-96.
- Khazieva R. T.* Methodology for selecting the optimal location of a solar power plant, № 1, P. 121-131.
- Khazieva R. T.* Solar photovoltaic power plant design, № 2, P. 50-63.
- Khlopun P. A., Aflyatunov R. R., Vasiliev P. I.* Microprocessor power control system for induction heating system based on pulse-density modulation, № 4, P. 143-153.
- Khramkin I. A., Savinykh M. A., Ponomarev S. V.* Estimation of quantization error in measurement of root-mean-square values of sine signals, № 2, P. 139-151.
- Khuramshin D. R., Ulikanov R. R., Koledin S. N.* Software development for determining the volume of phases of a two-phase mixture in the pipeline of the stand, № 3, P. 145-156.
- Khuzin T. R., Zakirnichnaya M. M.* Intelligent information system for pump unit vibrodiagnostics based on determined chaos theory, № 2, P. 129-138.
- Kitabov A. N., Abutalipov U. M., Gorbunov D. D., Khakimyanov M. I.* Algorithmic and mathematical support of information measuring system for determining energy consumption of rod well pumping units, № 2, P. 89-102.

-
- Kitabov A. N., Ivanov A. V., Tkachenko M. N., Abutalipov U. M.* Development of an information-measuring system for identifying flow modes of a water-gas mixture, № 2, P. 76-88.
- Korneev P. E., Ignatyev A. A.* Development of a training and research laboratory stand for industrial automation, № 2, P. 103-114.
- Kulakova E. S., Batyrkaeva A. M.* Development of the system of ecological monitoring of the atmosphere using neural network capabilities, № 2, P. 115-122.
- Kulakova E. S., Batyrkaeva A. M.* Intelligent control system of campus indirect emissions, № 3, P. 89-97.
- Kuptsov D. V., Khazieva R. T.* Increasing the energy efficiency of chargers by using a multifunctional integrated electromagnetic component, № 3, P. 56-66.
- Kuzminskaya E. V., Skorospeshkin M. V., Osipov V. V.* Verification of digital measuring instruments using machine vision, № 3, P. 125-134.
- Lysenko O. A.* Pumping unit pressure observer with asynchronous electric drive, № 4, P. 109-117.
- Maksudov D. V.* Influence of barrier discharge power on the efficiency of ozone formation in a honeycomb structure ozonizer, № 3, P. 47-55.
- Makulov I. A., Vasiliev P. I., Khazieva R. T.* Modeling of the induction heating process of a pipeline for industrial equipment, № 3, P. 38-46.
- Pereverzin P. V., Pereverzin A. P., Fetisov V. S., Milovzorov D. G.* Development of modern systems for measuring the depth of a drilling rig during the logging on a drill pipe, № 3, P. 135-144.
- Petushkov M. Yu., Kholodilov S. S.* Application of wavelet analysis for current signal synchronization in diagnostics of permanent magnet synchronous motors, № 3, P. 17-27.
- Portnyagin N. N., Golovin M. M.* Accounting for the influence of the dynamic magnetization delay of electrical steel in electric drive control systems, № 4, P. 21-30.
- Safiev D. A., Tuktarov R. R., Khazieva R. T.* Predict and manage solar energy production with artificial intelligence, № 4, P. 118-129.
- Sattarov R. R., Makhyanov A. V.* Development and research of wind power devices with reconfigurable windings, № 1, P. 45-54.
- Sattarov R. R., Makhyanov A. V., Miniakhmetova S. O.* Computer simulation of a wind turbine based on two synchronous generators with permanent magnets, № 3, P. 28-37.
- Shabanov V. A., Khazieva R. T., Khakimyanov M. I.* 70th Anniversary of the Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department of USPTU, № 4, P. 9-20.
- Shabo K., Lyapushkin S. V.* Optimization of dynamic modes of an asynchronous positional electric drive with a thyristor rotor current regulator, № 4, P. 50-58.
- Sharipov R. R., Khaydarov I. I.* Software complex for implementing asynchronous frequency starting of high-voltage motors and reducing break time in motor operation in the event of short-term power loss, № 1, P. 141-148.
- Shishenkov M. A.* Information modeling of oil transport objects using semantic technologies, № 4, P. 130-142.
- Shumikhin A. Yu., Kirillov R. V., Khazieva R. T.* Computer simulation of operation of substation relay protection in MATLAB SIMULINK package, № 3, P. 67-79.

-
- Sidorov S. V., Sushkov V. V., Sukhachev I. S.* Modeling of single-phase ground fault in power lines with isolated neutral on a modular laboratory system, № 1, P. 9-18.
- Sirayev F. F., Khazieva R. T.* Design of a variable frequency drive with a proportional-integral-differential controller for a main pumping unit, № 4, P. 59-72.
- Sirayev F. F., Kirillov R. V., Khazieva R. T.* Mathematical and computer modeling converter for a small wind turbine, № 1, P. 75-89.
- Solovev B. A., Gamisonia G. K., Dimukasheva G. Ye., Kolomeets D. A.* Conversion of thermal energy into electricity: potential and efficiency of thermoelectric generators based on Peltier elements, № 1, P. 55-64.
- Sukhachev I. S., Shelomentsev V. A., Khmara G. A., Sidorov S. V., Popov E. I., Shvetsova A. A.* Identification of the condition of 110(35)/10 kV power transformers based on thermographic survey data analysis and artificial intelligence methods, № 2, P. 22-36.
- Vorotnikov M. Yu., Lymarev A. S., Nikolaev A. A.* Development of a mathematical model of an electric vehicle, № 2, P. 37-49.
- Yashin A. N.* Conversion of the wattmetrogram of the electric drive of a sucker-rod pump into a dynamogram, № 3, P. 80-88.
- Yashin A. N.* Study of the influence of the parameters of the balanced counter-load on the output parameters of the electrical complex of the installation of a sucker rods pump unit, № 4, P. 73-83.
- Zaitseva A. A., Belyavtsev M. V., Zaitsev E. A., Kilmakov D. K., Kultaev D. R., Sayfutdinova Z. R.* Synthesis of a helicopter engine control algorithm under conditions of structural and parametric uncertainty, № 2, P. 123-128.
- Zaitseva A. A., Belyavtsev M. V., Zaitsev E. A., Kilmakov D. K., Silin I. P., Gavrilov V. F.* Synthesis of an integrated control system for a helicopter multi-engine power plant according to a complex of intra-engine parameters, № 1, P. 97-105.
- Zakirnichnaya M. M., Palladina Ya. A.* Identifying the main faults of centrifugal pumping units using a colorimetric amplitude indicator based on wavelet pattern modeling, № 3, P. 98-106.
- Zakirnichnaya M. M., Varlamov V. A., Palladina Ya. A.* Assessing the influence of the scaling factor of the basic wavelet transform function on the degree of manifestation of the main faults of centrifugal pumping units in wavelet patterns, № 1, P. 106-120.
- Zharinov Yu. A., Latypov R. R.* Development of a virtual simulator for preflight training of an unmanned aerial vehicle, № 4, P. 100-108.
- Zinnatullin V. F., Koledin S. N.* Method of minimizing residues in the process of gasoline compounding based on the integration of linear programming and neural network, № 1, P. 132-140.
- Zykin P. V., Khamitov R. N., Zherebtsov S. N., Ganicheva L. S.* Synthesis of fuzzy logic roughness control system by MATLAB SIMULINK software package, № 1, P. 65-74.

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.