

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 1, т. 17, 2021

Группы научных специальностей, по которым ведется прием статей в научный журнал
«Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

- 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки),
- 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки),
- 05.09.12 – Силовая электроника (технические науки),
- 05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),
- 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),
- 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям) (технические науки),
- 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки),
- 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)



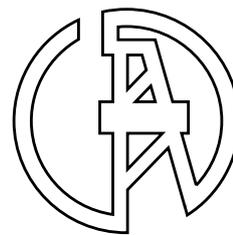
Electrical and data processing facilities and systems

№ 1, т. 17, 2021



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



УГНТУ

№ 1, т. 17, 2021

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

Учредитель

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

Журнал включен 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».

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Главный редактор:
М.И. Хакимьянов — д-р техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)

Члены редакционной коллегии:

К. Лингфей – Ph. D, профессор
«Нанкинский университет авионики и аэронавтики»
(г. Нанкин, Китай)



А. Вахеда – Ph. D, профессор
«Иранский университет науки и технологий»
(г. Тегеран, Иран)



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



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



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



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



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



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



В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, профессор
Костанайского регионального университета имени Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан)



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



Зам. главного редактора:

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

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



Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)



И. Цицмане — д-р техн. наук, профессор
Рижского технического университета, эксперт научного совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия)



Б. Брудник — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Тель-Авивского университета (г. Тель-Авив, Израиль)



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



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



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



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



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



Р.Р. Саттаров — д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Ответственный секретарь: А. Г. Саенко
Технический редактор: С.В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugues.ru
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).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021.

Адрес редакции и издательства: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
Тел.: (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 27.07.2021 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17.21.
Тираж 1 000 экз. Заказ № 64.

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.

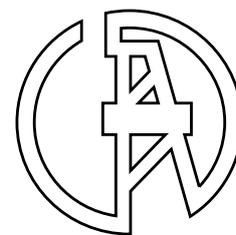
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 1, v. 17, 2021

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» (USPTU)

The journal is included 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».

International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

M.I. Khakimyanov — Dr. Sci. Tech., Associate Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

Members of an editorial board:

X. Lingfei — Ph. D., Professor of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Nanjing, China)

A. Vahedi — Ph. D., Professor of Iran University of Science & Technology (Tehran, Iran)

V.M. Artyushenko — Dr. Sci. Tech., Professor of SBEI HE MR «University of Technology» (Moscow, Russian Federation)

M.A. Urakseev — Dr. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University» (Ufa, Russian Federation)

M.Yu. Dolomatov — Dr. Sci. Chem., Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

N.A. Feoktistov — Dr. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Moscow State University of Design and Technology» (Moscow, Russian Federation)

V.G. Krymsky — Dr. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

F.F. Hizbullin — Dr. Sci. Chem., Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

V.G. Kushnir — Dr. Sci. Tech., Professor of Akhmet Baitursynov Kostanay Regional University (Kostanay, Kazakhstan)

V.A. Shabanov — Cand. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

Deputy editor-in-chief:

R.T. Khazieva — Cand. Sci. Tech. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



S.V. Pavlov — Dr. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University» (Ufa, Russian Federation)



R.R. Safin — D. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Bashkir State University» (Ufa, Russian Federation)



I. Zicmane — Dr. Sci. Tech., Professor of Riga Technical University, Expert of the Latvian Council of Science (Riga, Latvia)



B. Brudnik — Dr. Sci. Tech., Leading Researcher of Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel)



A.S. Glazyrin — Dr. Sci. Tech., Professor of FSAEI HE «National Research Tomsk Polytechnic University» (Tomsk, Russian Federation)



M.A. Grigorev — Dr. Sci. Tech., Professor of FSAEI HE «South Ural State University» (Chelyabinsk, Russian Federation)



V.P. Metelkov — Dr. Sci. Tech., Professor of FSAEI HE «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin» (Yekaterinburg, Russian Federation)



A.A. Nikolaev — Cand. Sci. Tech., Associate Professor of FSBEI HE «Nosov Magnitogorsk State Technical University» (Magnitogorsk, Russian Federation)



A.B. Petrochenkov — Dr. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Perm National Research Polytechnic University» (Perm, Russian Federation)



R.R. Sattarov — Dr. Sci. Tech., Professor of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University» (Ufa, Russian Federation)



Assistant editor: A. G. Saenko

Technical editor: S. V. Khalitova

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC).

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website www.ugues.ru.

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2021.

Address of Editors office and Founder: 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 27.07.2021 Paper format 60×84/8. Offset printing. 17.21 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 64.

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 «Electrical and data processing facilities and systems».

The items of this publication preserve original edition by their authors.

The Editors office do not always share an opinion of authors of the articles published.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Авдеев Б.А., Вынга А.В.</i> Анализ валового потенциала солнечной энергетики Керченского полуострова для интеграции в интеллектуальных сетях электроснабжения	5
<i>Железняк А.А.</i> Подавление низкочастотных помех судовых электроэнергетических систем	13
<i>Сафиуллин Р.А.</i> Математическая модель асинхронного двигателя с полым ротором с прорезями со скосом	19
<i>Семина И.А., Андреева Е.Г.</i> Имитационное моделирование максимальной токовой защиты силового трансформатора в программе MATLAB SIMULINK	27
<i>Шабанов В.А., Сорокин А.В.</i> Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока	33
<i>Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Низамов М.О., Соловьев Б.А.</i> Моделирование автономной солнечной электростанции	44
<i>Юдинцев А.Г.</i> Аппаратно-программные комплексы имитации систем электроснабжения космических аппаратов	55

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Бордюг А.С.</i> Разработка параметрической модели гидравлических потерь судового крана для повышения надежности выполнения грузовых операций	65
<i>Гупаленко Д.Д., Токарева С.А., Захаров Д.Ю.</i> Разработка ключевых показателей эффективности деятельности управлений аварийно-восстановительных работ и капитального ремонта скважин	74
<i>Моисеев И.С., Жиленков А.А., Ениватов В.В., Зинченко А.А.</i> Некоторые проблемы моделирования динамики механических систем и их решение методами вариационных интеграторов группы Ли	81
<i>Комиссаров Д.Р.</i> Проектирование системы искусственного интеллекта для формирования списка вакантных должностей	90
<i>Муравьева Е.А., Габитов Р.Ф., Имаев Р.Ф.</i> Синтез нечеткого контроллера для идентификации количественной оценки возмущений по трендам	97
<i>Нуйкин Д.А., Кулакова Е.С.</i> Эффективность работы моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления	113
<i>Кубрин С.С., Решетняк С.Н.</i> Имитационное моделирование режимов технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты в программе MATLAB	120
<i>Абрамкина К.В., Марковкина Н.Н., Сметюх Н.П.</i> Сравнительный анализ сред разработки MATLAB и COMSOL для реализации управления акустическим полем левитации с помощью ультразвуковых пьезоизлучателей	129
Об авторах	141

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Avdeev B.A., Vyngra A.V.</i> Analysis of the gross potential of solar power of the Kerch peninsula for integration in the smart grids	5
<i>Zheleznyak A.A.</i> Suppression of low-frequency noise of electric systems	13
<i>Safiullin R.A.</i> Mathematical model of an asynchronous motor with a hollow rotor with slots with a bevel	19
<i>Semina I.A., Andreeva E.G.</i> Simulation of overcurrent protection of power transformer in MATLAB SIMULINK software	27
<i>Shabanov V.A., Sorokin A.V.</i> Algorithms for remote determination of the distance to the single-phase fault location using the zero-sequence current as the reference current	33
<i>Khazieva R.T., Kirillov R.V., Nizamov M.O., Soloviev B.A.</i> Modeling an autonomous solar power plant	44
<i>Yudintsev A.G.</i> Hardware and software complexes for simulating spacecraft power supply systems	55

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Bordyug A.S.</i> Development of a parametric model of hydraulic losses of a ship crane to increase the reliability of cargo operations	65
<i>Gupalenko D.D., Tokareva S.A., Zaharov D. Yu.</i> The drafting of key performance indicators of activity of branches of emergency and recovery operations and workover	74
<i>Moiseev I.S., Zhilenkov A.A., Enivatov V.V., Zinchenko A.A.</i> Selected problems of modeling the dynamics of mechanical systems and their solution by the methods of the Lie group variational integrators	81
<i>Komissarov D.R.</i> Designing an artificial intelligence system for forming a list of vacancies	90
<i>Muraveva E.A., Gabitov R.F., Imaev R.F.</i> Synthesis of a fuzzy controller for identification and quantification of disturbances by trends	97
<i>Nuykin D.A., Kulakova E.S.</i> The efficiency of the reliability models of automated control system	113
<i>Kubrin S.S., Reshetnyak S.N.</i> Simulation of complex-mechanized downhole technological equipment of a high-performance coal mine in the MATLAB program	120
<i>Abramkina K.V., Markovkina N.N., Smetyuh N.P.</i> Acoustic levitation field control using ultrasonic piezo transmitters	129
About the Autors	141



Авдеев Б. А.
Avdeev B. A.

*кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования
судов и автоматизации производства,
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация*



Вынгра А. В.
Vyngra A. V.

*ассистент кафедры электрооборудования
судов и автоматизации производства,
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация*

УДК 621.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-5-12

АНАЛИЗ ВАЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Актуальность

Собственное обеспечение электроэнергией Республикой Крым в 2020 году составило около 20 % от общего энергопотребления полуострова. Такое низкое производство электроэнергии остро показывает проблему энергонеузависимости полуострова. К тому же, собственное производство электроэнергии Крыма преимущественно состоит из невозобновляемых источников, что неблагоприятно влияет на экологическое состояние полуострова. Исследование целесообразности внедрения возобновляемых источников электроэнергии позволит определить возможные пути решения обозначенных проблем.

Цели исследования

Исследовать возможность внедрения солнечных электростанций на территории Керченского полуострова. Провести обзор существующих методик решения проблемы качественного и надежного энергоснабжения полуострова, найти и описать основные проблемы внедрения систем возобновляемых источников энергии. На основании ориентировочной продолжительности солнечного сияния Керченского полуострова определить и обработать данные о среднегодовой солнечной активности и инсоляции на исследуемой территории. Рассчитать количественные показатели эффективности применения предложенного способа генерации электроэнергии. Обосновать необходимость и целесообразность применения интеллектуальных сетей энергоснабжения для упрощения внедрения альтернативных источников в общую сеть электроснабжения полуострова.

Методы исследования

Анализ солнечной активности Керченского полуострова на основе данных национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства — ведомства NASA. Синтез данных в виде технического расчета валового потенциала и расчета валовой энергоэффективности для определения рентабельности внедрения возобновляемых систем генерации электричества. Сравнение эффективности различных типов интеллектуальных сетей для определения возможностей внедрения невозобновляемых источников электроэнергии в общую сеть электроснабжения полуострова.

Результаты

Приведены таблицы и построены графики значений солнечной инсоляции на горизонтальной поверхности Керченского полуострова. Проведён расчёт валового потенциала

солнечной энергии региона. Проведен расчет валовой энергоэффективности региона, построен график зависимости среднесуточного значения солнечной инсоляции от времени года, падающей на горизонтальную поверхность площадью 1 м^2 . Были проведены расчеты, которые показали, что годовая инсоляция составит $1303,26 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Результаты инсоляции по месяцам представлены в табличном виде. Показана целесообразность внедрения солнечных электростанций для обеспечения бесперебойного энергоснабжения Керченского полуострова. Показано, какие существуют интеллектуальные сети электроснабжения, применимые для интеграции солнечных электростанций на Керченском полуострове. Показаны преимущества и недостатки интеллектуальных сетей электроснабжения постоянного и переменного тока. Показано, что лучшими характеристиками обладают интеллектуальные сети электроснабжения на основе технологии твердотельных трансформаторов.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, электроснабжение, интеллектуальные сети электроснабжения, Керченский полуостров, твердотельный трансформатор, интеграция, солнечная электростанция, солнечная инсоляция.

ANALYSIS OF THE GROSS POTENTIAL OF SOLAR POWER OF THE KERCH PENINSULA FOR INTEGRATION IN THE SMART GRIDS

Relevance

The Republic of Crimea's own electricity supply in 2020 amounted to about 20 % of the total energy consumption of the peninsula. This low electricity production is an acute indication of the peninsula's energy independence problem. In addition, Crimea's own electricity production mainly consists of non-renewable sources, which adversely affects the ecological state of the peninsula. The study of the feasibility of the introduction of renewable energy sources will identify possible solutions to the identified problems.

Aims of research

Explore the possibility of introducing solar power plants on the territory of the Kerch Peninsula. Review the existing methods for solving the problem of high-quality and reliable power supply of the peninsula, find and describe the main problems of introducing renewable energy systems. Based on the estimated duration of sunshine on the Kerch Peninsula, determine and process data on the average annual solar activity and insolation in the study area. Calculate quantitative indicators of the effectiveness of the proposed method of generating electricity. Justify the need and feasibility of using smart power supply networks to simplify the introduction of alternative sources into the general power supply network of the peninsula.

Research methods

Analysis of solar activity on the Kerch Peninsula based on data from the National Aeronautics and Space Administration — NASA. Synthesis of data in the form of technical calculation of gross potential and calculation of gross energy efficiency to determine the profitability of the introduction of renewable electricity generation systems. Comparison of the efficiency of various types of smart grids to determine the possibilities of introducing non-renewable sources of electricity into the general power supply network of the peninsula.

Results

Tables and graphs of solar insolation values on the horizontal surface of the Kerch Peninsula are presented. The calculation of the gross solar energy potential of the region has been made. The calculation of the gross energy efficiency of the region was made, a graph of the dependence of the average daily value of solar insolation on the season, falling on a horizontal surface with an area of 1 м^2 , was built. Calculations were made, which showed that the annual insolation will be $1303.26 \text{ kWh}/\text{м}^2$. Insolation results by months are presented in a tabular form. The expediency of the introduction of solar power plants to ensure uninterrupted power supply to the Kerch Peninsula is shown. It is shown what smart grids exist that are applicable for the integration of solar power plants on the Kerch Peninsula. The advantages and disadvantages of smart AC and DC grids are shown. It is shown that the best characteristics are possessed by smart grids based on solid-state transformer technology.

Keywords: alternative energy, power supply, smart grids, Kerch Peninsula, solid-state transformer, integration, solar power plant, solar insolation.

Введение

Собственное производство электроэнергии в 2020 году на территории Республики Крым составило всего 21 % от общего потребления. Остальные 79 % поставляются по энергомоству из Ростовской АЭС. Также собственное производство электроэнергии на более чем 80 % состоит из невозобновляемых источников (тепловые электростанции, газотурбинные электростанции, дизель-генераторные установки), что негативно влияет на экологическое состояние полуострова.

Керченский полуостров расположен в восточной части Крыма протяженностью с запада на восток около 90 км, с севера на юг от 17 до 50 км. Площадь территории составляет около 3000 км² [1].

В настоящее время на территории Крыма функционируют несколько солнечных электростанций (СЭС) (СЭС Перово, СЭС Николаевка, СЭС Охотниково), обеспечивающие всего 4–6 % потребляемой электроэнергии полуострова. Владиславовская СЭС является самой большой на территории Крыма и находится в непосредственной близости от Керченского полуострова, однако в эксплуатацию не введена из-за необходимости строительства подстанции 220 кВ и выдачи новых технических условий с учетом энергомоства для интеграции в энергосистему Крыма [2].

Таким образом существует проблема интеграции возобновляемых источников энергии в общую энергосистему для функционирования умных сетей, а также улучшения

экологического состояния полуострова за счет применения СЭС.

На Керченском полуострове применение солнечной энергии в целях энерго- и теплообеспечения является целесообразным в связи с его географическим положением. Благодаря мощным антициклонам во время зимнего периода на территории Керченского полуострова зачастую преобладает малооблачная и солнечная погода [3]

Ориентировочная продолжительность солнечного сияния составляет 2350 ч/год (на рисунке 1 показана продолжительность солнечной активности Республики Крым). Число солнечных часов при открытом горизонте в июне составляет 12–13 ч, в декабре — 7–8 ч. Так как суточная продолжительность солнечной активности в основном зависит от облачности, действительная продолжительность солнечной активности в летний период составляет 40–70 %, а в зимний период — 60–80 % от возможной величины.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что фактическая продолжительность суточного солнечного сияния зимой примерно равна 5 ч, а летом — 8,5 ч.

Облучение прямым солнечным светом поверхности земли называется инсоляцией. Показатели инсоляции зависят от географической широты, которая делится на 3 зоны [4]:

- северная (севернее 58° с.ш.);
- центральная (58° с.ш. — 48° с.ш.);
- южная (южнее 48° с.ш.).

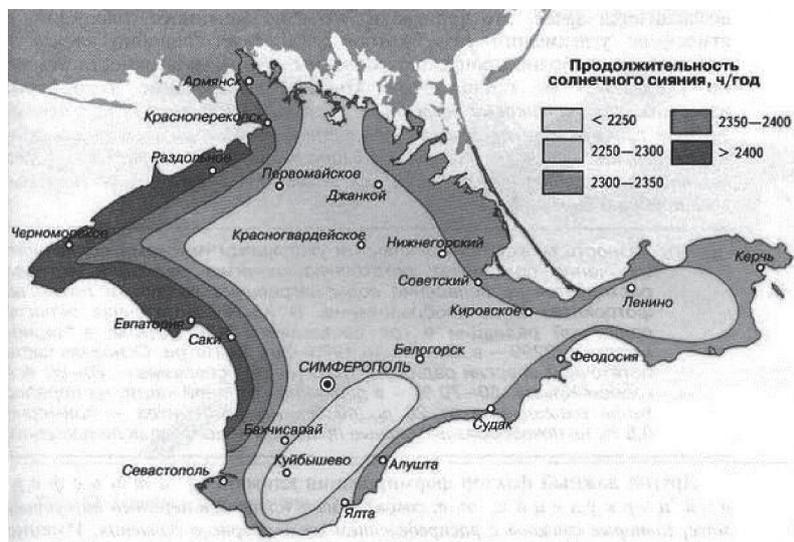


Рисунок 1. Продолжительность солнечной активности Республики Крым
Figure 1. Duration of solar activity in the Republic of Crimea



Рисунок 2. Средние значения прямой инсоляции Крымского полуострова

Figure 2. Average values of direct insolation of the Crimean peninsula

Средняя дневная/годовая сумма солнечной инсоляции Республики Крым приведена на рисунке 2.

Керченский полуостров относится к южной инсоляционной зоне и расположен на широте 45°. В таблице 1 приведены среднесуточные значения солнечной инсоляции Керченского полуострова.

Значения солнечной инсоляции имеют значительные различия в разное время года. Как видно из таблицы 1, уровень солнечной радиации на горизонтальных площадках Керченского полуострова в разные периоды отличается примерно в пять раз [5].

На уменьшение уровня солнечной инсоляции в зимний период влияют следующие факторы:

- большая облачность в сравнении с летним периодом;
- низкий угол подъема солнца над горизонтом.

Однако при использовании трекерной (следающей) системы последним фактором можно пренебречь (рисунок 3). Данная система позволяет увеличить производительность СЭС на 25 % (при использовании одноосной коррекции ориентации) и на 45 % (при двухосной) [6].

Таблица 1. Значения солнечной инсоляции на горизонтальной поверхности Керченского полуострова

Table 1. Values of solar insolation on the horizontal surface of the Kerch Peninsula

Месяц	Солнечная инсоляция, кВтч/м ² /сут
Январь	1,27
Февраль	2,06
Март	3,05
Апрель	4,30
Май	5,44
Июнь	5,84
Июль	6,20
Август	5,34
Сентябрь	4,07
Октябрь	2,67
Ноябрь	1,55
Декабрь	1,07
Среднее значение за год	3,58

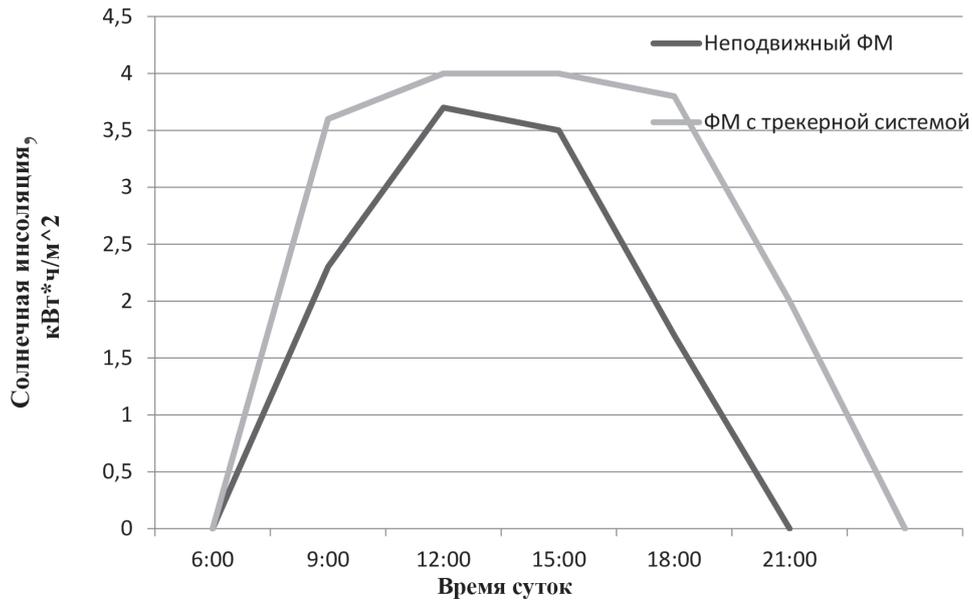


Рисунок 3. Рост мощности СЭС при использовании трекерной системы
Figure 3. Growth of SPP power when using a tracker system

Валовый (теоретический) потенциал солнечной энергии региона — сумма энергии солнечного излучения, попадающего на площади региона, взятая за один год (кВтч/м²). Значение валового потенциала определяется из таблицы солнечной инсоляции региона [7].

Используя базу данных Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства — ведомства NASA — был проведен анализ солнечной активности Керченского полуострова [8–10].

На основании полученных данных, приведенных в таблице 1 и на рисунке 4, был построен график зависимости среднесуточ-

ного значения солнечной инсоляции от времени года, падающей на горизонтальную поверхность площадью 1 м² (рисунок 4).

Используя вышеприведенные данные, проведем расчет значения годовой инсоляции:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \cdot p_i,$$

где E_i — среднее значение инсоляции i -го месяца, кВтч/м²; n — количество месяцев; p_i — количество дней i -го месяца.

Были проведены расчеты, которые показали, что годовая инсоляция составит 1303,26 кВт·ч/м². Результаты инсоляции по месяцам представлены в таблице 2.

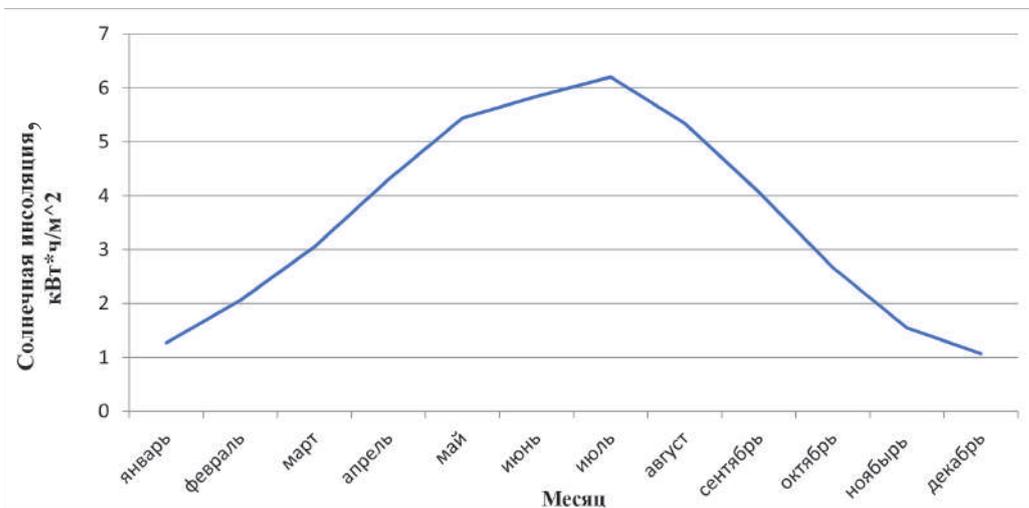


Рисунок 4. График зависимости среднесуточных значений солнечной инсоляции от времени года
Figure 4. Graph of the dependence of the average daily values of solar insolation from the season

Таблица 2. Результаты расчетов среднемесячных значений инсоляции**Table 2.** Calculation results of monthly average values of insolation

Месяц	Солнечная инсоляция, кВтч/м ²
Январь	39,37
Февраль	57,68
Март	94,55
Апрель	129,00
Май	168,64
Июнь	175,20
Июль	192,2
Август	160,20
Сентябрь	126,17
Октябрь	80,10
Ноябрь	48,05
Декабрь	32,10

Годовой валовой потенциал солнечной энергии Керченского полуострова можно вычислить по следующей формуле:

$$W_{\text{вц}} = E \cdot S_p,$$

где S_p — площадь Керченского полуострова, м²,

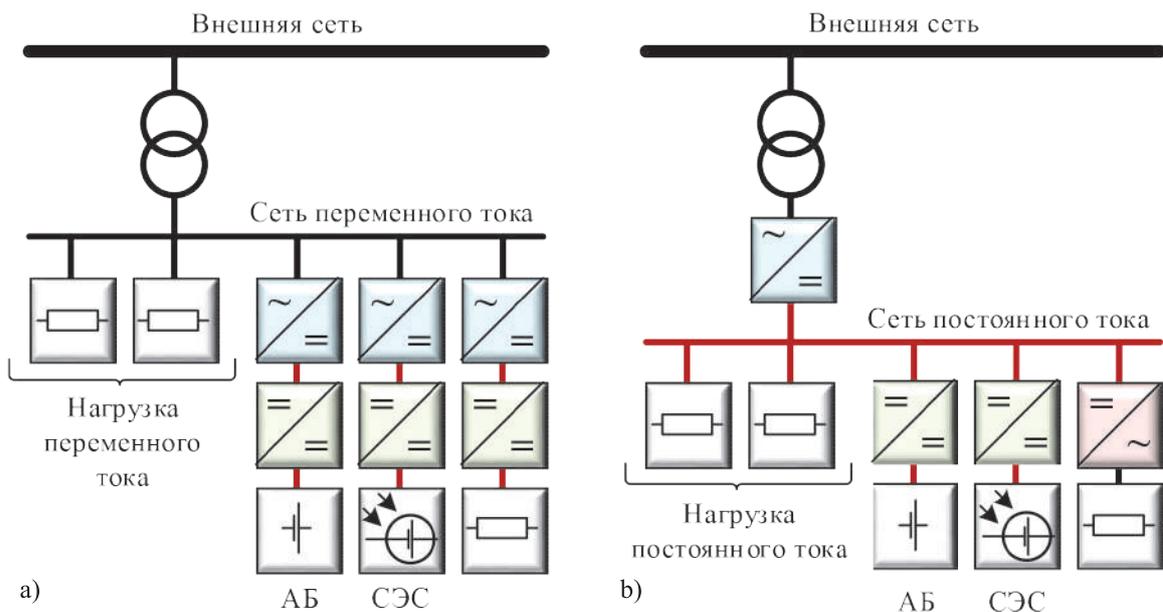
$$S_p = 3000 \cdot 10^3 \text{ м}^2,$$

$$W_{\text{вц}} = 1303,26 \cdot 3000 \cdot 10^3 = 3,91 \text{ ГВтч}.$$

Для внедрения солнечных электростанций в общую энергосистему полуострова целесообразно применять интеллектуальные сети с применением твердотельных трансформато-

ров (ТТТ). Такие системы позволят эффективно, бесперебойно и качественно потреблять произведенную возобновляемыми источниками электроэнергию.

Интеллектуальную сеть можно разделить на два вида: сеть постоянного тока и сеть переменного тока [11]. В сети переменного тока нагрузка переменного тока напрямую подключена к энергосистеме, а нагрузка постоянного тока подключена через выпрямитель и преобразователь постоянной мощности, как показано на рисунке 5, а. В сети постоянного тока, показанной на рисунке 5, б, питание от аккумуляторной батареи и от солнечных панелей производится через преобразователь постоянного напряжения, минуя инвертор, тем самым упрощается процесс согласованной работы устройств с разными уровнями напряжения. Таким образом, сеть постоянного тока является более выгодной по сравнению с сетью переменного тока, поскольку она требует меньше ступеней преобразования и дает высокую эффективность. Несмотря на это, в большинстве случаев делается выбор в пользу сети переменного тока, т.к. нагрузка заточена под работу на переменном токе, а большая часть поступающей в сеть электроэнергии приходит через высоковольтные линии электропередачи переменного тока. Большое количество



АБ — аккумуляторные батареи; СЭС — солнечная электростанция
Рисунок 5. Интеллектуальные сети переменного (а) и постоянного (б) тока

RB — rechargeable batteries; SPP — solar power plant
Figure 5. Smart grid of alternating (a) and direct (b) current

ступеней преобразования усложняет работу системы и приводит к проблеме плохого качества электроэнергии [12].

Интеллектуальные сети на основе ТТТ показаны на рисунке 6. ТТТ может работать согласованно с сетями как переменного, так и постоянного тока. Обмен мощности

может быть легко осуществлен между различными источниками электроэнергии. Такие сети имеют более компактные размеры, чем сети переменного тока, имеют меньше ступеней преобразования и при этом могут питать мощные потребители переменного тока.

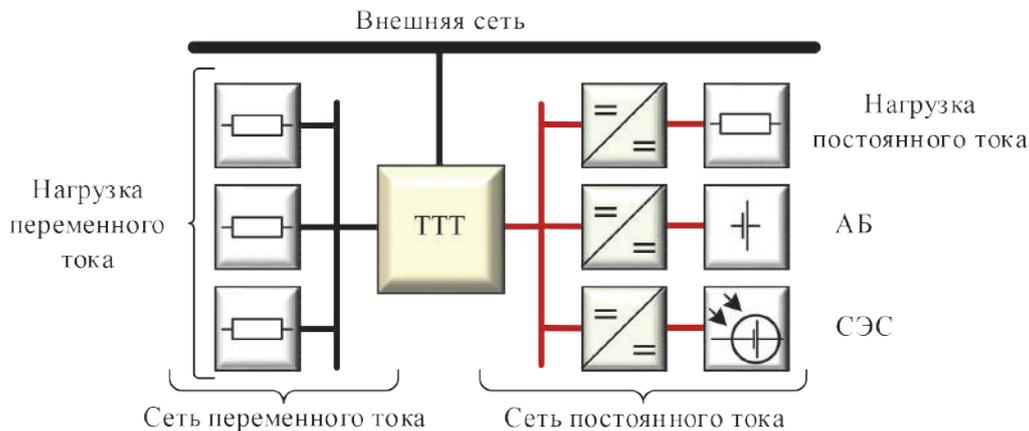


Рисунок 6. Интеллектуальные сети на основе ТТТ

Figure 6. Smart grids based on SST

Современные технологии на базе полупроводниковых силовых устройств позволяют скоординированно управлять несколькими энергетическими сетями (электрическими, холодными, тепловыми и газовыми), что позволяет разработать оптимизированную общую стратегию работы всей системы в целом и достичь повышения энергоэффективности и пиковой нагрузки за счет поддержки многоэнергетической сети. Так как сети электроснабжения должны иметь независимую энергетическую систему, способную в экстремальных условиях продолжать работу, то обеспечение работоспособности и надежности работы многоэнергетической сети является важным аспектом в обеспечении безопасности страны. Поэтому технология, позволяющая повысить надёжность снабжения и распределения электроэнергии

разным потребителям (по роду тока, величине напряжения или мощности), является важной в освоении на промышленном уровне.

Вывод

Керченский полуостров — большой потенциал для использования солнечной энергетики. По результатам расчетов валовой потенциал составляет 3,91 ГВт·ч. Использование солнечной энергетики позволит значительно снизить количество используемого топлива, тем самым улучшив экологическое состояние полуострова, а также снизить затраты на покупку электроэнергии энергоснабжающей организации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-5450.2021.4.

Список литературы

1. Сведения о наличии и распределении земель в Российской Федерации на 01.01.2019 (в разрезе субъектов Российской Федерации) // Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии [Электронный ресурс]. <https://rosreestr.gov.ru>. (дата обращения 09.04.2021).

2. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. М.: КноРус, 2012. 240 с.

3. Мазинов А.С., Бекиров Э.А. Фотоэлектрические преобразователи и системы // Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма. Симферополь: ДОЛЯ, 2009. С. 120–137.

4. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 459 с.
5. Shah D., Crow M.L. Online Volt-Var Control for Distribution Systems with Solid-State Transformers // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016. No. 31(1). P. 342–350.
6. Zhu Q., Wang L., Huang A.Q., Booth K., Zhang L. 7.2 kV Single Stage Solid State Transformer Based on Current Fed Series Resonant Converter and 15 kV SiC MOSFETs // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. No. 34(2). P. 1099–1112.
7. Miller D. *Selling Solar. The Diffusion of Renewable Energy in Emerging Markets*. London: Sterling, VA, 2009. 306 p.
8. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource [Электронный ресурс] // NASA — POWER. Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov> (дата обращения 09.04.2021).
9. Авдеев Б.А. Перспективы использования твердотельных трансформаторов для интеллектуальных сетей электроснабжения двойного назначения // Технологии энергообеспечения. Аппараты и машины жизнеобеспечения: сб. ст. II Всеросс. науч.-техн. конф., 17 сентября 2020, Анапа. 2020. С. 340–348.
10. Авдеев Б.А. Расчет потерь двунаправленного преобразователя постоянного напряжения судовой электростанции постоянного тока // Энергобезопасность и энергосбережение. 2018. № 6. С. 24–26. DOI 10.18635/2071-2219-2018-6-24-26.
3. Mazinov A.S., Bekirov E.A. Fotoelektricheskie preobrazovateli i sistemy [Photo-voltaic Converters and Systems]. *Solnechnaya energetika dlya ustoichivogo razvitiya Kryma* [Solar Energy for Sustainable Development of Crimea]. Simferopol, DOLYa Publ., 2009, pp. 120–137. [in Russian].
4. Udalov S.N. *Vozobnovlyaemye istochniki energii* [Renewable Energy Sources]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2013. 459 p. [in Russian].
5. Shah D., Crow M.L. Online Volt-Var Control for Distribution Systems with Solid-State Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, No. 31(1), pp. 342–350.
6. Zhu Q., Wang L., Huang A.Q., Booth K., Zhang L. 7.2 kV Single Stage Solid State Transformer Based on Current Fed Series Resonant Converter and 15 kV SiC MOSFETs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, No. 34(2), pp. 1099–1112.
7. Miller D. *Selling Solar. The Diffusion of Renewable Energy in Emerging Markets*. London, Sterling Publ., VA, 2009. 306 p.
8. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource [Electronic Resource]. *NASA — POWER*. URL: <https://power.larc.nasa.gov> (accessed 09.04.2021).
9. Avdeev B.A. *Perspektivy ispol'zovaniya tverdotel'nykh transformatorov dlya intellektual'nykh setei elektrosnabzheniya dvoynogo naznacheniya* [Prospects for the Use of Solid-State Transformers for Dual-Use Intelligent Power Supply Networks]. *Sbornik statei II Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Tekhnologii energoobespecheniya. Apparaty i mashiny zhizneobespecheniya», 17 sentyabrya 2020* [Collection of Articles of the II All-Russian Scientific and Technical Conference «Technologies of Energy Supply. Life Support Devices and Machines», September 17, 2020]. Anapa, 2020, pp. 340–348. [in Russian].
10. Avdeev B.A. *Raschet poter' dvunapravlennoogo preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya sudovoi elektrostantsii postoyannogo toka* [Calculation of Losses of a Bidirectional DC Converter of a Ship's DC Power Plant]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie — Energy Security and Energy Saving*, 2018, No. 6, pp. 24–26. DOI 10.18635/2071-2219-2018-6-24-26. [in Russian].

References

1. *Svedeniya o nalichii i raspredelenii zemel' v Rossiiskoi Federatsii na 01.01.2019 (v razreze sub"ektov Rossiiskoi Federatsii)* [Information on the Availability and Distribution of Land in the Russian Federation as of 01.01.2019 (in the Context of the Constituent Entities of the Russian Federation)]. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi registratsii, kadastra i kartografii [Electronic Resource]. <https://rosreestr.gov.ru>. (accessed 09.04.2021). [in Russian].
2. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. *Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii* [Non-Traditional and Renewable Energy Sources]. Moscow, KnoRus Publ., 2012. 240 p. [in Russian].



Железняк А. А.
Zhelezniak A. A.

*кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования судов
и автоматизации производства,
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской
технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация*

УДК 681.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-13-18

ПОДАВЛЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Актуальность

Наиболее чувствительными к колебаниям частоты электрической сети переменного тока являются управляемые выпрямители, в связи с тем, что их принципиальные схемы управления напрямую объединены с питающими сетями. Так как в различных судовых электростанциях применяются статические преобразователи электроэнергии, то в этом случае колебания частоты электрической сети воздействуют на свойства преобразователей. На сегодня задачи анализа влияния колебаний частоты на качество выпрямленного напряжения изучены недостаточно, а проблемы компенсации такого влияния вообще не решены. Поэтому задачей исследования является изучение влияния колебаний частоты электроэнергии судовых электроэнергетических систем с газовыми двигателями на качественные показатели статических преобразователей.

Цель исследования

Исследование влияния колебаний частоты судовых автономных электроэнергетических систем (судовых с газовыми двигателями) на характеристики качества напряжения управляемых выпрямителей. Также рассматривается вопрос создания аппаратно-программных систем с целью уменьшения воздействия колебаний частоты электрической сети на выпрямляемое напряжение. Объектом исследования является судовая автономная электроэнергетическая система с газовыми приводными двигателями мощностью до 2000 кВт.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи применялись основные принципы теории марковских процессов, методы теории случайных процессов. Для исследования воздействий колебаний частоты электрической сети применялся метод функции комплексной переменной. Для исследования воздействий колебаний частоты на выпрямляемое напряжение замкнутых вентильных систем применялись методы ЛАЧХ и ЛФЧХ в сочетании с теорией случайных процессов. При проверке теоретических исследований применялось моделирование процессов в Matlab-Simulink.

Результаты

Анализ проведенных исследований подтверждает, что специализированные системы импульсно-фазового управления позволяют обеспечить сокращение воздействия колебаний частоты до требуемых значений, но приводят к определенному усложнению систем управления выпрямителями.

Ключевые слова: низкочастотные помехи, выпрямленное напряжение, судовая электроэнергетическая система, газовые двигатели, преобразователь, управляемый выпрямитель.

SUPPRESSION OF LOW-FREQUENCY NOISE OF ELECTRIC SYSTEMS

Relevance

The most sensitive to fluctuations in the frequency of the AC power grid are controlled straighteners due to the fact that their control circuits are directly integrated with the supply networks. Since static electric power converters are used in various marine power plants, in this

case, fluctuations in the frequency of the electric network affect the properties of the electric power of such converters. To date, the problems of analyzing the influence of frequency fluctuations on the quality of rectified voltage have not been sufficiently studied, and the problems of compensating for this influence have not been solved at all. Therefore, the task of the study is the influence of fluctuations in the frequency of electric power of marine electric power systems with gas engines on the quality indicators of static converters.

Aims of research

Study the influence of frequency fluctuations of ship autonomous electric power systems (ships with gas engines) on the characteristics of the voltage quality of controlled rectifiers. The issue of creating hardware and software systems in order to reduce the impact of frequency fluctuations of the electrical network on the rectified voltage is also considered. The object of the study is a ship's autonomous electric power system with gas-driven engines with a capacity of up to 2000 kW.

Research methods

To solve this problem, the basic principles of the theory of Markov processes and the methods of the theory of random processes were used. To study the effects of frequency fluctuations in the electrical network, the method of the function of a complex variable was used. To study the effects of frequency fluctuations on the rectified voltage of closed valve systems, the methods of LACHC and LPHC were used in combination with the theory of random processes. When testing theoretical studies, we used process modeling in Matlab-Simulink.

Results

The analysis of the conducted studies confirms that specialized pulse-phase control systems allow reducing the impact of frequency fluctuations to the required values, but lead to a certain complication of the rectifier control systems.

Keywords: low-frequency interference, rectified voltage, marine electric power system, gas engines, converter, controlled rectifier.

Введение

Проблемы экономии энергетических ресурсов как для России, так и для других государств становятся все более актуальными в связи с постоянным ростом цен на нефтепродукты. Исходя из этого трудности использования газового топлива становятся все более актуальными. Широко используют газовое топливо в технике, но при этом возрастают требования к его качеству. Большим спросом стали пользоваться газовые двигатели с мощностью от нескольких десятков до тысяч киловатт, работающие на природном газовом топливе. Автономные судовые электростанции с их использованием находят все более широкое использование, в том числе на местах газовой и нефтедобычи, а также как аварийные, для питания ответственных объектов. Распространяется использование газовых электростанций в когенерационных установках.

Результаты исследований

Рассмотрим первый закон управления преобразователем. Реальный угол регулирования α можно изменять путем умножения его на коэффициент $\frac{\omega_0}{\omega}$. Данный способ

позволяет создать систему управления, исключая грубые требования к частоте сети питания. Однако существуют трудности, связанные с ресурсоемкими вычислениями, которые следует осуществлять в порядке реального времени. Стремление осуществить такой метод в режиме микроконтроллерной системы управления приведет или к усилению условий быстрогодействия основного процессора этой системы или к катастрофическому уменьшению быстрогодействия системы, а также к неспособности ее функционирования в порядке реального времени при стремлении приобрести в наименьшей степени допустимую точность проделанных ресурсоемких вычислений [1]. Одной из существующих альтернатив решения этой проблемы считается использование компьютеризированных систем управления.

В аналогичных системах контроллер осуществляет только получение данных и передачу их согласно каналам взаимосвязи с ПК, который проводит расчеты, а также возвращает контроллеру результаты расчетов. Но этот метод имеет определенные

минусы: увеличение стоимости системы из-за использования компьютера, цена которого совместно с ценой программного обеспечения может быть недопустимо завышена; трудности, вытекающие в следствие передачи сведений по каналу связи с контроллером для сбора данных на управляющий ПК.

В случае если увеличение расценочных характеристик системы напрямую проявляется из стремления увеличить качество ее работы, в таком случае трудности, связанные с каналом передачи данных способны перейти в трудности стабильности системы управления [2]. Угроза выхода системы за границы стабильности крайне высока.

Другой способ решения проблемы: использование системы управления на базе БИС. Эта система даст возможность осуществлять ресурсоемкие расчеты в порядке реального времени. К тому же стоимость этой системы значительно меньше стоимости системы на базе компьютера. Помимо этого, в системе отсутствует проблема с временными задержками в канале передачи данных, вследствие этого отсутствуют проблемы с неустойчивостью системы согласно фак-

тору параметрического непостоянства компонентов.

Анализ второго закона управления преобразователем осуществим на примере структуры, реализующей второй закон управления [3, 4]. Пример генератора пилообразного напряжения (ГПН) с контуром подстройки представлен на рисунке 1, а. Приведенной принципиальной схеме соответствует структурная схема, соответствующая рисунку 1, б. ГПН выполнен на элементах DA1, R_r, C_r и описывается придаточной функцией $\omega_{ГПН}$, $\omega_{ГПН}$ представляет периодическое изменение пилообразного напряжения:

$$W_{ГПН} = \frac{T_m p + 1 - \exp(-T_m p)}{T_{II} T_m p^2 (1 + \exp(-T_m p))}, \quad (1)$$

где T_{II} — константа времени ГПН. Применяя разложение экспоненты, формулу (1) преобразуем к виду:

$$W_{ГПН}(P) = \frac{1}{2T_m p (1 + \frac{T_{II}}{2} p)}. \quad (2)$$

Амплитудный детектор, выполненный на DA2, R_ф, C_ф, VD-1, R_p описывается передаточной функцией $W_{\phi}(P) = \frac{1}{T_{\phi} p + 1}$.

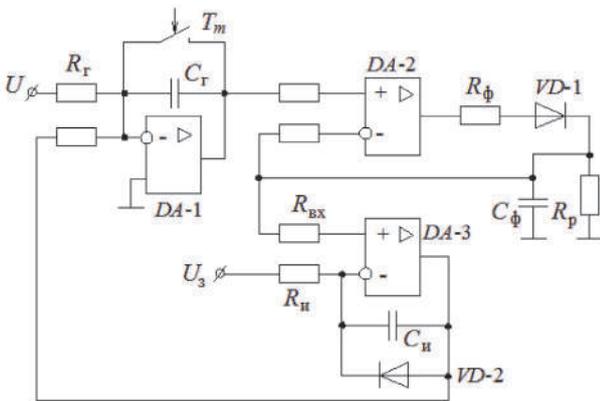


Рисунок 1, а. Генератор пилообразного напряжения
Figure 1, a. Sawtooth voltage generator

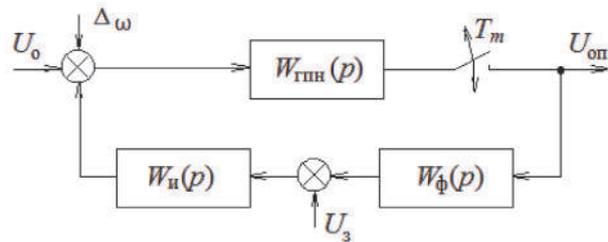


Рисунок 1, б. Контур подстройки
Figure 1, b. Adjustment contour

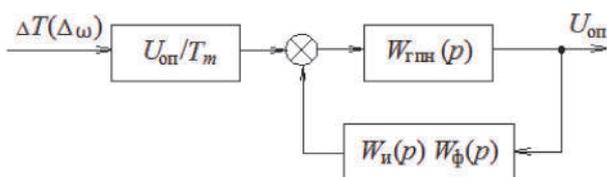


Рисунок 1, с. Контур подстройки
Figure 1, c. Adjustment contour

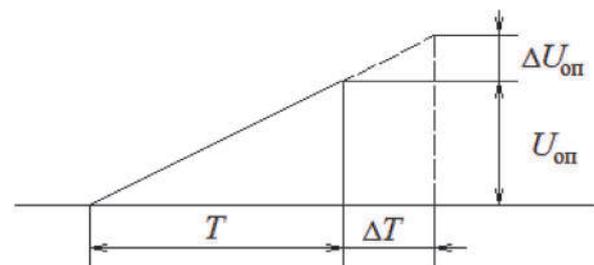


Рисунок 1, d. Разности ПИ-регулятора
Figure 1, d. Differences of the PI controller

Разности ПИ-регулятор амплитуды (ДАЗ, $R_{вх}, C_{и}, R_{и}, VD-2$) описывается пропорционально-интегральным звеном (рисунок 2), где C — обратное сопротивление диода $VD-2$; $T_{иГ} = R_{и} C_{и}$.

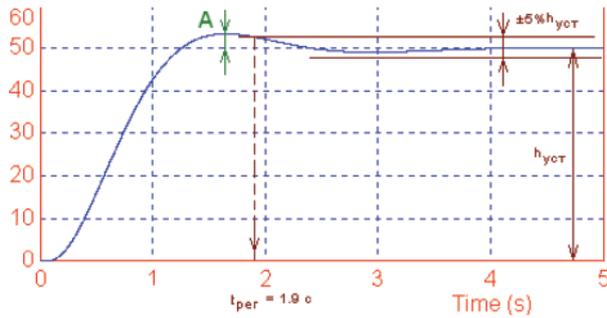


Рисунок 2. Переходная функция с ПИ (пропорционально-интегральным) регулятором

Figure 2. Transition function with PI (proportional-integral) regulator

Из рисунка 1, d следует:

$$\Delta U_{оп} = \frac{U_{оп}}{T} \Delta T. \quad (2)$$

Для анализа прохождения помехи на выход замкнутой системы контура автоподстройки амплитуды пилообразного напряжения, преобразуем структуру, изображенную на рисунке 1, b , к типу, подобающему на рисунке 1, c , в которой входным воздействием является помеха L . Передаточная функция замкнутой системы будет равна:

$$\Phi(p) = \frac{(T_{\phi}p + 1)T_{иГ}p}{2T_{м}p(1 + T_{иГ}p/2)(T_{\phi}p + 1)T_{иГ}p + K_{р}T_{иГ}p + 1}. \quad (3)$$

Реальные постоянные времени соответственно равны: $T_{иГ} = 0,0047$ с; $T_{и} = 0,012$ с; $T_{\phi} = 0,011$ с; $T_{р} = 40$.

Колебания частоты сетевых напряжений обладают низкочастотной характеристикой, по этой причине звенья с небольшими константами времени никак не станут воздействовать на протекание помехи посредством системы автоподстройки амплитуды пилообразного напряжения [4, 5]. Рационально по этой причине можно отметить только лишь низкочастотные звенья передаточной функции, упростив этим передаточную функцию (3) и представив в виде:

$$\Phi(p) = \frac{T_{\phi}T_{иГ}P^2T_{иГ}P}{T_{\phi}T_{м}P^2/2 + (T_{\phi} + T_{м}/2 + K_{р}T_{иГ})P + 2}. \quad (4)$$

Представив (4) в виде

$$\Phi(p) = \frac{g_2P^2 + g_1P + g_0}{b_2P^2 + b_1P + b_0},$$

где $g_2 = T_{\phi}T_{иГ}$;

$$g_1 = T_{иГ};$$

$$g_0 = 0;$$

$$b_2 = T_{\phi}T_{м}/2;$$

$$b_1 = (T_{\phi} + T_{м}/2 + K_{р}T_{иГ})/2;$$

$$b = 2$$

и вводя следующие обозначения:

$$\frac{g_0}{b_0} = \omega_{B1} = 0;$$

$$g_1$$

$$\frac{g_1}{b_1} = \omega_{B2} = 90,9^{-1} \text{ с};$$

$$g_2$$

$$\frac{b_0}{b_1} = \omega_{a1} = 9,3^{-1} \text{ с};$$

$$\frac{b_1}{b_2} = \omega_{a2} = 45^{-1} \text{ с}.$$

Необходимо определить коэффициент сглаживания случайной помехи L :

$$K_c = \sqrt{\frac{(T_{\phi} + T_{м}/2 + K_{р}T_{иГ})[a_{\omega}(T_{\phi} + K_{р}T_{иГ}) + 2]}{4T_{\phi}^2a_{\omega}}}.$$

Пробный контроль системы автоподстройки амплитуды пилообразного напряжения, показанной на рисунке 1, a , продемонстрировал то, что коэффициент сглаживания ею дисперсной помехи L доходит до 30 ед. (рисунок 3), а система, которая изображена на рисунке 4, имеющая астатизм второго порядка, достигает значения в 100–120 ед.

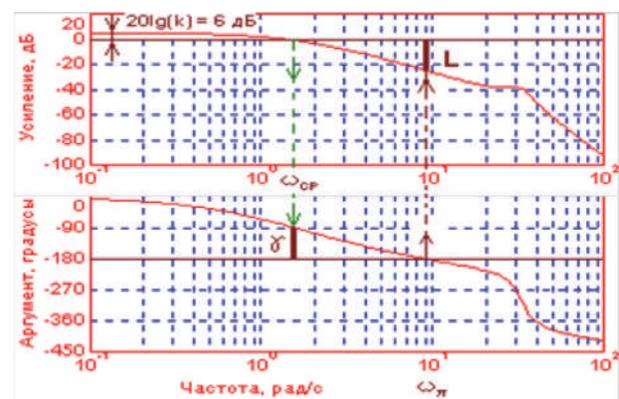


Рисунок 3. Корректные показатели константы времени ПИ-регулятора

Figure 3. Correct indicators of the time constant of the PI controller

Результирующая дисперсия процесса рассчитывается согласно формуле:

$$R_{\text{эф}}(0) = \frac{R_{\text{о}}(0)a_{\text{о}}T_{\text{аб}}^2T_{\lambda}^2[T_{\lambda}^2 + 4\xi T_{\text{аб}}^2(a_{\text{о}}T_{\lambda} + \xi) - T_{\text{аб}}^2]}{4\xi[T_{\text{аб}}^4(1 + 4a_{\text{о}}\xi T_{\lambda} + 4a_{\text{о}}^2T_{\lambda}^2) + 2T_{\lambda}^2T_{\text{аб}}^2(4a_{\text{о}}\xi T_{\lambda} + 4\xi^2 - 1) + T_{\lambda}^4]},$$

где $T_{\text{аб}}^2 = 1(\alpha_{\text{о}}^2 + \beta_{\text{о}}^2)$.

Так же, как и в предшествующих вариантах, видимый эффект сглаживания возмуще-

ния L прослеживается только при высоких константах времени фильтра [6, 7]. Но в крайнем случае при соразмерности констант T_a и T_{λ} эффект сглаживания значительно больше, чем в предшествующих.

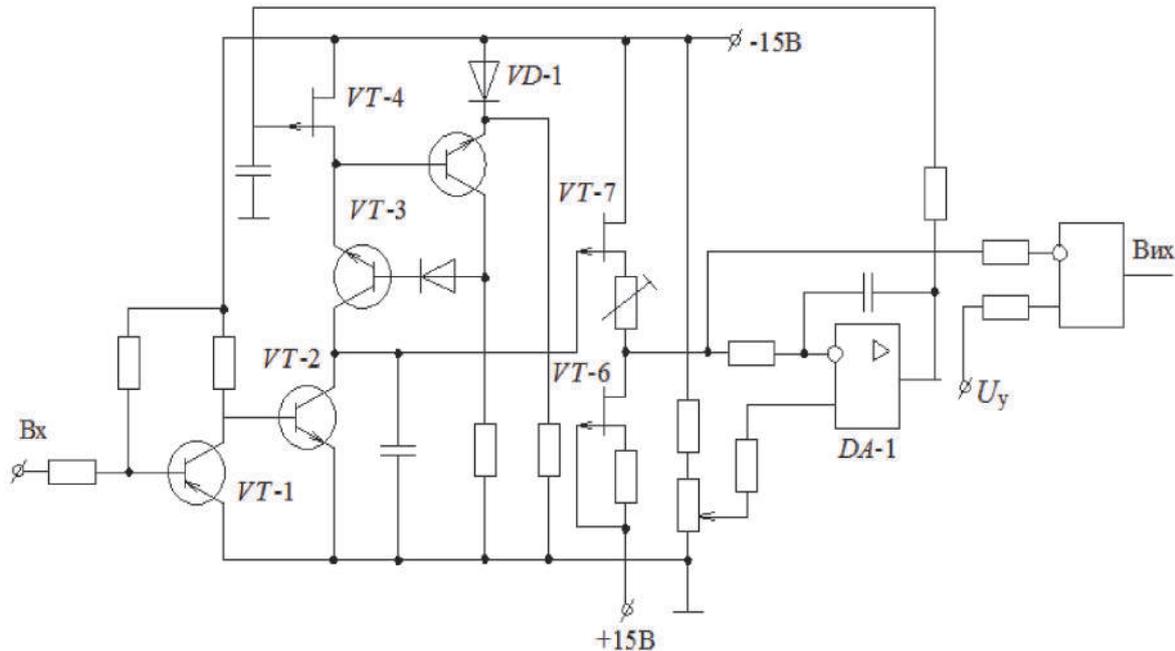


Рисунок 4. Система, имеющая астатизм второго порядка

Figure 4. A system with second-order astatism

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что общий вид корреляционных функций на выходе сетевых фильтров синхронизации почти не изменяется по отношению к его входу [8, 9]. Но эффект сглаживания помехи по установленному методу расчета фильтров незначительный.

Список литературы

1. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 831 с.
2. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического управления: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2006. 368 с.
3. Железняк А.А., Доровской В.А., Черный С.Г., Бордюг А.С. Анализ методов подавления низкочастотных помех выпрямленного напряжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 6. С. 45–48.
4. Бордюг А.С., Доровской В.А., Черный С.Г. Компараторная идентификация частотных характеристик систем автоматического управления судовой энергетической

Вывод

Анализ приведенных исследований подтверждает, что специализированные системы импульсно-фазового управления позволяют обеспечить сокращение воздействия колебаний частоты до требуемых значений, но приводят к определенному усложнению систем управления выпрямителями.

- установки // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 1 (45). С. 47–57.
5. Segaran D.S. Dynamic Modelling and Control of Dual Active Bridge Bi-directional DC-DC Converters for Smart Grid Applications: Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. 2013. 274 p.
 6. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation Performance of Marine Equipment with Specialized Information Technology // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 1247–1252.
 7. Zhukov V., Masyutkin E., Avdeyev B. The Application of Mathematical Modeling for the Development of Devices as an Example of

Viscous Fluid Purification from Magnetic Impurity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. 177. P. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012015.

8. Avdeyev B., Vyngra A., Bordiug A. Testing the Efficiency of Abrasive Treatment of Reconditioned Parts Using Coolant Cleaning in a Magnetic Sump // MATEC Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019. 2019. Vol. 298. P. 00115. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800115> (дата обращения: 05.03.2020).

9. Lyutov A., Kryukov A., Cherny S. e.a. Modelling of a Francis Turbine Runner Fatigue Failure Process Caused by Fluid-Structure Interaction // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 49. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/49/7/072012>.

References

1. Dorf R., Bishop R. *Sovremennyye sistemy upravleniya* [Modern Control Systems]. Moscow, Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2002. 831p. [in Russian].

2. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobie* [Theory of Automatic Control: Textbook]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU. 2006. 368 p. [in Russian].

3. Zheleznyak A.A., Dorovskoi V.A., Chernyi S.G., Bordyug A.S. Analiz metodov podavleniya nizkochastotnykh pomekh vypryamlenogo naprya-zheniya [Analysis of Methods for Suppressing Low-Frequency Rectified Voltage Signals]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie — Energy Security and Energy Saving*, 2019, No. 6, pp. 45–48. [in Russian].

4. Bordyug A.S., Dorovskoi V.A., Chernyi S.G. Komparatornaya identifikatsiya chastotnykh kharakteristik sistem avtomaticheskogo upravleniya sudovoi energeticheskoi

ustanovki [Comparator Identification of Frequency Characteristics of Automatic Control Systems of a Ship Power Plant]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy — Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2020, No. 1 (45), pp. 47–57. [in Russian].

5. Segaran D.S. *Dynamic Modelling and Control of Dual Active Bridge Bi-directional DC-DC Converters for Smart Grid Applications: Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy*. 2013. 274 p.

6. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation Performance of Marine Equipment with Specialized Information Technology. *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 100, pp. 1247–1252.

7. Zhukov V., Masyutkin E., Avdeyev B. The Application of Mathematical Modeling for the Development of Devices as an Example of Viscous Fluid Purification from Magnetic Impurity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, No. 177, pp. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012015.

8. Avdeyev B., Vyngra A., Bordyug A. Testing the Efficiency of Abrasive Treatment of Reconditioned Parts Using Coolant Cleaning in a Magnetic Sump. *MATEC Web of Conferences. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019*, 2019, Vol. 298, pp. 00115. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800115> (accessed 05.03.2020).

9. Lyutov A., Kryukov A., Cherny S. e.a. Modelling of a Francis Turbine Runner Fatigue Failure Process Caused by Fluid-Structure Interaction. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, Vol. 49. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/49/7/072012>.



Сафуллин Р. А.
Safiullin R. A.

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Технические дисциплины»,
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», филиал,
г. Нефтекамск, Российская Федерация

УДК 531.768

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-19-26

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОЛЫМ РОТОРОМ С ПРОРЕЗЯМИ СО СКОСОМ

Актуальность

В настоящее время асинхронные электрические машины используются во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства экономики страны, а также в виде электрооборудования в бытовых условиях жизнедеятельности людей. Электрические машины — это устройства электромеханического преобразования физической энергии, основанные на явлениях электромагнитной индукции, силы Ампера и выпускаются предприятиями электромашиностроения в различных модификациях. Электромеханические показатели, такие как простота обслуживания, технологичность изготовления, высокие энергетические показатели и эксплуатационной надежности асинхронных двигателей, позволили их серийный выпуск во всем мире. По сравнению с другими электрическими машинами они потребляют до 55 % доли вырабатываемой электрической энергии и составляют основу современного электропривода машин и механизмов практически во всех отраслях народного хозяйства. В отличие от других электрических машин переменного тока в асинхронном двигателе частота вращения ротора не равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

Цель исследования

При проектировании таких электрических машин актуальными задачами остаются проблемы уменьшения момента инерции ротора, его быстродействия при протекании электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

Методы исследования

Математическая модель асинхронного двигателя, которая имеет полый ротор с прорезями со скосом пазов.

Результаты

Результаты экспериментального исследования данной модели приводят к повышению крутизны и искажению нелинейности механических характеристик асинхронного электродвигателя с увеличением числа прорезей пазов в сторону малых частот. Экспериментальные данные показали эффективность применения прорезей со скосом в роторах маломощных и малогабаритных электромеханических систем.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, ротор, прорези, магнитное число Рейнольдса, модель, экспериментальные исследования.

MATHEMATICAL MODEL OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A HOLLOW ROTOR WITH SLOTS WITH A BEVEL

Relevance

Currently, asynchronous electric machines are used in all industries and agriculture of the country's economy, as well as in the form of electrical equipment in the living conditions of people. Electric machines are devices for electro-mechanical conversion of physical energy based on the phenomena of electromagnetic induction, Ampere force and are produced by electrical engineering enterprises in various modifications. Electromechanical indicators such as ease

of maintenance, manufacturability, high energy performance and operational reliability of asynchronous motors allowed their serial production worldwide. Compared to other electric machines, they consume up to 55 % of the generated electric energy and form the basis of modern electric drive of machines and mechanisms in almost all sectors of the national economy. Unlike other AC electric machines, in an asynchronous motor, the rotor speed is not equal to the speed of the magnetic field generated by the stator winding current.

Aim of research

When designing such electric machines, the problems of reducing the moment of inertia of the rotor, its speed during the course of electromagnetic and electromechanical transients remain urgent problems.

Research methods

A mathematical model of an asynchronous motor, which has a hollow rotor with slots with beveled grooves.

Results

The results of the experimental study of this model lead to an increase in the steepness and distortion of the non-linearity of the mechanical characteristics of an asynchronous electric motor with an increase in the number of slot slots in the direction of low frequencies. Experimental data have shown the effectiveness of the use of slits with a bevel in the rotors of low-power and small-sized electromechanical systems.

Keywords: induction motor, rotor, slots, magnetic Reynolds number, model, experimental research.

Введение

В наши дни во многих отраслях промышленности экономики страны электромеханические преобразователи активно используются для обеспечения необходимых условий автоматизации технологических процессов производства различного сортамента выпускаемой продукции. Они используются для выполнения необходимых технологических функций в различных конструкциях вспомогательных машин. В отдельных случаях в качестве вторичных систем электромеханических преобразователей используются рабочие органы машин или специальные роторы для повышения специальных требований технологических процессов. Поэтому актуальной задачей является разработка и оптимизация новых конструкций электромеханических преобразователей с распределенной вторичной системой, в частности асинхронных двигателей (АД) с полым ротором как исполнительных двигателей переменного тока. В настоящее время асинхронные исполнительные двигатели (АИД) выпускаются в электромашиностроении в следующих модификациях: с полым немагнитным ротором, с полым ферромагнитным ротором и с ротором «беличья клетка» [1–4]. Такие АИД нашли свое широкое применение в системах

траекторного управления, следящих системах передачи угла, инерциальных навигационных системах, пилотажно-навигационных индикаторах, указателях скорости поворота и т.д. [1, 2, 5–7].

Стандартная конструкция асинхронного двигателя с полым ротором включает в себя статор с обмотками возбуждения и управления, шихтованный магнитопровод (ядро) и сплошной полый ротор. Недостатком данного технического решения является то, что в материале ротора растекаются вихревые ЭДС токи, негативно влияющие на энергетические характеристики электрической машины. Образующийся поперечный краевой эффект приводит к тому, что вихревые токи замыкаются не только в выступающих лобовых частях, но и в активной области ротора [5, 6].

Постановка задачи исследования

Малые и средние асинхронные двигатели до 1 кВт с полым ротором могут быть спроектированы со скосом пазов ротора для того, чтобы минимизировать моменты скольжения и зубцовых гармоник полей ЭДС, которые не могут быть устранены распределением обмоток и витковым коротким замыканием [4, 7]. Конструктивно асинхронные двигатели с полым ротором представляют собой индук-

ционные микромашины, вторичная среда (ротор) которых выполняется в виде полого цилиндра, конуса, диска или ленты. Выбор конструктивного исполнения ротора диктуется предъявляемыми к детали со стороны электропривода требованиями технологических систем, основными из которых являются КПД, $\cos \varphi$, крутящий или тормозной моменты [1–4].

В работах [3, 4] описана двумерная аналитическая модель прогнозирования индуцированных токов в проводящем материале, помещенном в пазы электрических машин. Щелевые проводники подвергаются воздействию вращающегося магнитного поля, включающего пространственные гармоники. Аналитический метод основан на разрешении гармонического по времени однородного уравнения Гельмгольца в полярных координатах методом разделения переменных. Глобальное решение получено с использованием граничных условий и условий непрерывности между различными поддоменами (щелями ротора и воздушным зазором). Предложенная модель применяется для расчета магнитного поля и крутящего момента в асинхронном двигателе с полым ротором в установившемся режиме. Аналитические результаты проверяются с помощью анализа конечных элементов и представлены их графические интерпретации.

Задачи проектирования и оптимизации асинхронных двигателей с полым ротором с оптимальными энергетическими характеристиками являются актуальным и трудоёмким процессом. В данной работе исследуется асинхронный двигатель с полым ротором с прорезями со скосом, что позволяет существенно повысить линейность и крутизну механической энергетической характеристики.

Теория и методы расчета малоинерционных АД с полым ротором имеют много общего с теорией МГД-машин, экранированных электрических машин, так как в основу принципа действия этих преобразователей положено взаимодействие бегущего электромагнитного поля с проводящей средой [1, 5–7].

Анализ таких существующих преобразователей в настоящее время показывает, что

постоянно возникает потребность в разработке новых АД с повышенными механическими характеристиками в целях расширения их функциональных и технологических возможностей. В работе представлена новая конструкция АД и получены выражения для расчета выходных ее характеристик с учетом скоса продольных прорезей различного размера в полем роторе, что подтверждает новизну представленной работы в области электромеханики и автоматики [1–4, 6–8].

В асинхронном двигателе с продольными прорезями полого ротора достигается улучшение энергетических показателей асинхронных двигателей с полым ротором (повышение максимального момента, КПД и $\cos \varphi$ двигателя) [8]. Указанные преимущества, отличающиеся от ранее известных конструкций, обеспечиваются тем, что продольные прорези выполнены в полем электропроводящем роторе под некоторым углом α (скосом). Такое исполнение продольных прорезей на роторе, за счет компенсации высших нечетных гармоник $\nu = 3, 5, 7, \dots, n+1$, приводит к улучшениям механических характеристик нового АД, т.е. уничтожаются спектры высших гармоник, искажающих нелинейность механических характеристик, исходящих непосредственно от самого объекта [5, 6].

Конструкция асинхронного двигателя с продольными прорезями полого ротора приведена на рисунке 1 [9].

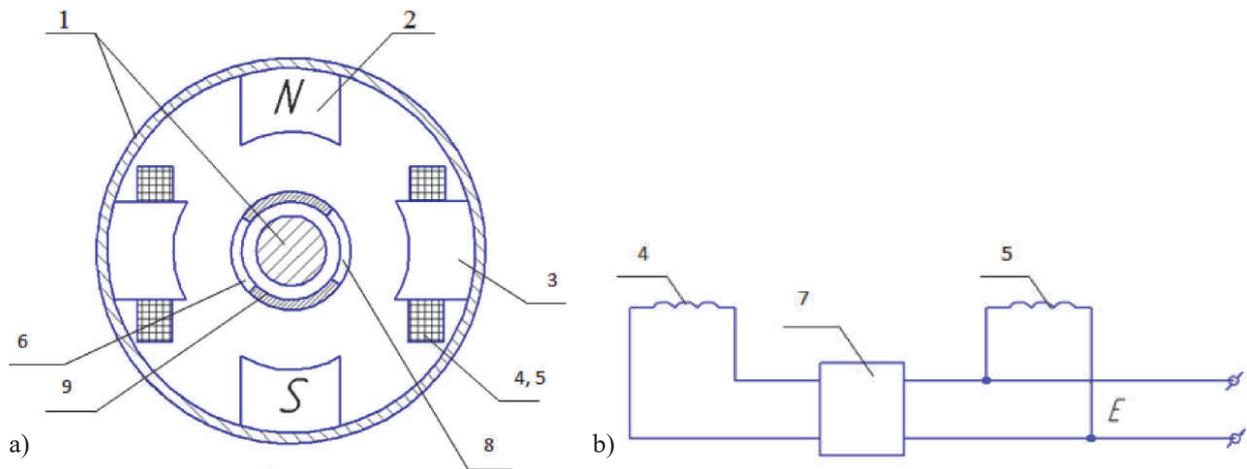
Решение задачи

Для определения механической характеристики представим расчетную схему ротора АД в виде плоскопараллельной пластины с прорезями со скосом, представленной на рисунке 2, которую развернем на плоскости.

Электромагнитные процессы в электромеханических преобразователях описываются уравнениями Максвелла для медленно движущихся изотропных и проводящих сред [9, 10]. В системе координат, жестко связанной с ротором АД, для комплексных амплитуд они будут иметь вид [5]

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= i + \overrightarrow{i}_{EC}, \operatorname{rot} \vec{E} = -j\omega \vec{B}, \\ \vec{B} &= \mu\mu_0 + \vec{H}, \vec{i} = \sigma \vec{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \overrightarrow{i}_{EC} — плотность стороннего тока.

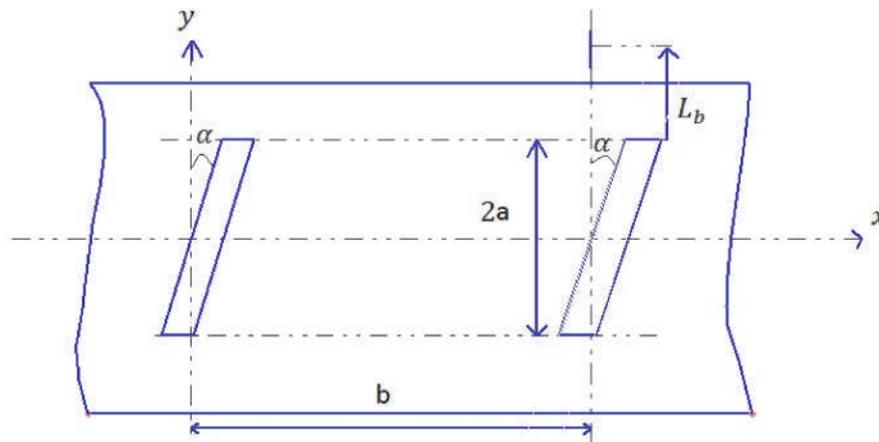


а) схема конструкции АД в сечении; б) схема подключения обмоток АД
 1 — статор; 2 — постоянные магниты; 3 — полюса; 4 — измерительная обмотка;
 5 — компенсационная обмотка; 6 — полый, электропроводный ротор; 7 — усилитель;
 8 — продольные прорези; 9 — аксиальная пластина

Рисунок 1. Конструкция АД с полым ротором

a) diagram of the AM design in section; b) connection diagram of the AM windings
 1 — stator; 2 — permanent magnets; 3 — poles; 4 — measuring winding; 5 — compensation winding;
 6 — hollow, electrically conductive rotor; 7 — amplifier; 8 — longitudinal slots; 9 — axial plate

Figure 1. The design of the AM with a hollow rotor



x, y — оси координат; α — угол отклонения прорезей;
 $2a, b$ — длина и период прорезей; L_b — расстояние между прорезями

Рисунок 2. Схема ротора со скосом прорезей

x, y — coordinate axes; α — the angle of deflection of the slots;
 $2a, b$ — length and period of the slits; L_b — distance between slots

Figure 2. Rotor diagram with bevel slots

Решение данных дифференциальных уравнений с учетом всех конструктивных особенностей электромеханического преобразователя можно проводить численными методами [8, 11–13]. Другим методом является использование ряда допущений. Поэтому при решении данной задачи принимаются следующие допущения, мало искажающие реальную картину электромагнитных процессов: толщина рабочего зазора значительно меньше среднего радиуса

и магнитное поле плоскопараллельно; индукция первичного магнитного поля в воздушном зазоре задана основной пространственной гармоникой; вне индуктора поле равно нулю; плотность вихревых токов по толщине ротора постоянна; магнитная проницаемость материала ротора равна μ_0 , а магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности; ширина прорези со скосом мала по сравнению с расстоянием между прорезями.

На основании первого уравнения Максвелла, падение напряжения от вихревых токов в трубке по контуру элементарного участка поверхности ротора уравновешивается ЭДС трансформации и движения наведенным результирующим полем. Для определения характеристик АД необходимо найти распределение магнитного поля в зазоре, а также плотности вихревых токов по объему ротора. Согласно принятым допущениям, напряженность магнитного поля имеет одну составляющую по оси z , а плотности токов будут иметь две составляющие:

$$\vec{i}_x = \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial y}, \vec{i}_y = \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x}. \quad (2)$$

Здесь и далее индекс z у напряженности магнитного поля для краткости опускается. Напряженность магнитного поля определяется в виде суммы поля индуктора (известное поле) H_0 и поля индуцированных вихревых токов H_1 на поверхности ротора. В итоге получаем уравнение Кирхгофа в дифференциальной форме (3). Тогда из формулы (1) с учетом принятых допущений можно получить:

— в активной зоне (система координат $хоу$, $0 < x < b$, $-a < y < a$):

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} - j\varepsilon_f \alpha^2 H_a = j\varepsilon_f \alpha^2 H_0 e^{-j\alpha x}, \quad (3)$$

где $\alpha = \pi/\tau$; τ — полюсное деление; $\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$ — магнитное число Рейнольдса (МЧР) [5]; $\omega = p\Omega/t$; Ω — угловая скорость вращения; $\omega = 2\pi f$, f — частота питающей сети; k_d — коэффициент Картера, учитывающий влияние пазов и насыщения [4, 7].

Для определения величин вихревых токов и напряженности магнитного поля из дифференциального уравнения (3) необходимо учи-

тывать закон непрерывности тока для всех элементарных участков поверхности ротора. Проведя несложные математические выкладки для электромагнитной силы, действующей на активную зону ротора, получим выражение

$$F_x = \iiint_V f_{xmi} dx dy dz = \frac{1}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0} \alpha \frac{\varepsilon_f}{1+\varepsilon_f} 2bl_{ml}\Delta, \quad (4)$$

где Δ — толщина; l_{ml} — средний периметр ротора.

С учетом того, что $\alpha = \frac{\pi}{2a}$, окончательно получим для интегральной электромагнитной силы формулу

$$F_z = \frac{\pi}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \Delta l_{ml} \frac{\varepsilon_f}{1+\varepsilon_f^2}. \quad (5)$$

Из данного выражения определяется электромагнитный момент на роторе АД с прорезями со скосом:

$$M_z = \frac{1}{2} \frac{B_{1m}^2}{\mu_0 k_d} \frac{\varepsilon_f}{1+\varepsilon_f^2} \pi l_{mid} \Delta R. \quad (6)$$

Из полученных формул (5) и (6), варьируя числовыми значениями МЧР или критической скорости, можно найти необходимые энергетические параметры. В свою очередь, изменив данные параметры можно получить требуемую механическую (демпфирующую) характеристику. Например, для того чтобы сместить максимум сигнала в область более высоких скоростей, нужно увеличить числитель формулы (6) (число пар полюсов или зазор) или уменьшить знаменатель (радиус, толщину или электропроводность материала ротора) [14].

На рисунке 3 представлена механическая характеристика АД без прорезей с немагнитным ротором ($b = \infty$) для различных безразмерных значений $\frac{M}{M_{bas}}$ от значений $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bas}}$.

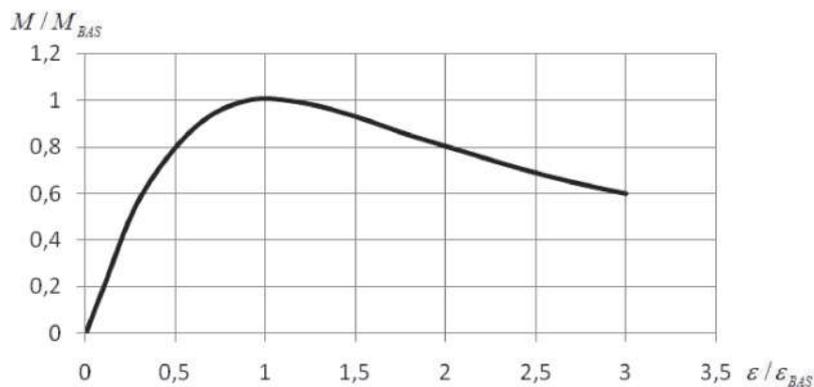


Рисунок 3. Выходная характеристика АД с полым ротором без прорезей (о.е.)

Figure 3. Output characteristic of AM with a hollow rotor without slots (p.u.)

При проектировании различных электро-механических устройств возникают различные требования к их выходным характеристикам. В одном случае для практических приложений существенна линейность зависимости крутизны характеристики и чувствительности от скорости, во втором — желательно иметь максимальное значение чувствительности, в третьем — важно их малое изменение в определенном диапазоне скоростей. Эти вопросы могут быстро решаться путем анализа значения магнитного числа Рейнольдса. Если значения $\varepsilon \ll 1$, то зависимость выхода от скорости практически линейна, если $\varepsilon_f = 1$, то выходные характеристики близки к максимуму и т.д. [14, 15].

В результате решения математической модели электромеханического преобразователя с полым ротором [7] и с учетом влияния скоса прорезей получено выражение для электромагнитного момента в виде

$$M = M_{BAS}(M_i^* + k_c \Delta M_i^*), \quad (8)$$

где $M_i^* = \frac{2\varepsilon_f}{1+\varepsilon_f^2}$ — относительный демпфирующий момент без краевого эффекта и скоса [2, 6]; ΔM_i^* — дополнительный демпфиру-

ющий момент, в о.е., в случае наличия прорезей и скоса; k_c — коэффициент учета скоса прорезей [1], $\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$ — магнитное число Рейнольдса [1].

На рисунке 4 представлены механические характеристики АД с прорезями на роторе в о.е. для различных значений периода b прорезей на поверхности ротора.

Из анализа кривых рисунка 4 видно, что выполнение АД с прорезями на роторе приводит к повышению крутизны механической характеристики, и с увеличением числа прорезей эти характеристики возрастают в сторону малых частот. Показатель насыщения связан с увеличением потока гармоник рассеяния электромагнитной энергии за счет скоса пазов. Отсюда следует, что особенно эффективным будет применение прорезей со скосом в роторах маломощных и малогабаритных электромеханических систем.

Такой АД найдет широкое применение в автоматике, промышленности, системах управления и на объектах различного функционального назначения (рисунок 5).

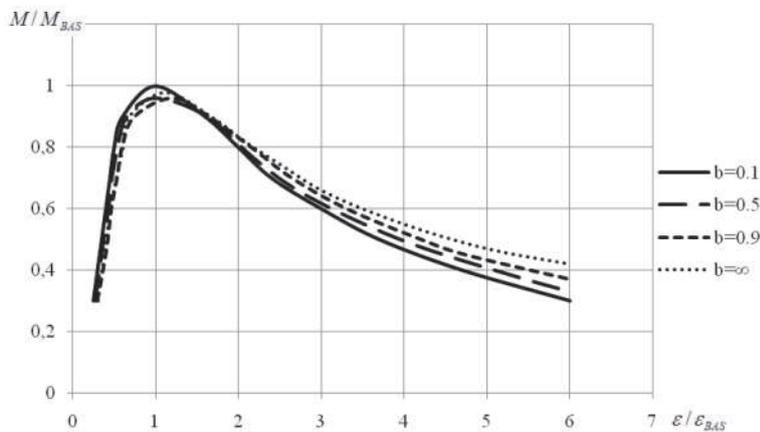


Рисунок 4. АД со скосом прорезей на роторе (о.е.)

Figure 4. AM with beveled slots on the rotor (p.u.)



Рисунок 5. Экспериментальная модель

АД с полым прорезями со скосом пазов ротором

Figure 5. Experimental model of AM with hollow slots with beveled slots by the rotor

Выводы

На основе аналитического решения для распределения плотности вихревых токов в пределах участка полого ротора, соответствующего зубцовому делению статора, получены выражения, позволяющие опреде-

лить электромагнитную силу и момент, действующие на полый ротор с прорезями со скосом.

Приведена оригинальная конструкция АД со скосом прорезей на полым роторе, обладающая повышенной линейностью механиче-

ской характеристики, а также с расширенными функциональными возможностями в электромеханических системах.

Полученные аналитические соотношения позволяют анализировать и проектировать

новые конструкции АД с полым ротором с учетом и без учета краевых эффектов при наличии продольных прорезей со скосом в полом роторе в зависимости от магнитного числа Рейнольдса.

Список литературы

1. Анненков А.Н., Сизиков С.В., Шиянов А.И. Асинхронные двигатели с токопроводящим слоем материала ротора. Минск: УП «Ризондис», 2004. 234 с.
2. Annenkov A.N., Sizikov S.V., Shiyonov A.I. Asynchronous Motor with a Hollow Perforated Rotor // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2018. Vol. 6, No. 2. P. 129–140. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-129-140.
3. Zablodskiy M., Gritsyuk V., Rudnev Y., Brozhko R., Timofieieva O. Analysis of 3D Eddy Current Distribution in a Hollow Rotor of an Electromechanical Converter // *The Active Wave Resistance Determination of Hollow Perforated Rotor of Electromechanical Converter*, 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2020. С. 561–564, DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088777.
4. Lubin T., Mezani S., Rezzoug A. Analytic Calculation of Eddy Currents in the Slots of Electrical Machines: Application to Cage Rotor Induction Motors // *IEEE Transactions on Magnetics*. November 2011. 47 (11). P. 4650–4659. DOI:10.1109/TMAG.2011.2157167.
5. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. М.-СПб.: Питер, 2006. Т. 1: 319 с.; Т. 2: 346 с.
6. Вевюрко И.А. К расчету характеристик двухфазной индукционной машины с полым ротором // *ВЭП*. 1957. № 6. С. 34–39.
7. Subrahmanyam V. *Electric Drives. Concepts and Applications*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2011. 752 p.
8. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine // *2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020)*. National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Russia, March 12-14, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE-49198.2020.9059225.

9. Сафиуллин Р.А. Устойчивость композитного ротора электрической машины на подшипниках скольжения // *Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: тр. X Всероссий. науч.-техн. конф., Оренбург, 2019 г.* Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. С. 275–282.

10. Сафиуллин Р.А., Галеев Р.Ф., Мухаметзянов И.А. Инженерный расчёт характеристик электромеханического преобразователя с композитным вторичным элементом // *Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф.* Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 555–561.

11. Duyar A., Albas E., Durakbasa O.T., Serafettinoglu A.H. Modelbased Fault Detection System for Electric Motors. Patent US6014598A. 2000.

12. Cheng Jiatang, Xiong Yan. Application of Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm in Rotor Fault Diagnosis for Asynchronous Motor // *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 131. P. 1275–1281.

13. Wang L. H. Motor Fault Diagnosis Based on Short-Time Fourier Transform and Convolutional Neural Network // *Chinese Journal of Mechanical Engineering. Ji Xie Gong Cheng Xue Bao: the Official Journal of the Chinese Mechanical Engineering Society*. 2017. Vol. 30, No. 6. P. 1357–1368.

14. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины. Л.: Энергия, 1970. 271 с.

15. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р. Электромагнитные демпферы с продольными прорезями полого ротора // *Электротехника*. 2000. № 8. С. 27–29.

References

1. Annenkov A.N., Sizikov S.V., Shiyonov A.I. *Asinkhronnye dvigateli s tokoprovodyashchim sloem materiala rotora* [Asynchronous Motors with a Conductive Layer of the

Rotor Material]. Minsk, UP «Rizondis», 2004. 234 p. [in Russian].

2. Annenkov A.N., Sizikov S.V., Shiyonov A.I. Asynchronous Motor with a Hollow Perforated Rotor. *Energetika. Pros. SIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.*, 2018, Vol. 6, No. 2, pp. 129–140. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-129-140.

3. Zablodskiy M., Gritsyuk V., Rudnev Y., Brozhko R., Timofieieva O. Analysis of 3D Eddy Current Distribution in a Hollow Rotor of an Electromechanical Converter. *The Active Wave Resistance Determination of Hollow Perforated Rotor of Electromechanical Converter, 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2020, pp. 561–564. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088777.

4. Lubin T., Mezani S., Rezzoug A. Analytic Calculation of Eddy Currents in the Slots of Electrical Machines: Application to Cage Rotor Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. November 2011, 47 (11), pp. 4650–4659. DOI:10.1109/TMAG.2011.2157167.

5. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Moscow-Saint-Petersburg: Piter Publ., 2006. Vol. 1: 319 p.; Vol. 2: 346 p. [in Russian].

6. Vevyurko I.A. K raschetu kharakteristik dvukhfaznoi induktsionnoi mashiny s polym rotorom [On the Calculation of the Characteristics of a Two-Phase Induction Machine with a Hollow Rotor]. *VEP — VEP*, 1957, No. 6, pp. 34–39. [in Russian].

7. Subrahmanyam V. *Electric Drives. Concepts and Applications*. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publ., 2011. 752 p.

8. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine. *2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020). National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*. Moscow, Russia, March 12–14, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE-49198.2020.9059225.

9. Safiullin R.A. Ustoichivost' kompozitnogo rotora elektricheskoi mashiny na podshipnikakh skol'zheniya [Stability of the composite rotor of an electric machine on sliding

bearings]. *Trudy X Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference «Power Engineering: State, Problems, Prospects»]. Orenburg, 2019 g. Orenburg, Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, 2019, pp. 275–282. [in Russian].

10. Safiullin R.A., Galeev R.F., Mukhametzyanov I.A. Inzhenernyi raschet kharakteristik elektromekhanicheskogo preobrazovatelya s kompozitnym vtorichnym elementom [Engineering Calculation of the Characteristics of an Electromechanical Converter with a Composite Secondary Element]. *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Energetika: Management, Quality and Efficiency of Energy Resources Use»]. Blagoveshchensk, Amurskii gos. un-t, 2019, pp. 555–561. [in Russian].

11. Duyar A., Albas E., Durakbasa O.T., Serafettinoglu A.H. *Modelbased Fault Detection System for Electric Motors*. Patent US6014598A. 2000.

12. Cheng Jiatang, Xiong Yan. Application of Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm in Rotor Fault Diagnosis for Asynchronous Motor. *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 131, pp. 1275–1281.

13. Wang L. H. Motor Fault Diagnosis Based on Shorttime Fourier Transform and Convolutional Neural Network. *Chinese Journal of Mechanical Engineering. Ji Xie Gong Cheng Xue Bao: the Official Journal of the Chinese Mechanical Engineering Society*, 2017, Vol. 30, No. 6, pp. 1357–1368.

14. Vol'dek A.I. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny* [Induction Magnetohydrodynamic Machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 271 p. [in Russian].

15. Khairullin I.Kh., Ismagilov F.R., Sattarov R.R. Elektromagnitnye dempfery s prodol'nymi prorezyami pologo rotora [Electromagnetic Dampers with Longitudinal Slots of a Hollow Rotor]. *Elektrotekhnika — Electricity*, 2000, No. 8, pp. 27–29. [in Russian].



Семина И. А.
Semina I. A.

*кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электрическая техника»,
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет»,
г. Омск, Российская Федерация*



Андреева Е. Г.
Andreeva E. G.

*доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры
«Электрическая техника»,
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет»,
г. Омск, Российская Федерация*

УДК 621.316.9:004.94

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-27-32

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПРОГРАММЕ MATLAB SIMULINK

Актуальность

Рассматриваются проблемы моделирования в программе Matlab Simulink схемы максимальной токовой защиты (МТЗ) силового трансформатора напряжением 110 кВ при трехфазном коротком замыкании на стороне низкого напряжения 6 кВ с возможностью просмотра результатов моделирования на стороне высокого напряжения 110 кВ. Решены следующие задачи моделирования: составлена имитационная модель схемы МТЗ силового трансформатора; подсистема, позволяющая моделировать короткое замыкание силового трансформатора на стороне напряжения 6 кВ при регулируемых уставках по току и времени.

Цель исследования

Имитационное моделирование проведено по техническому заданию для конфигурирования МТЗ силового трансформатора 110 кВ компании ООО «ПромАльянс», г. Ростов-на-Дону.

Методы исследования

Моделирование релейной защиты силового трансформатора напряжением 110/6 кВ осуществляется в программной среде Matlab Simulink, позволяющей моделировать процессы короткого замыкания в режиме реального времени.

Результаты

Получены графики зависимости тока срабатывания защиты (I, А) от времени срабатывания (t_{ср}, с). Полученные результаты моделирования внедрены в производство.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика (РЗА), силовой трансформатор, максимальная токовая защита (МТЗ), имитационная модель, короткое замыкание.

SIMULATION OF OVERCURRENT PROTECTION OF POWER TRANSFORMER IN MATLAB SIMULINK SOFTWARE

Relevance

The problems of simulation in the Matlab Simulink program of the overcurrent protection circuit of a 110 kV power transformer with a three-phase short circuit on the low voltage side of 6 kV with the ability to view the simulation results on the high voltage side of 110 kV are considered. The following modeling tasks have been solved: a simulation model of the power transformer circuit has been compiled; a subsystem that allows simulating a short circuit of a power transformer on the voltage side of 6 kV with adjustable current and time settings.

The aim of research

Simulation modeling was carried out according to the terms of reference for configuring of a 110 kV power transformer, PromAlliance LLC, Rostov-on-Don.

Research methods

Modeling of relay protection of a power transformer with a voltage of 110/6 kV is carried out in the Matlab Simulink software environment, which makes it possible to simulate short circuit processes in real time.

Results

The graphs of the dependence of the protection operation current on the operation time were obtained. The obtained simulation results were introduced into production.

Keywords: relay protection and automation (RPA), power transformer, overcurrent protection, simulation model, short circuit.

Цифровые устройства РЗА получили широкое распространение для защиты электроустановок предприятий от коротких замыканий. В качестве цифровых устройств в настоящее время используют микропроцессорные терминалы. Микропроцессорные терминалы, шкафы и комплекты защит выпускаются как зарубежными, так и российскими предприятиями [1–3].

Имитационное моделирование проведено по техническому заданию для конфигурирования максимальной токовой защиты (МТЗ) силового трансформатора 110 кВ компании ООО «ПромАльянс» г. Ростов-на-Дону. Моделирование релейной защиты силового трансформатора напряжением 110/6 кВ осуществляется в программной среде Matlab Simulink, позволяющей моделировать процессы короткого замыкания в режиме реального времени [1–4].

Моделирование схемы релейной защиты в программе Matlab Simulink

На рисунке 1 приведен блок задания параметров источника питания. Этот блок имитирует трехфазный источник напряжения с нулевым выводом. В данном блоке задаются параметры фазного напряжения со значением амплитуды 110 кВ и частотой сети 50 Гц [1–3].

Параметрами блока являются:

- Phase-to-phase voltage (V_{rms}) (действующее значение линейного напряжения (В)),
- Phase angle of phase A (degrees) (начальное значение напряжения в фазе А (град)),
- Frequency (Hz) (частота (Гц)).

Разработана имитационная модель схемы защиты с силовым трехфазным трансформатором (рисунок 2). Имитационная модель состоит из следующих основных элементов: источник напряжения, силовой трансформатор,

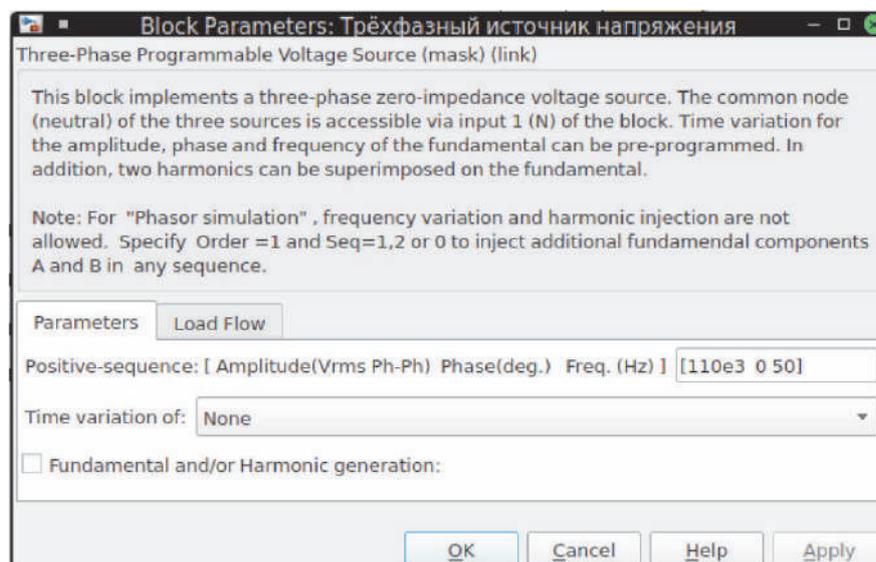


Рисунок 1. Блок параметров источника питания

Figure 1. Power supply parameters block

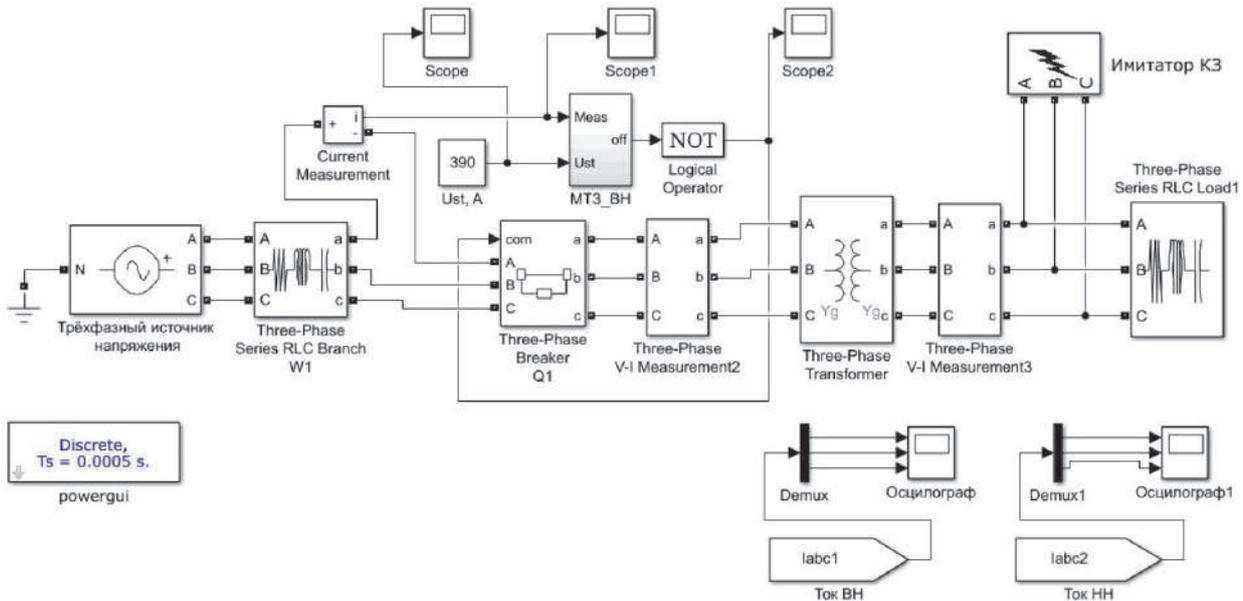


Рисунок 2. Имитационная модель МТЗ силового трансформатора в Matlab Simulink
Figure 2. Simulation model of power transformer overcurrent protection in Matlab Simulink

выключатель, блок МТЗ, блок ввода значения уставки, блок линии электропередачи (ЛЭП), блок нагрузки, блок имитатора короткого замыкания, измерительные приборы [4–6].

В нормальном режиме система (рисунок 2) работает на трехфазную нагрузку. Питание силового трансформатора осуществляется от трехфазного источника напряжения по линии электропередачи напряжением 110 кВ (блок Three Phase Series RLC Branch W1, рисунок 2). Заданная уставка по току (U_{ust} , рисунок 2) составляет 390 А. Измеритель тока (блок Current Measurement, рисунок 2) фиксирует сигнал тока в онлайн режиме с выключателя Q1 и ЛЭП W1. Начиная с момента времени 0,3 с, происходит имитация трехфазного короткого замыкания с помощью блока Имитатор КЗ (рисунок 2). Далее через время $t = 2,4$ с, равное времени уставки,

срабатывает блок МТЗ ВН и происходит отключение выключателя Q1.

Субсистема, моделирующая МТЗ силового трансформатора 110 кВ, показана на рисунке 3.

Блок Atomic Subsystem работает на сравнение двух сигналов тока. Уставка МТЗ по току и ток в трансформаторе сравниваются в режиме реального времени в блоке Relational Operator. Если ток трансформатора в текущее время превышает уставку U_{st} , то сигнал тока с блока Relational Operator поступает в блок Atomic Subsystem, где происходит сравнение тока МТЗ с константой Constant 2. Через заданное время, равное 2,4 с (блок Уставка по времени, рисунок 3), сигнал тока с блока Atomic Subsystem поступает на вход выключателя Q1, после чего ток становится равным нулю, и происходит отключение трансформатора.

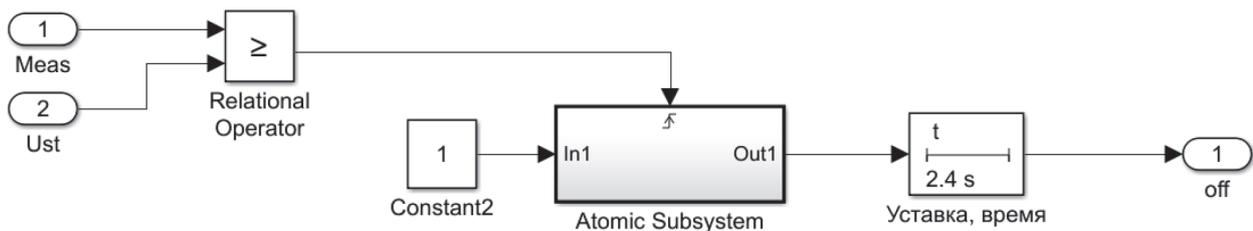


Рисунок 3. Модель максимальной токовой защиты трансформатора
Figure 3. Model of transformer overcurrent protection

Результаты моделирования работы максимальной токовой защиты силового трехфазного трансформатора при трехфазном коротком замыкании представлены ниже,

на рисунках 4 (сторона высокого напряжения 110 кВ) и 5 (сторона низкого напряжения 6 кВ).

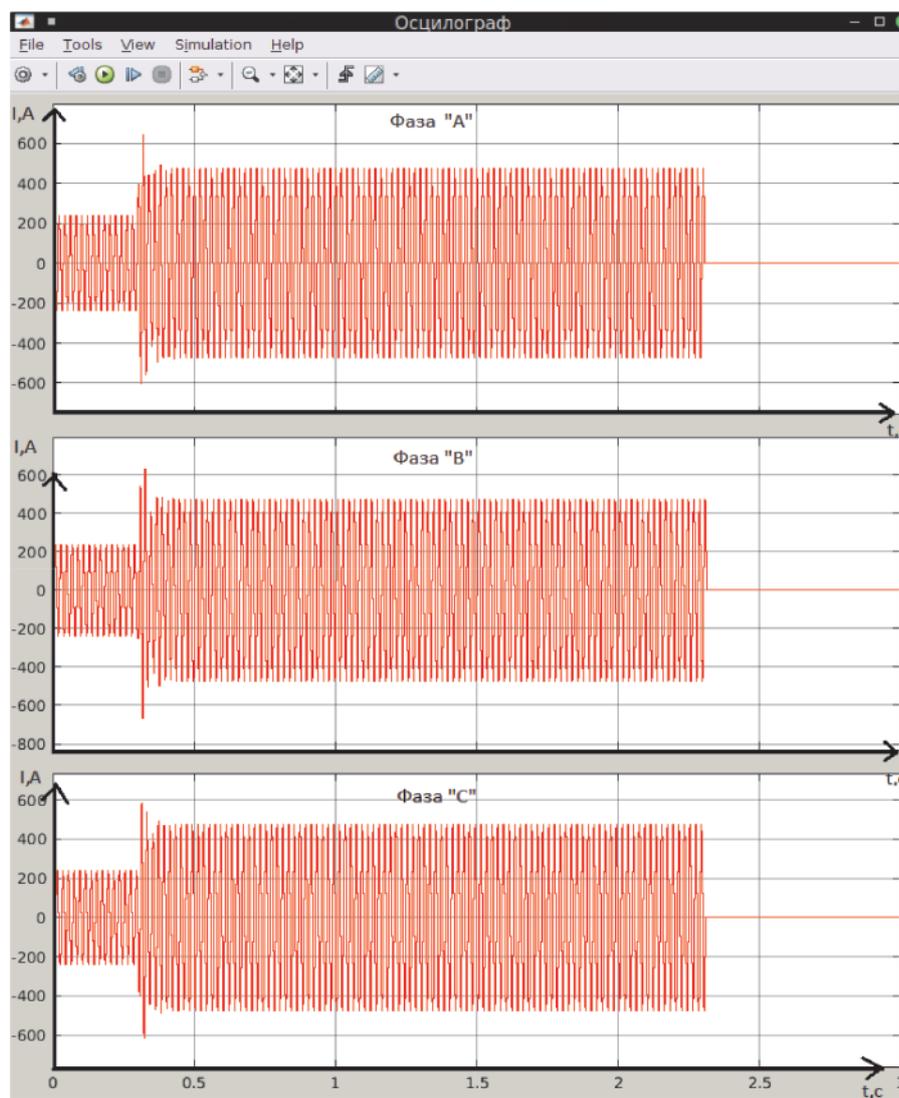


Рисунок 4. Изменение тока трехфазной системы по фазам А, В, С со стороны высокого напряжения
Figure 4. Change in the current of a three-phase system in phases A, B, C from the high voltage side

На графиках представлены зависимости тока по фазам А, В, С и срабатывания МТЗ от времени (t) срабатывания релейной защиты. Время начала процесса короткого замыкания устанавливается вручную в диапазоне от 0 до 0,3 с. Так, трехфазное короткое замыкание в трансформаторе начинается с заданного в имитационной модели момента времени 0,3 с, ток снижается до нуля, и релейная защита отключает выключатель Q1 через заданное время — 2,0 с, равное времени

уставки МТЗ, что обеспечивает защиту трансформатора от короткого замыкания. Завершение процесса короткого замыкания отмечено на графике временем 2,4 с. При этом на стороне высокого напряжения трансформатора ток срабатывания МТЗ изменяется в диапазоне от минус 540 А до плюс 540 А (рисунок 4), а на стороне низкого напряжения трансформатора ток срабатывания МТЗ изменяется в диапазоне от минус $0,8 \times 10^4$ А до плюс $0,8 \times 10^4$ А (рисунок 5).

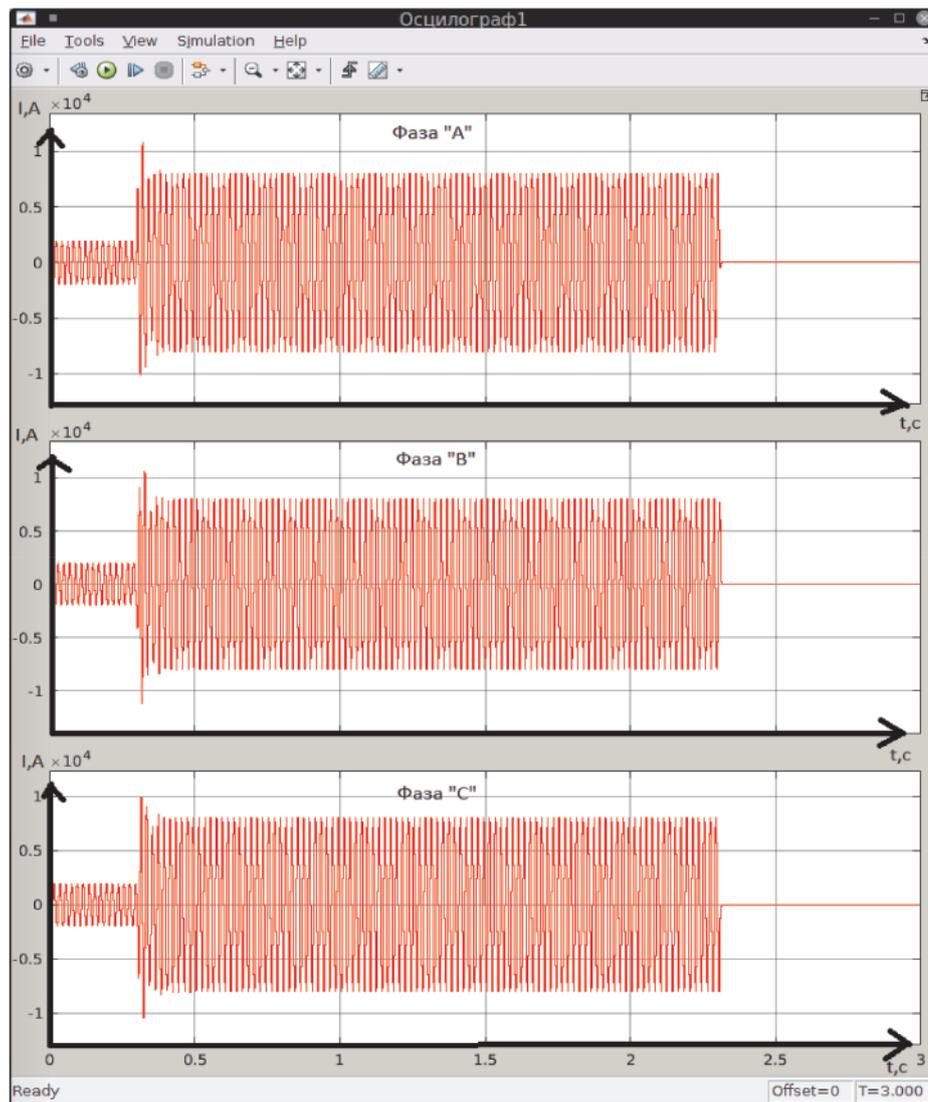


Рисунок 5. Изменение тока трехфазной системы по фазам А,В,С со стороны низкого напряжения

Figure 5. Change in the current of a three-phase system in phases A, B, C from the low voltage side

Выводы

Проведено моделирование в программе Matlab Simulink схемы максимальной токовой защиты силового трансформатора напряжением 110 кВ при трехфазном коротком замыкании на сторонах высокого (110 кВ) и низкого (6 кВ) напряжений.

Данная схема релейной защиты является универсальной, так как с ее помощью можно провести имитационное моделирование МТЗ силового трансформатора с задаваемыми параметрами и получить результаты моделирования, произвольно изменяя различные уставки срабатывания защиты по току и по времени.

Приведенная имитационная модель позволяет моделировать трехфазные короткие

замыкания, а также МТЗ силового трансформатора, работающего под нагрузкой. Через заданное время 2,0 с, равное времени уставки, защита отключает выключатель Q1, тем самым обесточив объект защиты — силовой трансформатор. Имитационная модель МТЗ силового трансформатора внедрена в производство.

В результате моделирования, при заданных уставках по току и времени, получены графики зависимости тока срабатывания МТЗ от времени срабатывания релейной защиты в online-режиме, которые показывают корректность работы модели максимальной токовой защиты силового трансформатора.

Список литературы

1. Грунин В.К., Рысев П.В., Планков А.А. и др. Силовое электрооборудование городских распределительных сетей: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 154 с.
2. Концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса: приложение № 1 к протоколу Правления ОАО «Россети» от 22 июня 2015 г. № 356пр. М., 2015. URL: http://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/vipiska_prilogenie.pdf (дата обращения: 23.01.2021).
3. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Академия, 2016. 287 с.
4. ISA: Setting the Standard for Automation. URL: <https://www.isa.org> (дата обращения: 15.11.2020).
5. Техническое консультирование. МЭК-61850. URL: <http://cons-systems.ru/m-k-61850> (дата обращения: 20.12.2020).

References

1. Grunin V.K., Rysev P.V., Plankov A.A. e.a. *Silovoe elektrooborudovanie gorodskikh raspredelitel'nykh setei: ucheb. posobie* [Power Electrical Equipment of Urban Distribution Networks: Textbook]. Omsk, Izd-vo OmGTU, 2014. 154 p. [in Russian].
2. *Kontseptsiya razvitiya releinoi zashchity i avtomatiki elektrosetevogo kompleksa: prilozhenie № 1 k protokolu Pravleniya OAO «Rosseti» ot 22 iyunya 2015 g. № 356pr.* [Concept for the Development of Relay Protection and Automation of the Power Grid Complex: Appendix No. 1 to the Protocol of the Management Board of JSC Russian Grids dd. June 22, 2015 No. 356pr.]. Moscow, 2015. URL: http://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/vipiska_prilogenie.pdf (accessed 23.01.2021). [in Russian].
3. Kireeva E.A., Tsyruk S.A. *Releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem: ucheb. dlya stud. uchrezhdenii sred. prof. obrazovaniya* [Relay Protection and Automation of Electric Power Systems: Text-book for Stud. Institutions of Secondary Prof. Education]. Moscow, Akademiya Publ., 2016. 287 p. [in Russian].
4. *ISA: Setting the Standard for Automation.* URL: <https://www.isa.org> (accessed 15.11.2020).
5. *Tekhnicheskoe konsul'tirovanie. MEK-61850.* [Technical Consulting. IEC-61850]. URL: <http://cons-systems.ru/m-k-61850> (accessed 20.12.2020). [in Russian].



Шабанов В. А.
Shabanov V. A.

кандидат технических наук,
профессор кафедры
электротехники и электрооборудования
предприятий,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Сорокин А. В.
Sorokin A. V.

ассистент кафедры
электротехники и электрооборудования
предприятий,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.316.1

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-33-43

АЛГОРИТМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В КАЧЕСТВЕ ОПОРНОГО ТОКА

Актуальность

В статье обсуждается использование аварийных составляющих токов и напряжений для дистанционного определения места повреждения (ОМП) при однофазных замыканиях на землю (ЗНЗ) в сетях 6–35 кВ, работающих с изолированной нейтралью. На однофазные ЗНЗ в сетях напряжением 6–35 кВ приходится до 75 % от всех повреждений. Такие ЗНЗ опасны для электрооборудования и повышают риск поражения человека и животных электрическим током. Однако дистанционные методы ОМП в таких сетях при однофазных ЗНЗ применяются в основном на отключенных от сети линиях. Поэтому тема статьи, посвященной анализу дистанционных ОМП в сетях 6–35 кВ по аварийным составляющим токов и напряжений, является актуальной.

Цель исследования

Исследовать алгоритмы дистанционного ОМП по аварийным токам и напряжениям с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока и обсудить пути их совершенствования. Такие алгоритмы нашли широкое применение при однофазных коротких замыканиях в сетях 110 кВ. Но в сетях 110 кВ они имеют методическую погрешность, обусловленную тем, что токи нулевой последовательности в начале линии и в месте повреждения не совпадают по фазе из-за комплексности коэффициентов распределения тока. В сетях с изолированной нейтралью токи нулевой последовательности в начале линии и в месте повреждения совпадают по фазе. Поэтому такие алгоритмы при однофазных ЗНЗ в таких сетях могут не иметь методической погрешности. Основной проблемой, которую приходится решать при разработке устройств для ОМП при однофазных ЗНЗ в сетях 6–35 кВ, это малые токи ЗНЗ. При этом на точность ОМП влияют соответствие расчетного значения коэффициента компенсации его фактическому значению и угловая погрешность измерения тока нулевой последовательности. В статье исследуется влияние отмеченных факторов на точность алгоритмов ОМП по аварийным составляющим

Методы исследования

Анализ работы алгоритмов определения места повреждения и оценка погрешностей их работы выполнены с помощью математической модели электрической сети с использованием программного пакета Excel.

Результаты

Исследовано применение алгоритма дистанционного ОМП по аварийным токам и напряжениям с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока. Показано, что при однофазных ЗНЗ в сетях с изолированной нейтралью он может не иметь методической погрешности. Показано, что при наличии угловой погрешности трансформаторов тока нулевой последовательности работа алгоритма становится зависимой от переходного сопротивления в месте повреждения и по мере увеличения переходного сопротивления погрешность ОМП. Исследованы алгоритмы, в которых в качестве опорного тока вместо тока нулевой последовательности используется разность фазных токов, измеренных до и после повреждения. Такой алгоритм, в котором ток нулевой последовательности используется только для компенсации фазного тока, менее чувствителен к угловой погрешности трансформаторов тока нулевой последовательности. Показано, что погрешность ОМП снижается, если ток нулевой последовательности для компенсации фазного тока поврежденной фазы определять через разность фазных токов, измеренных до и после повреждения.

Ключевые слова: сети с изолированной нейтралью, определение места повреждения, ток нулевой последовательности, аварийные составляющие токов, однофазное замыкание на землю.

ALGORITHMS FOR REMOTE DETERMINATION OF THE DISTANCE TO THE SINGLE-PHASE FAULT LOCATION USING THE ZERO-SEQUENCE CURRENT AS THE REFERENCE CURRENT

Relevance

The article discusses the use of emergency components of currents and voltages for remote determination of the fault location in single-phase earth faults in 6–35 kV networks operating with an isolated neutral. Single-phase short circuits in networks with a voltage of 6–35 kV account for up to 75 % of all damage. Such short circuits are dangerous for electrical equipment and increase the risk of electric shock to humans and animals. However, remote methods for determining the location of damage in such networks with single-phase short circuits are mainly used on disconnected lines. Therefore, the topic of the article devoted to the analysis of remote methods for determining the location of damage in 6–35 kV networks by emergency components of currents and voltages is relevant.

Aim of research

The aim of the article is to investigate algorithms for remote identification of the fault location by emergency currents and voltages using the zero-sequence current as a reference current and discuss ways to improve them. Such algorithms are widely used in single-phase short circuits in 110 kV networks. But in 110 kV networks, they have a methodological error due to the fact that the zero-sequence currents at the beginning of the line and at the point of damage do not coincide in phase due to the complexity of the current distribution coefficients. In networks with an isolated neutral, the zero-sequence currents at the beginning of the line and at the fault point coincide in phase. Therefore, such algorithms for single-phase short circuits in such networks may not have a methodological error. The main problem that has to be solved when developing devices for determining the location of damage in single-phase short circuits in 6–35 kV networks is small short-circuit currents. At the same time, the accuracy of determining the fault location is affected by the correspondence of the calculated value of the compensation coefficient to its actual value and the angular error of measuring the zero-sequence current. The article examines the influence of these factors on the accuracy of algorithms for determining the location of damage by emergency components

Research methods

The analysis of the algorithms for determining the location of damage and the estimation of errors in their operation were performed using a mathematical model of the electrical network using the Excel software package.

Results

The application of the algorithm for remote determination of the fault location based on emergency currents and voltages using the zero-sequence current as a reference current is investigated. It is shown that for single-phase short circuits in networks with an isolated neutral, it may not have a methodological error. It is shown that in the presence of the angular error of zero-sequence current transformers, the operation of the algorithm becomes dependent on the transient resistance at the fault location and, as the transient resistance increases, the error in determining the fault location. Algorithms are investigated in which the difference of phase currents measured before and after the fault is used as the reference current instead of the zero-sequence current. Such an algorithm, in which the zero-sequence current is used only to compensate for the phase current, is less sensitive to the angular error of zero-sequence current transformers. It is shown that the error in determining the location of the damage is reduced if the zero-sequence current for the compensation of the phase current of the damaged phase is determined through the difference of the phase currents measured before and after the damage.

Keywords: networks with isolated neutral, fault location detection, zero-sequence current, emergency components of currents, single-phase earth fault.

Введение

На однофазные замыкания на землю (ЗНЗ) в сетях напряжением 6–35 кВ приходится до 75 % от всех повреждений [1]. Такие ЗНЗ опасны для электрооборудования и повышают риск поражения человека и животных электрическим током. Поэтому определение места повреждения (ОМП) в таких сетях является актуальной задачей. Для ОМП в воздушных электрических сетях промышленных предприятий напряжением 6, 10 кВ обычно требуется проводить три операции [2, 3]: определение поврежденной линии (присоединения); дистанционное ОМП и топографическое (трассовое) ОМП. Под дистанционным ОМП понимают определение расстояния от начала линии до места повреждения по измерениям, выполненным на подстанции. Средства дистанционного ОМП широко применяются при коротких замыканиях (КЗ), сопровождающихся протеканием больших токов [4, 5]. Сети 6–35 кВ работают с изолированной нейтралью. Однофазные ЗНЗ в таких сетях не являются КЗ и не сопровождаются протеканием больших токов. Поэтому алгоритмы дистанционного ОМП, предназначенные для действия при КЗ, не применяются при однофазных ЗНЗ в сетях с изолированной нейтралью. Дистанционные методы ОМП в таких сетях при однофазных ЗНЗ применяются в основном на отключенных от сети линиях. К таким методам относятся импульсные и волновые методы [6, 7].

Разрабатываются методы и средства ОМП с использованием активного зондирования [8], стоячих волн [9], по наложенным токам высокой частоты [10] с использованием переходных процессов [11, 12], по параметрам аварийного режима [5, 13, 14] и на других принципах. Основными проблемами, которые приходится решать при разработке таких устройств для ОМП при однофазных ЗНЗ в сетях 6–35 кВ, это малые токи ЗНЗ и большие переходные сопротивления в месте повреждения изоляции. В статье рассматриваются методы дистанционного ОМП при однофазных ЗНЗ по аварийным составляющим токов и напряжений, в которых в качестве опорного тока используется ток нулевой последовательности. Рассмотрены пути совершенствования алгоритмов.

Алгоритмы ОМП при однофазных КЗ в сетях 110 кВ при одностороннем питании и их применимость для сетей 6–35 кВ. При одностороннем питании сопротивление линии до места замыкания определяется через входное сопротивление, под которым понимают отношение входного напряжения к входному току. Для дистанционного ОМП при однофазных КЗ в сетях 110 кВ в качестве входных величин используются фазное напряжение U_ϕ и фазный ток I_ϕ поврежденной фазы, компенсированный ток нулевой последовательности I_0 [4]. При этом выражение для входного сопротивления записывают в виде:

$$Z_p = \frac{U_\phi}{I_\phi + kI_0} \quad (1)$$

где k — коэффициент компенсации.

Представим входное фазное напряжение в виде суммы двух составляющих: падения напряжения в линии ΔU_L от ее начала до места ЗНЗ и напряжения U_K в точке замыкания (напряжение на переходном сопротивлении):

$$U_\phi = \Delta U_L + U_K, \quad (2)$$

где $\Delta U_L = (I_\phi + kI_0) \cdot Z_{LK}$;

$$U_K = 3I_{0K} \cdot R_L;$$

Z_{LK} — сопротивление линии прямой последовательности до места повреждения;

R_L — переходное сопротивление;

I_0 и I_{0K} — токи нулевой последовательности в начале линии и в месте замыкания.

Фазный ток поврежденной фазы I_ϕ в соответствии с методом симметричных составляющих можно представить в виде:

$$I_\phi = I_H + I_1^{ae} + I_2 + I_0, \quad (3)$$

где I_H — ток нагрузки;

I_1^{ae} и I_2 — аварийные токи прямой и обратной последовательностей в поврежденной линии.

В сетях 110 кВ ток нагрузки мал по сравнению с аварийными составляющими фазного тока. При этом можно пренебречь током нагрузки в выражении (3) и выражение (1) для Z_p принимает вид:

$$Z_p = Z_{LK} + \frac{3I_{0K} \cdot R_L}{I_1^{ae} + I_2 + (1+k)I_0}. \quad (4)$$

В случае одностороннего питания составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей в поврежденной линии I_1^{ae} , I_2 и I_0 будут совпадать по фазе с током нулевой последовательности в месте замыкания I_{0K} . При этом аргумент отношения тока I_{0K} к сумме токов $I_1^{ae} + I_2 + (1+k)I_0$, а следовательно, и мнимая часть второго слагаемого в выражении (4) будут равны нулю. В этом случае для расстояния L_K до места однофазного КЗ получаем:

$$L_K = \frac{1}{X_{1\text{ВД}}} \cdot \text{Im} Z_p, \quad (5)$$

где $\text{Im} Z_p$ — мнимая составляющая комплексного сопротивления Z_p ;

$X_{1\text{ВД}}$ — удельное индуктивное сопротивление линии прямой последовательности.

Сети 6–35 кВ, как правило, с односторонним питанием. Но в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью аварийные составляющие тока при однофазных ЗНЗ существенно меньше тока нагрузки. При этом током нагрузки I_H в выражении (3) пренебрегать нельзя, и токи в месте измерения и в месте повреждения существенно отличаются. Поэтому выражение (5) неприменимо для ОМП в сетях с изолированной нейтралью при однофазных ЗНЗ.

Алгоритмы ОМП при однофазных КЗ в сетях 110 кВ при двухстороннем питании и их применимость для сетей 6–35 кВ. В случае двухстороннего питания линии 110 кВ составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей I_1^{ab} , I_2 и I_0 не будут совпадать по фазе с током нулевой последовательности в месте замыкания I_{0K} . При этом аргумент отношения тока I_{0K} к сумме токов $I_1^{ab} + I_2 + (1+k)I_0$ в выражении (4) не будет равен нулю, и ОМП по выражению (5) с использованием входного сопротивления не используется.

При двухстороннем питании сопротивление до места однофазного КЗ в сетях 110 кВ определяется косвенно с помощью специальных алгоритмов. Рассмотрим алгоритмы, в которых в качестве опорного тока используется ток нулевой последовательности [15–18]. Опорным называют ток, относительно которого определяются фазы входных величин. Разделим обе части уравнения (2) на ток нулевой последовательности:

$$\frac{U_\phi}{I_0} = L_K \cdot Z_{\text{уд}} \cdot \frac{I_\phi + kI_0}{I_0} + \frac{I_{0K}}{I_0} \cdot 3R_L. \quad (6)$$

Приравняем мнимые части левой и правой частей уравнения (6) и примем, что переходное сопротивление чисто активное, а токи I_0 и I_{0K} совпадают по фазе. Тогда получим:

$$\text{Im} \frac{U_\phi}{I_0} = L_K \cdot \text{Im} \left(\frac{(I_\phi + kI_0)}{I_0} \cdot Z_{\text{уд}} \right). \quad (7)$$

Откуда для расстояния до места однофазного замыкания получаем [18]:

$$L_K = \frac{\text{Im} \left(\frac{U_\phi}{I_0} \right)}{\text{Im} \left(Z_{\text{уд}} \cdot \frac{I_\phi + kI_0}{I_0} \right)}. \quad (8)$$

В сетях 110 кВ ОМП по алгоритму (8) с током нулевой последовательности в качестве опорного тока имеет методическую погрешность, обусловленную тем, что токи I_0 и I_{0K} не совпадают по фазе из-за комплексности коэффициентов распределения тока. Для снижения методической погрешности Е.А. Аржанниковым [4] и Т. Takagi [19] предлагалось учесть сдвиг по фазе токов I_0 и I_{0K} введением фиксированного угла β и вместо тока I_0 вводить в алгоритм опорный ток $I_0 \cdot e^{j\beta}$. Но так как угол β в алгоритм вводится фиксированный, а при ЗНЗ в сети он зависит от места повреждения, то алгоритм (8) и при введении угла β будет иметь методическую погрешность.

Рассмотрим возможность использования алгоритма (8) для определения расстояния до места ЗНЗ в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью. Для этого найдем фазовые соотношения между током нулевой последовательности в поврежденной линии I_0 и током нулевой последовательности I_{0K} в месте повреждения. Комплексная схема замещения сети 6–35 кВ при однофазном ЗНЗ, содержа-

щая схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, приведена на рисунке 1, а [20].

В комплексной схеме замещения приняты следующие обозначения: $U_{кн}$ — напряжение доаварийного режима в точке замыкания; Z_{K1}, Z_{K2}, Z_{K0} — сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей поврежденной линии до места повреждения; $X_{C1Э}$ и $X_{C2Э}$ — эквивалентные емкостные сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей; $X_{C0НЛ}$ — эквивалентное емкостное сопротивление нулевой последовательности неповрежденных линий; X_{C0} — емкостное сопротивление нулевой последовательности поврежденной линии; R_{Π} — переходное сопротивление.

На рисунке 1, б приведена схема замещения для токов нулевой последовательности, в которой принято, что сопротивления Z_{K1}, Z_{K2}, Z_{K0} поврежденной линии малы по сравнению с емкостными сопротивлениями. Все параметры сети представлены сосредоточенными параметрами. Распределенный характер емкости не учитывается.

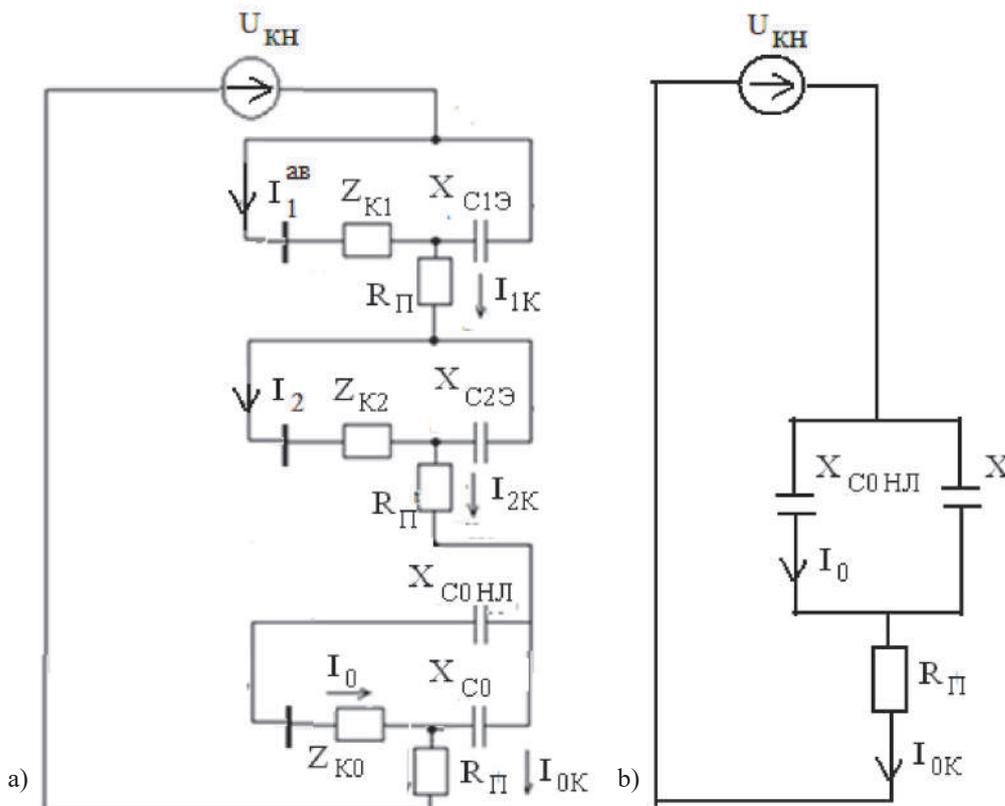


Рисунок 1. Схемы замещения при однофазном ЗНЗ: комплексная (а); для токов нулевой последовательности (б)

Figure 1. Substitution schemes for single-phase earth fault: complex (a); for zero-sequence currents (b)

Из рисунка 1, *b* находим, что токи нулевой последовательности в месте замыкания и в начале поврежденной линии связаны соотношением:

$$I_0 = I_{0K} \cdot \frac{X_{CO}}{X_{CO} + X_{COHL}}$$

Из этого выражения следует, что токи нулевой последовательности I_0 и I_{0K} совпа-

дают по фазе. Следовательно, выражение (6) преобразуется в (7), и алгоритм ОМП (8) будет справедлив для сетей 6–35 кВ при однофазных ЗНЗ.

Структурная схема устройства для ОМП по алгоритму (8) приведена на рисунке 2.

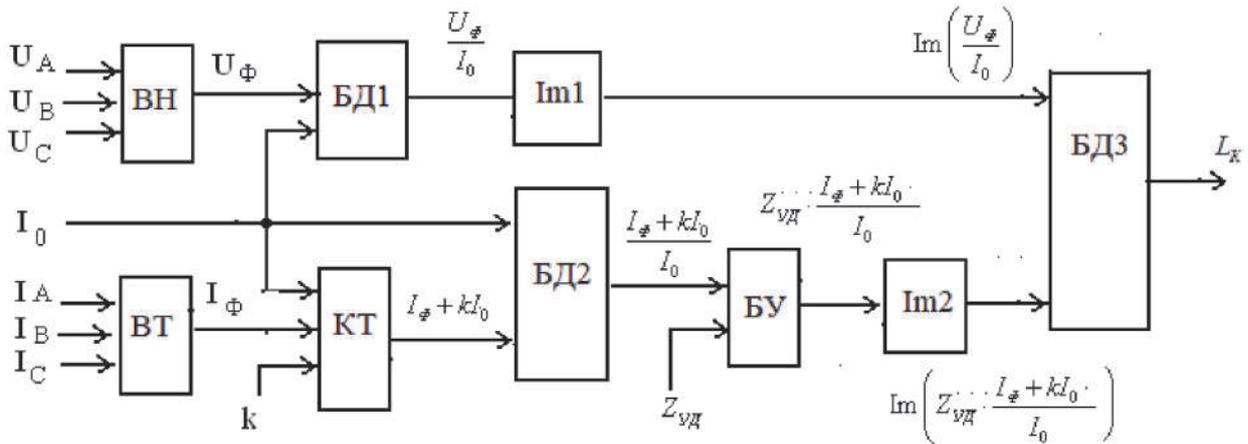


Рисунок 2. Структурная схема устройства для ОМП по алгоритму (7)

Figure 2. Block diagram of the device for determining the location of damage according to the algorithm (7)

К устройству подводятся три фазных напряжения, три фазных тока и ток нулевой последовательности. Входные блоки ВН и ВТ выделяют напряжение U_ϕ и ток I_ϕ поврежденной фазы. Блок КТ формирует компенсированный фазный ток $I_\phi + kI_0$. Параметры контролируемой линии задаются коэффициентом компенсации k и удельным сопротивлением $Z_{вд}$. Блоки БД1, БД2 и БД3 — блоки деления входных величин; Im1 и Im2 — блоки выделения мнимой части. В блоке Im1 формируется мнимая часть комплекса (U_ϕ/I_0) в числителе выражения (8). В блоке Im2 формируется мнимая часть комплекса в знаменателе выражения (8). В блоке деления БД3 выполняется деление числителя на знаменатель выражения (8) и формируется сигнал, пропорциональный расстоянию до места замыкания.

Анализ алгоритмов ОМП. На точность ОМП по алгоритму (8) влияют соответствие расчетного значения коэффициента компенсации k его фактическому значению и погрешности измерения токов и напряжения.

Коэффициент компенсации зависит от соотношения сопротивлений прямой $Z_{1Л}$ и нулевой $Z_{0Л}$ последовательностей линии и определяется по выражению:

$$k = \frac{Z_{0Л} - Z_{1Л}}{Z_{1Л}}$$

Сопротивление нулевой последовательностей линий 6–35 кВ в справочниках не приводится, а достаточно точные формулы для его вычисления для кабельных линий отсутствуют. В большинстве случаев ток нулевой последовательности в сетях 6–35 кВ мал по сравнению с фазным током и значением kI_0 по сравнению с I_ϕ можно пренебречь [15, 16, 21]. Алгоритм ОМП (8) без компенсации фазного тока (при $k = 0$) принимает вид:

$$I_{K.13} = \frac{\text{Im}\left(\frac{U_\phi}{I_0}\right)}{\text{Im}\left(Z_{вд} \cdot \frac{I_\phi}{I_0}\right)} \quad (9)$$

Наибольшее влияние на погрешность ОМП по (8), кроме коэффициента компенсации, оказывает угловая погрешность измерения тока нулевой последовательности. При наличии угловой погрешности измерения тока нулевой последовательности измеренный ток I_0 и ток в месте повреждения I_{0K} не будут совпадать по фазе, и мнимая часть второго слагаемого в выражении (6) не будет равна нулю:

$$\text{Im}\left(\frac{I_{0K}}{I_0} \cdot 3R_H\right) \neq 0 \quad (10)$$

При этом ОМП по алгоритмам (8) и (9) становится зависимым от переходного сопротивления.

Трансформаторы тока нулевой последовательности имеют значительные угловые погрешности. Для измерения тока нулевой последовательности применяются кабельные трансформаторы тока типа ТТНП с коэффициентом трансформации 25/1 или 30/1, угловая погрешность которых достигает 30 электрических градусов. В последние годы разработаны трансформаторы тока нулевой последовательности типа ТЗЛК с повышенным коэффициентом трансформации и с улучшенными характеристиками [22]. На рисунке 3 приведены экспериментальные зависимости угловой погрешности трансформаторов тока ТТНП и ТЗЛК от первичного тока при подключении к реле РТЗ-51 [23].

Из рисунка 3 следует, что при первичном токе больше 5 А угловая погрешность трансформаторов типа ТЗЛК не превышает 2 %.

Однако при токах менее 5 А погрешность увеличивается до 6 %.

При выполнении неравенства (10) алгоритм ОМП принимает вид:

$$I_K = \frac{\text{Im}\left(\frac{U_\Phi}{I_{0П}}\right) - \text{Im}\frac{I_{0К} \cdot 3R_{П}}{I_{0П}}}{\text{Im}\left(Z_{зд} \cdot \frac{I_\Phi + kI_0}{I_{0П}}\right)}, \quad (11)$$

где $I_{0П}$ — измеренное с угловой погрешностью δ значение тока нулевой последовательности I_0 :

$$I_{0П} = I_0 \cdot e^{j\delta}.$$

Модель сети с схемой замещения по рисунку 2 и алгоритм ОМП по (8) с учетом (11) были реализованы в программе Excel. Результаты определения расстояния до места замыкания для электрической сети с суммарным емкостным током 5 А при угловой погрешности измерения тока нулевой последовательности при $\epsilon = 2^\circ$ и фазного тока $0,5^\circ$ приведены в таблице 1.

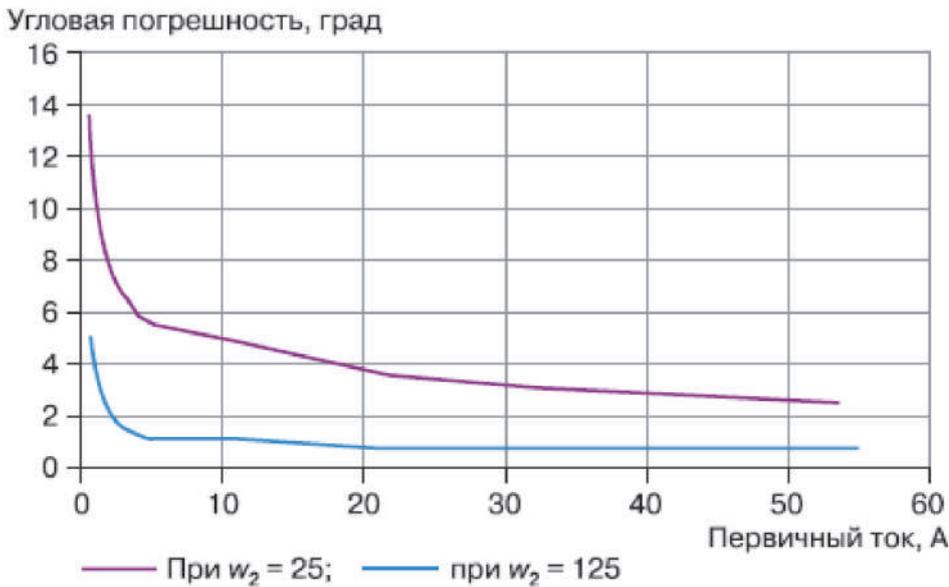


Рисунок 3. Угловые погрешности трансформаторов тока по [23]

Figure 3. Angular errors of current transformers according to [23]

Таблица 1. Результаты исследований ОМП по алгоритму (8)

Table 1. Results of damage location determination studies using algorithm (8)

Фактическое расстояние до места повреждения L_K , км	2	2	2	2	2	
Переходное сопротивление $R_{П}$, Ом	0	10	50	100	500	
Измеренное расстояние по (8) L_K , км, и относительная погрешность, δL_K , %						
Без учета погрешностей измерения токов	2	2	2	2	2	
При угловой погрешности измерения тока нулевой последовательности $\epsilon = 2^\circ$	L_K , км	2,0	2,1	2,1	3,1	13,2
	δL_K , %	0	5	5	55	560
При угловой погрешности измерения тока нулевой последовательности $\epsilon = 2^\circ$ и фазного тока $0,5^\circ$	L_K , км	2,01	2,11	2,53	3,13	13,70
	δL_K , %	0,5	5,5	26,5	56,5	585,0

Как видно из таблицы 1, при измерении токов без погрешностей алгоритм (8) не имеет методической погрешности измерения расстояния до места повреждения как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление, и в этом случае может использоваться для целей ОМП в сетях с изолированной нейтралью. При работе трансформаторов тока с угловой погрешностью нарушается равенство измеренного и фактического расстояний до места повреждения. Влияние угловой погрешности измерения тока нулевой последовательности на ОМП значительно больше, чем влияние угловой погрешности измерения фазного тока.

Для исключения проблемы с угловой погрешностью трансформаторов тока нулевой последовательности в [17, 18] было предложено вместо тока нулевой последовательности использовать в качестве опорного тока разность фазных токов ΔI_ϕ , измеренных до и после замыкания:

$$\Delta I_\phi = I_\phi - I_H,$$

где I_ϕ — фазный ток аварийного режима;

I_H — фазный ток нагрузки предаварийного режима.

Алгоритм ОМП без использования тока нулевой последовательности может быть получен из (9) при замене I_0 на ΔI_ϕ [18]:

$$L_K = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_\phi}{\Delta I_\phi}\right)}{\operatorname{Im}\left(Z_{уд} \cdot \frac{I_\phi}{\Delta I_\phi}\right)}. \quad (12)$$

Угловая погрешность измерения фазных токов существенно меньше, чем тока I_0 , поэтому погрешность ОМП по алгоритму (12) при замыкании через переходное сопротивление, меньше чем по алгоритму (9). Но вследствие отсутствия компенсации фазного тока алгоритм (12) имеет методическую погрешность даже при отсутствии переходного сопротивления. Поэтому при использовании разности фазных токов ΔI_ϕ в качестве

опорного тока вместо I_0 остается необходимость измерения тока I_0 для формирования компенсированного фазного тока. Рассмотрим формирование компенсированного тока, используя для компенсации не ток I_0 , а разность фазных токов ΔI_ϕ . Для этого представим разность токов ΔI_ϕ в виде суммы аварийных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\Delta I_\phi = I_1^{aa} + I_2 + I_0.$$

В месте повреждения симметричные составляющие токов (токи I_{1K} , I_{2K} , I_{0K} через переходное сопротивление на рисунке 1, а) равны. Равенство симметричных составляющих тока примерно выполняется и в начале линии: $I_1^{aa} = I_2 = I_0$. Тогда ток нулевой последовательности будет примерно равен одной трети от ΔI_ϕ . При этом алгоритм (8) для расстояния до места замыкания принимает вид:

$$I_K = \frac{\operatorname{Im}\left(\frac{U_\phi}{\Delta I_\phi}\right)}{\operatorname{Im}\left(Z_{уд} \cdot \frac{I_\phi + k \cdot \Delta I_\phi / 3}{\Delta I_\phi}\right)}. \quad (13)$$

Алгоритм (13) в отличие от (8) свободен от основной проблемы — для своего применения он не требует измерения тока нулевой последовательности, а в отличие от (12) в алгоритме (13) используется компенсация фазного тока. Расчеты по алгоритму (13) без учета и с учетом погрешности измерения фазного тока приведены в таблице 2.

Из сравнения данных таблиц 2 и 1 следует, что при одинаковой угловой погрешности измерения фазных токов ОМП по алгоритму (13) при замыканиях через переходное сопротивление имеет меньшую погрешность по сравнению с ОМП по алгоритму (8). При точном измерении токов оба алгоритма (8) и (13) определяют расстояние до места повреждения без погрешности, как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление.

Таблица 2. Результаты исследований ОМП по алгоритму (13)

Table 2. The results of studies of determining the location of damage by the algorithm (13)

Фактическое расстояние до места повреждения L_K , км	2	2	2	2	2	
Переходное сопротивление R_n , Ом	0	10	50	100	500	
Измеренное расстояние по (8) L_K , км и относительная погрешность, δL_K , %						
Без учета погрешностей измерения токов	2	2	2	2	2	
При угловой погрешности измерения фазного тока $\epsilon = 0,5^\circ$	L_K , км	2,00	2,01	2,05	2,09	2,56
	δL_K , %	0	0,5	2,5	4,5	28,0

Выводы

1. Для целей ОМП при однофазных ЗНЗ в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью можно использовать алгоритм с током нулевой последовательности в качестве опорного тока, разработанный для сетей 110 кВ и основанный на совпадении по фазе токов нулевой последовательности в начале линии и в месте повреждения. Такой алгоритм при однофазных ЗНЗ в сетях 6–35 кВ не имеет методической погрешности, и при отсутствии угловой погрешности измерения тока нулевой последовательности и фазных токов позволяет определять расстояние до места повреждения без влияния переходного сопротивления.

2. Основной проблемой при практическом применении алгоритма с использованием

тока нулевой последовательности в качестве опорного тока в сетях 6–35 кВ является наличие угловой погрешности измерения тока нулевой последовательности.

3. Показано, что при замене опорного тока нулевой последовательности в алгоритме ОМП на разность фазных токов, измеренных до и после повреждения, из алгоритма ОМП исключается ток нулевой последовательности и исчезает основная причина погрешности ОМП. Показано, что при наличии угловой погрешности измерения токов ОМП по алгоритму (13) при замыканиях через переходное сопротивление имеет меньшую погрешность по сравнению с ОМП по алгоритму (8).

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 121 с.

2. Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.

3. Шабанов В.А. Определение места повреждения в распределительных сетях при однофазных замыканиях на землю. Уфа: УГНТУ, 2003. 96 с.

4. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. М.: Энергоатомиздат, 1985. 175 с.

5. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. М.: НТФ «Энергопресс», 1998. 87 с.

6. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоатомиздат, 1982.

7. Арцишевский Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью. М.: Высшая школа, 1989. 87 с.

8. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А. Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования / Под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2009. 162 с.

9. Владимиров Л.В., Ощепков В.А., Суриков В.И. Алгоритм и методика опреде-

ления места повреждения в распределительных сетях электроэнергетических систем методом стоячих волн // Омский научный вестник. 2011. № 1(103). С. 209–211.

10. Шабанов В.А., Мушкин В.В. Представление входного сопротивления линии с распределёнными параметрами сосредоточенным комплексным сопротивлением // Проблемы нефти и газа» (III Конгресс нефтегазопромышленников России). Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. С. 83–86.

11. Hanninen S. Single Phase Earth Faults in High Impedance Ground Networks Characteristics, Indication and Location. Technical Research Center of Finland (VTT), Espoo, Finland, 2001. 78 p.

12. Hanninen S., Lehtonen M. Method for Detection and Location of Very High Resistive Earth Faults // ETEP (European Transactions on Electrical Power), 1999. Vol. 9, No. 5, pp. 285291. <http://www.ETEP.de>.

13. Roberts J., Altuve H.J., Hou D. Review of Ground Fault Protection Methods of Grounded, Ungrounded and Compensated Distribution Systems. <http://www.selmc.com/techpprs/6123.pdf>. (дата обращения: 21.01.2021).

14. Мирошник В.Ю., Багулько Д.В., Ляшков А.А. Методы и алгоритмы для определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6–35 кВ с использованием параметров аварийного режима // Омский научный вестник, 2017.

15. Takagi T., Yamacoshi Y., Baba J., Uemura K., Sakaguchi T. A New Algorithm of an

Accurate Location for EHV/UHV Transmission Line: Part 1 — Fourier Transformation Method // IEEE Trans on Power App & Syst. Vol. PAS. 100, No. 3. March 1981. P. 1316–1323.

16. Takagi T., Yamacoshi Y., Baba J., Uemura K., Sakaguchi T. A New Algorithm of an Accurate Location for EHV/UHV Transmission Line: Part 2 — Laplace Transform Method // IEEE Trans on Power App & Syst. Vol. PAS. 101, No. 3. March 1982. P. 564–753.

17. А.с. № 1432428 СССР. Устройство для определения расстояния до места однофазного короткого замыкания на землю / В.А. Шабанов, Х.Ф. Ахуньянов, А.С. Саухатас. Заявка от 09.03.87. БИ № 39, 1988.

18. Патент № 1661687 СССР. Способ определения расстояния до места однофазного короткого замыкания и устройство для его осуществления / А.С. Саухатас, В.А. Шабанов, И.А. Федотов, В.Н. Аронсон. Заявка от 04.03.86. БИ № 25, 1991.

19. Takagi T., Yamacoshi Y., Yamaura K., Matsushima R.T. K. Development of a New Type Locate Using a One-Terminal Voltage and Current Data // IEEE Trans on Power App & Syst. Vol. PAS. 101, No. 8. August 1982. P. 2892–2898.

20. Шабанов В.А. Симметричные составляющие токов и напряжений при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью. Уфа, 2002. 61 с.

21. Сорокин А.В., Шабанов В.А. Дистанционный метод определения расстояния до однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов»: VI межвуз. сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. С. 193–199.

22. Бадулин Д.Н. Трансформаторы тока нулевой последовательности для использования в схемах релейной защиты совместно с микропроцессорными терминалами релейной защиты (Электронный ресурс). Режим доступа: intzv.ru. (дата обращения 01.08.2020).

23. Шалин А., Дехтерев А., Ильиных М., Сенченко В. Кабельные трансформаторы тока. Способы улучшения характеристик // Новости электротехники. 2008. № 6 (48).

References

1. Likhachev F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu i s kompen-*

satsiei emkostnykh tokov [Earth Faults in Networks with Isolated Neutral and Capacitive Current Compensation]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 121 p. [in Russian].

2. Gel'fand Ya.S. *Releynaya zashchita raspredelitel'nykh setei* [Relay Protection of Distribution Networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 368 p. [in Russian].

3. Shabanov V.A. *Opredelenie mesta povrezhdeniya v raspredelitel'nykh setyakh pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu* [Determination of the Location of Damage in Distribution Networks with Single-Phase Earth Faults]. Ufa, UGNTU Publ., 2003. 96 p. [in Russian].

4. Arzhannikov E.A. *Distantionnyi printsip v releinoi zashchite i avtomatike linii pri zamykaniyakh na zemlyu* [Distance Principle in Relay Protection and Line Automation in Case of Ground Faults]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 175 p. [in Russian].

5. Arzhannikov E.A., Chukhin A.M. *Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi* [Methods and Devices for Determining the Locations of Damage on Power Lines]. Moscow, NTF «Energopress», 1998. 87 p. [in Russian].

6. Shalyt G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh* [Determination of Places of Damage in Electrical Networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. [in Russian].

7. Artsishevskii Ya.L. *Opredelenie mest povrezhdeniya linii elektroperedachi v setyakh s izolirovannoi neutral'yu* [Determination of Places of Damage to Power Lines in Networks with Isolated Neutral]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 87 p. [in Russian].

8. Kulikov A.L., Misrikhanov M.Sh., Petrukhin A.A. *Opredelenie mest povrezhdenii LEP 6-35 kV metodami aktivnogo zondirovaniya* [Determination of Damage Locations of 6–35 kV Power Transmission Lines by Active Sounding Methods]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2009. 162 p. [in Russian].

9. Vladimirov L.V., Oshchepkov V.A., Surikov V.I. *Algoritm i metodika opredeleniya mesta povrezhdeniya v raspredelitel'nykh setyakh elektroenergeticheskikh sistem metodom stoyachikh voln* [Algorithm and Method for Determining the Location of Damage in the Distribution Networks of Electric Power Systems by the method of Standing Waves].

Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin, 2011, No. 1(103), pp. 209–211. [in Russian].

10. Shabanov V.A., Mushkin V.V. Predstavlenie vkhodnogo soprotivleniya linii s raspredelennymi parametrami sosredotochenym kompleksnym soprotivleniem [Representation of the Input Impedance of a Line with Distributed Parameters by a Concentrated Complex Impedance]. *Problemy nefti i gaza (III Kongress neftegazopromyshlennikov Rossii)* [Problems of Oil and Gas (III Congress of the Oil and Gas Producers of Russia)]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2001, pp. 83–86. [in Russian].

11. Hannien S. *Single Phase Earth Faults in High Impedance Ground Networks Characteristics, Indication and Location*. Technical Research Center of Finland (VTT), Espoo, Finland, 2001. 78 p.

12. Hanninen S., Lehtonen M. Method for Detection and Location of Very High Resistive Earth Faults. *ETEP (European Transactions on Electrical Power)*, 1999. Vol. 9, No. 5, pp. 285291. <http://www.ETEP.de>.

13. Roberts J., Altuve H.J., Hou D. *Review of Ground Fault Protection Methods of Grounded, Ungrounded and Compensated Distribution Systems*. <http://www.selmc.com/techpprs/6123.pdf> (accessed 21.01.2021).

14. Miroshnik V.Yu., Bagul'ko D.V., Lyashkov A.A. Metody i algoritmy dlya opredeleniya mesta odnofaznogo замыкания на землю в сетях 6-35 кВ с испол'зованием параметров аварийного режима [Methods and Algorithms for Determining the Location of a Single-Phase Earth Fault in 6-35 kV Networks Using Emergency Mode Parameters]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2017. [in Russian].

15. Takagi T., Yamacoshi Y., Baba J., Uemura K., Sakaguchi T. A New Algorithm of an Accurate Location for EHV/UHV Transmission Line: Part 1 — Fourier Transformation Method. *IEEE Trans on Power App & Syst.* Vol. PAS. 100, No. 3, March 1981, pp. 1316–1323.

16. Takagi T., Yamacoshi Y., Baba J., Uemura K., Sakaguchi T. A New Algorithm of an Accurate Location for EHV/UHV Transmission Line: Part 2 — Laplace Transform Method. *IEEE Trans on Power App & Syst.* Vol. PAS. 101, No. 3, March 1982, pp. 564–753.

17. Shabanov V.A., Ahun'yanov H.F., Sauhatas A.S. *Ustrojstvo dlya opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo korotkogo*

замыкания на землю [Device for Determining the Distance to the Place of a Single-Phase Short Circuit to the Ground]. A.S. SSSR No.1432428. 1988. [in Russian].

18. Sauhatas A.S., Shabanov V.A., Fedotov I.A., Aronson V.N. *Sposob opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo korotkogo замыкания i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for Determining the Distance to the Place of a Single-Phase Short Circuit and a Device for its Implementation]. Patent SSSR No. 1661687. 1991. [in Russian].

19. Takagi T., Yamacoshi Y., Yamaura K., Matsushima R.T. K. Development of a New Type Locate Using a One-Terminal Voltage and Current Data. *IEEE Trans on Power App & Syst.* Vol. PAS. 101, No. 8, August 1982, pp. 2892-2898.

20. Shabanov V.A. *Simmetrichnye sostavlyayushchie tokov i napryazhenii pri odnofaznykh замыканиyakh na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu* [Symmetrical Components of Currents and Voltages for Single-Phase Earth Faults in Networks with Isolated Neutral]. Ufa, 2002. 61 p. [in Russian].

21. Sorokin A.V., Shabanov V.A. Distantionnyi metod opredeleniya rasstoyaniya do odnofaznogo замыкания на землю в сети с izolirovannoi neutral'yu [Remote Method for Determining the Distance to a Single-Phase Earth Fault in a Network with an Isolated Neutral]. *VI mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [VI Interuniversity Collection of Scientific works «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2020, pp. 193-199. [in Russian].

22. Badulin D.N. *Transformatory toka nulevoi posledovatel'nosti dlya ispol'zovaniya v skhemakh releinoi zashchity sovmestno s mikroprotssessornymi terminalami releinoi zashchity* [Zero Sequence Current Transformers for Use in Relay Protection Circuits in Conjunction with Relay Protection Microprocessor Terminals] (Electronic Resource). Available at: intzv.ru (accessed 01.08.2020). [in Russian].

23. Shalin A., Dekhterev A., Il'inykh M., Senchenko V. Kabel'nye transformatory toka. Sposoby uluchsheniya kharakteristik [Cable Current Transformers. Ways to Improve Performances]. *Novosti elektrotekhniki — News of Electrical Engineering*, 2008, No. 6 (48). [in Russian].



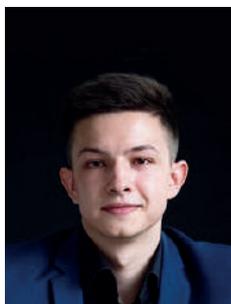
Хазиева Р. Т.
Khazieva R. T.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электротехника и
электрооборудование предприятий»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Кириллов Р. В.
Kirillov R. V.

*доцент кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Низамов М. О.
Nizamov M. O.

*студент кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Соловьев Б. А.
Soloviev B. A.

*студент кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 620.92

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-44-54

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Актуальность

Солнце способно передавать на Землю колоссальное количество энергии в виде излученного тепла. Ученые нашли способ собирать этот вид энергии и перерабатывать его в электрическую. Для этого используются специальные кремниевые фотоэлектрические панели, способные под действием внешнего солнечного возбудителя генерировать постоянный ток, благодаря которому возможно питание небольшой энергетической системы. Эти панели соединяют между собой таким образом, чтобы обеспечивать максимальную мощность выработки энергии. Совокупность энергетических панелей, объединенных в систему, называют солнечной электростанцией, на данный момент одним из самых перспективных вариантов электростанций. Солнечные электростанции — достаточно уникальный вид электрогенераторов, способных вырабатывать энергию, не затрачивая практически никакого внутреннего топлива, такого как органика, притоки воды, энергия волн, геотермальная энергия. Всего за 20 дней солнцестояния солнечные электростанции способны полностью возобновить весь мировой запас энергии. Всего за год непрерывной работы солнца оно сможет воссоздать всю энергию, которую человечество потратило за всю свою историю, а возможно даже больше.

Фотоэлектрическая установка — это универсальный источник, используемый для генерации и распределения в энергетических системах. Проблема нехватки электроэнергии в развивающихся странах может быть решена благодаря использованию альтернативной энергии, так как за 300 дней или 3000 ч от солнца можно получить энергию, эквивалентную 5000 трлн кВт·ч.

Цели исследования

Смоделировать и запустить рабочую схему автономной фотоэлектрической установки для преобразования солнечной энергии в электрический ток потребителям, рассчитать и вывести на диаграммы значения параметров токов как на выпрямителе, так и на нагрузке, а также параметры выходных и входных напряжений выпрямителя, как и нагрузки.

Методы исследования

Была построена модель в пакете MATLAB Simulink, состоящая из блоков системы выпрямителя, инвертора, который преобразует энергию солнца в ток нужного параметра — переменный для бытовой сети, можно ставить несколько таких устройств (как и контроллеров) — система будет стабильнее, а также аккумуляторной батареи или блоков бесперебойного питания — это обязательная часть, с ними энергия будет накапливаться и расходоваться соответственно нуждам потребителя, сети, но есть еще одна из главных функциональных частей СЭС — это СБ-панели со специальным покрытием, они притягивают, задерживают, аккумулируют и концентрируют солнечный свет, тепло, передают его дальше для преобразования в электрическую энергию.

Результаты

В ходе работы было произведено моделирование фотоэлектрической установки, получены различные зависимости напряжения и тока, а также графики зависимости напряжения и тока на нагрузке. На основе полученных данных были определены технические характеристики аккумуляторных и солнечных батарей, вследствие чего сделаны выводы о наиболее эффективной фотоэлектрической установке.

Ключевые слова: солнечная электростанция, фотоэлектрическая установка, солнечная энергетика, промышленная частота.

MODELING AN AUTONOMOUS SOLAR POWER PLANT

Relevance

The sun is capable of transmitting an enormous amount of energy to Earth in the form of radiated heat. Scientists have found a way to collect this type of energy and convert it into electrical energy. For this, special silicon photovoltaic panels are used, capable of generating a direct current under the action of an external solar exciter, thanks to which a large energy system can be powered. These panels are bonded together to provide maximum power generation. The set of energy panels combined into a system is called a solar power plant, at the moment one of the most promising options for power plants. Solar power plants are a rather unique type of power plants that can bring energy, spending practically no internal fuel, such as organic matter, water inflows, wave energy, geothermal energy. In just 20 days of the solstice, solar power plants are able to fully renew the entire world energy supply. In just a year of continuous operation of the sun, it will be able to recreate all the energy that humanity has spent in its entire history, and perhaps even more.

A photovoltaic plant is a versatile source used for generation and distribution in power applications. With more than 300 days providing 3,000 h of sunshine and a capacity equivalent to 5,000 trillion kWh, it becomes necessary to analyze alternative energy to solve the problems of electricity shortages in developing countries. Its geographic location and global advances in solar technology, on the other hand, make it possible to tackle the country's limited energy supply.

The aims of research

Modeling and running a working circuit of an autonomous photovoltaic installation for converting solar energy into electric current to consumers, calculating and plotting the values of the current parameters both at the rectifier and at the load, as well as the parameters of the output and input voltages of the rectifier, as well as the load.

Methods

A model was built in the MATLAB Simulink package, consisting of blocks of a rectifier system, an inverter that converts solar energy into a current of the desired parameter — variable for the household network, you can put several such devices (as well as controllers) — the system

will be more stable, as well as a battery or uninterruptible power supply units — this is a mandatory part, with them energy will be accumulated and consumed according to the needs of the consumer, the network, but there is another one of the main functional parts of the SES — these are SB panels with a special coating, they attract, delay, accumulate and concentrate sunlight, heat, pass it on for conversion to electrical energy.

Results

In the course of the work, the photovoltaic installation was simulated, various voltage and current graphs were obtained, as well as graphs of dependence on the load. On the basis of the data obtained, the technical characteristics of storage batteries and solar cells were selected, after which conclusions were drawn about the most effective photovoltaic installation.

Keywords: solar power plant, photovoltaic plant, solar energy, industrial frequency.

В настоящее время наиболее актуальными являются малые автономные фотоэлектрические установки, способные обеспечить электроэнергией сельские, удалённые от городов, районы страны (рисунок 1) [1].

Автономная солнечная электростанция имеет невысокую стоимость, основная часть затрат уходит на аккумуляторы, которые

составляют 59 % от стоимости, 35 % от стоимости составляют другие элементы: панели, инвертор, контроллер и 5 % — остальные материалы [2]. Схема автономной фотоэлектрической установки (ФЭУ) приведена на рисунке 2. Она содержит фотоэлектрический PV-модуль, основная функция которого это преобразование солнечной энергии в элек-

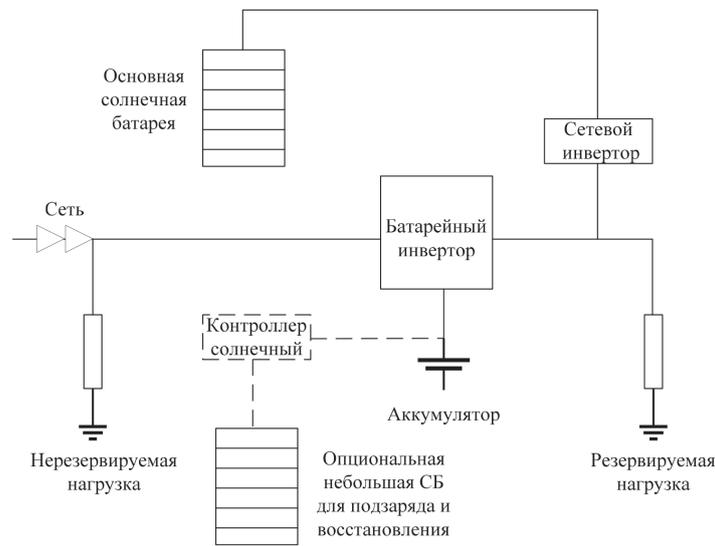


Рисунок 1. Фотоэлектрическая система электроснабжения с сетевым инвертором на выходе

Figure 1. Photovoltaic power supply system with grid-connected inverter at the output

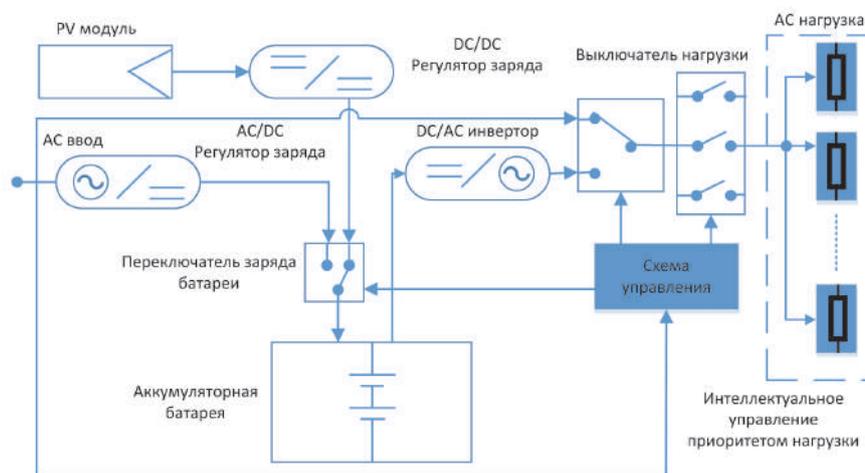


Рисунок 2. Блок-схема ФЭУ

Figure 2. Block diagram of the PVP

трический ток; также схема содержит такие элементы, как инвертор и регуляторы заряда, обеспечивающие корректную и стабильную работу солнечных батарей; помимо предыдущих элементов в работе участвуют аккумуляторная батарея, переключатель заряда батареи, выключатели нагрузки, сама схема управления и АС нагрузка с интеллектуальным *smart*-управлением [3].

Обзор схемного решения солнечной электростанции

Обобщенная модель фотоэлемента изображена на рисунке 3. Источник тока представляет собой фототок, который зависит от интенсивности излучения, диод D описывает ток, протекающий через неидеальный p - n -переход фотоэлемента [4].

В модель включены паразитные параметры структуры фотоэлемента: последовательное сопротивление и параллельное сопротивление.

Достоинства схемы:

- возможность использования энергии солнца как при наличии сети, так и во время отключений;
- высокий КПД за счет применения сетевых инверторов;
- аккумуляторы все время находятся в заряженном состоянии и практически работают в буферном режиме и используются только при отключении сети и отсутствии солнечной энергии.

В работе [5] солнечные модули подключены только к батарее, поэтому питание от солнечной системы не может питать нагрузку без прохождения через батарею. Поскольку батарею в системе источника бесперебойного питания (ИБП) необходимо держать на полной зарядке, это означает, что солнечные панели используются только для восстановления полной зарядки батарейного блока

после сбоя питания (что во многих европейских странах встречается редко) [6, 7]. Пока батарея полностью заряжена, солнечные батареи не используются. Это является основным отличием от этого исследования, так как система предназначена для того, чтобы всегда отдавать приоритет использованию энергии от солнечных модулей, чтобы минимизировать стоимость электроэнергии из электросети [8–11]. Поскольку управление нагрузкой отделено от ИБП, система, предложенная нами, основана на автономном управлении, и, следовательно, нет необходимости в центральной системе управления.

Моделирование солнечной электростанции

Была построена модель в пакете MATLAB Simulink (рисунок 4), состоящая из блоков системы выпрямителя, инвертора, который преобразует энергию солнца в ток нужного параметра — переменный для бытовой сети, можно ставить несколько таких устройств (как и контроллеров) — система будет стабильнее, а также аккумуляторной батареи или блоков бесперебойного питания — это обязательная часть, с ними энергия будет накапливаться и расходоваться соответственно нуждам потребителя, сети; но есть еще одна из главных функциональных частей СЭС — это СБ-панели со специальным покрытием, они притягивают, задерживают, аккумулируют и концентрируют солнечный свет, тепло, передают его дальше для преобразования в электрическую энергию [12–15].

Моделирование состоит из четырех основных компонентов: АС-DC преобразователь переменного тока в постоянный, батарея, DC-DC преобразователь постоянного тока и нагрузка [16, 17].

В этой схеме применен высокоэффективный сетевой инвертор, то есть его отличие от

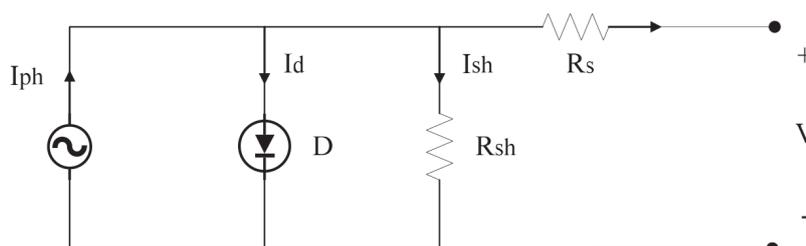


Рисунок 3. Обобщенная модель фотоэлемента

Figure 3. Generalized photocell model

других состоит в том, что при падении (исчезновении) напряжения при отключении сети солнечные батареи продолжают питать резервируемую нагрузку и заряжать аккумуляторы, при этом КПД преобразования инвертора очень высокий — более 90–95 % [18–21]. Если нагрузка потребляет меньше, чем вырабатывают солнечные батареи, излишки энергии пойдут на заряд аккумуляторов, а если больше, то энергия будет потребляться из сети.

После того, как аккумуляторы полностью зарядятся, возможны два варианта:

1. ББП — блок бесперебойного питания или батарейный инвертор — даст сигнал на выключение сетевого инвертора, и он оста-

нется выключенным, пока напряжение на АКБ не снизится до определенного уровня [22].

2. При использовании сетевых инверторов совместно с ББП произойдет постепенное снижение мощности инвертора от напряжения на АКБ [23].

Модель тиристорного двухполупериодного выпрямителя с полным контролем угла показан на рисунке 5 [24].

На рисунке 6 показана диаграмма входного и выходного напряжения на выпрямителе, входная характеристика представляет из себя синусоиду по амплитудному значению от 0 до 220 В, в то время как амплитуда выходной характеристики от 0 до 230 В и нами замечены периодические паузы в течение $t = 0,004$ с.

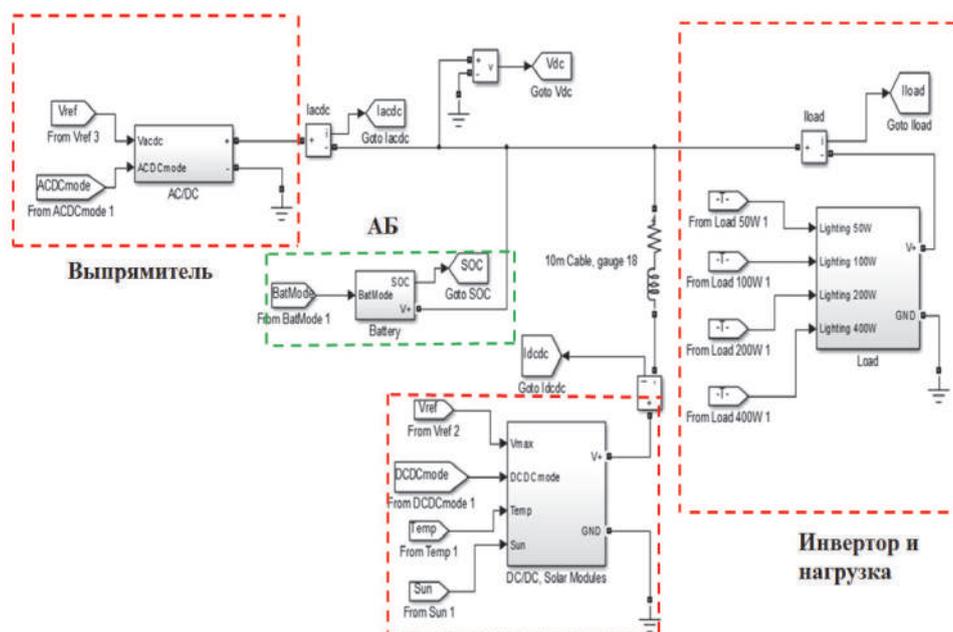


Рисунок 4. Модель ФЭУ в Simulink

Figure 4. PVP model in Simulink

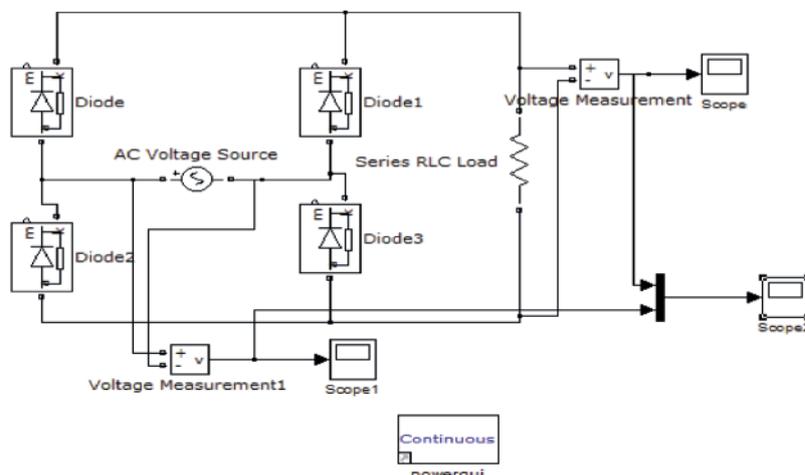


Рисунок 5. Модель тиристорного двухполупериодного выпрямителя с полным контролем угла

Figure 5. Model of a thyristor full-wave rectifier with full angle control

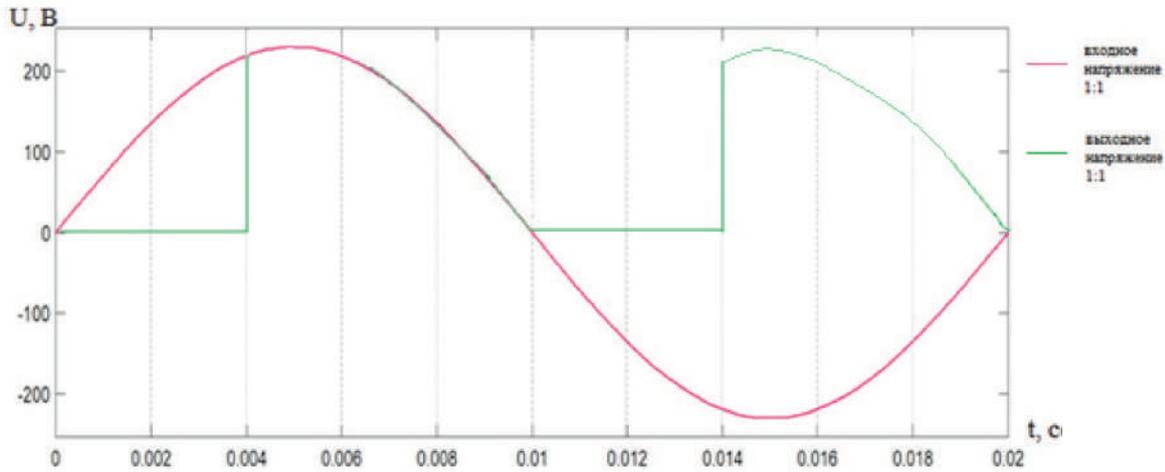


Рисунок 6. Графики входного и выходного напряжений выпрямителя
Figure 6. Rectifier input and output voltage graphs

На рисунке 7 наблюдается процесс изменения выходного тока выпрямителя, где происходит увеличение и последующее уменьшение до 0 А выходного тока с амплитудой от 0 до 0,57 А, но с паузами через $t = 0,004$ с.

Как видно из графиков, приведенных на рисунках 6 и 7, характер зависимостей отражает физическую картину изменения энергетических характеристик во времени, что существенно для анализа и оптимизации в требуемых режимах работы.

Подбор инвертора

Входное напряжение инвертора принимается равным напряжению системы [25]:

$$U_{\text{инв.вход}} = U,$$

где $U_{\text{инв.вход}}$ — входное напряжение инвертора, В;

U — напряжение системы, В.

Мощность инвертора берется равной нагрузке, увеличенной на 15–25 %:

$$P_{\text{инв}} = P_{\text{сдс}} \cdot n \cdot k_{\text{инв}},$$

где $P_{\text{инв}}$ — мощность инвертора, Вт;

$P_{\text{сдс}}$ — мощность, потребляемая одним прибором, Вт;

n — общее количество приборов, шт.;

$k_{\text{инв}}$ — коэффициент запаса инвертора, обычно равен 1,2.

На рисунке 8 смоделирована рабочая схема АКБ, расчет емкости производится [26]:

$$C = \frac{P_{\text{полн}} \cdot d}{k_{\text{разр}} \cdot k_{\text{темп}}},$$

где C — полная емкость батареи, А·ч;

$P_{\text{полн}}$ — полная нагрузка, А·ч/сут;

d — число дней автономного электроснабжения;

$k_{\text{разр}}$ — глубина разряда аккумулятора;

$k_{\text{темп}}$ — температурный коэффициент аккумулятора.

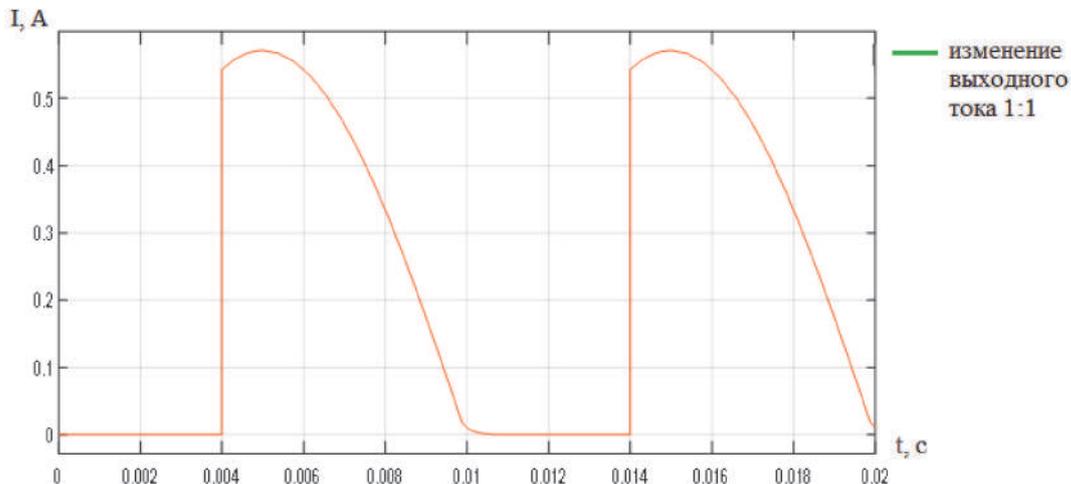


Рисунок 7. Выходной ток выпрямителя
Figure 7. Rectifier output current

Оптимальная емкость должна удовлетворять условию

$$P_{\text{акк}} = P_{\text{ФЭП}},$$

где $P_{\text{ФЭП}}$ — мощность потребляемая системой освещения.

График изменения напряжения на нагрузке показан на рисунке 9. На рисунке 10 приведен график изменения тока на нагрузке от времени.

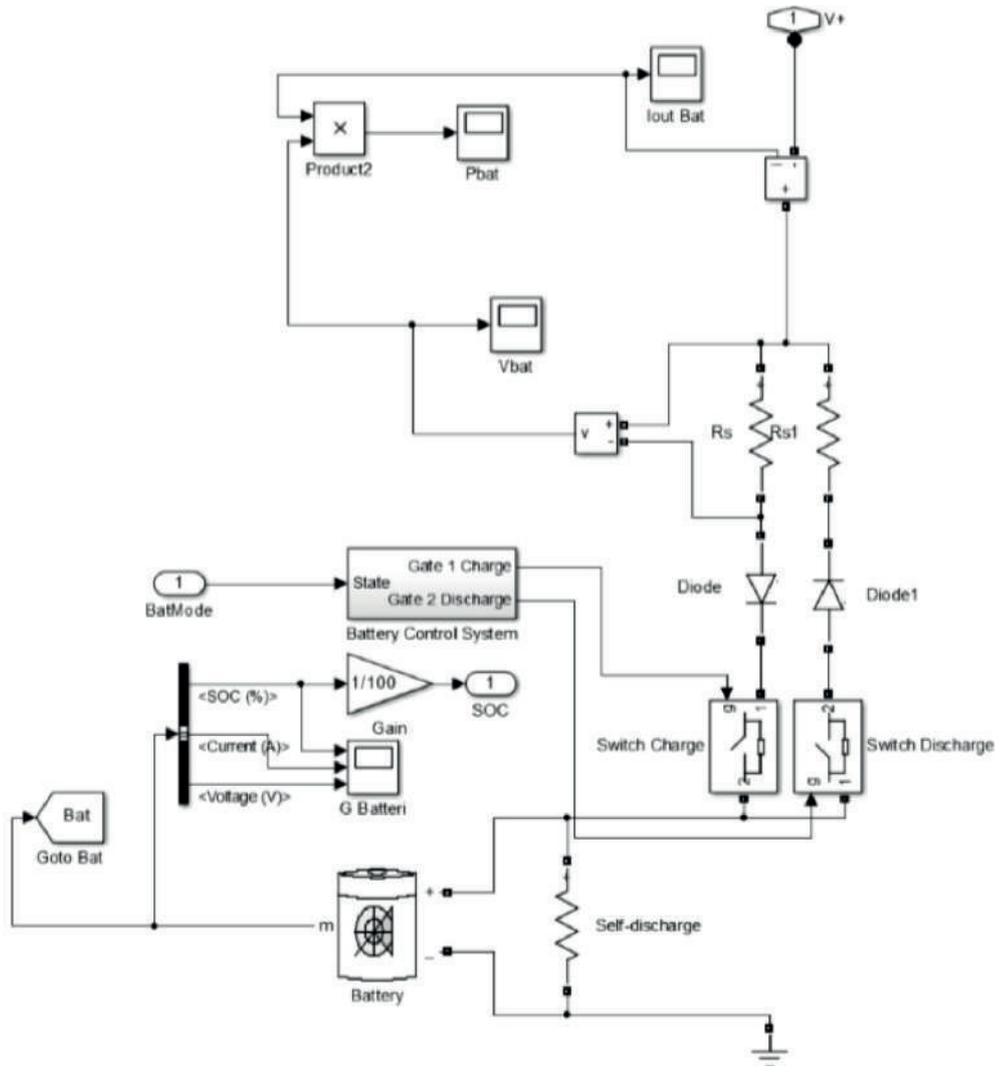


Рисунок 8. Модель АКБ в Simulink

Figure 8. Battery model in Simulink

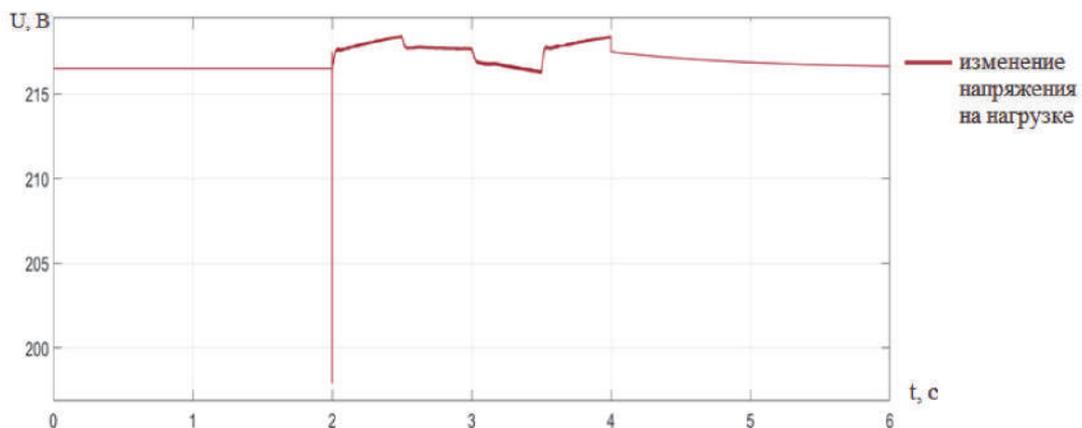


Рисунок 9. График изменения напряжения на нагрузке

Figure 9. Graph of voltage change across the load

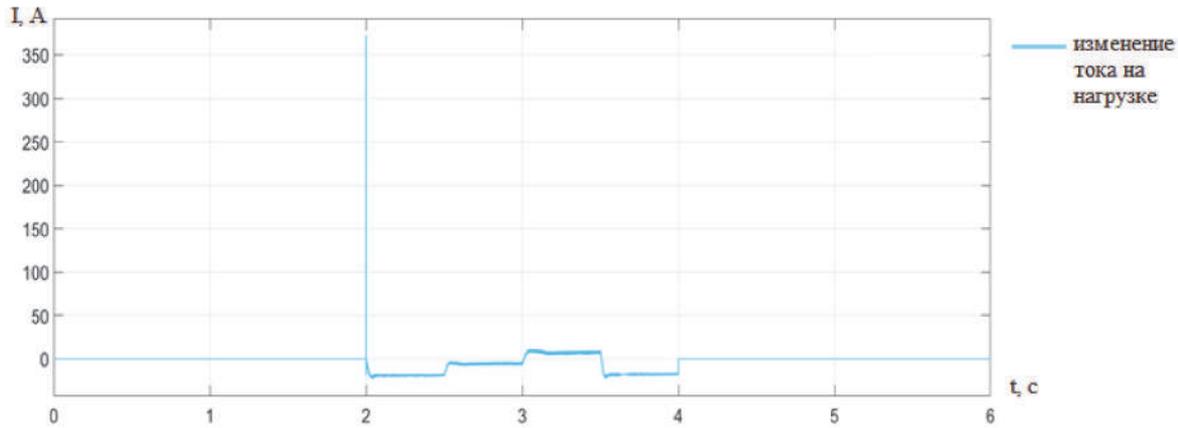


Рисунок 10. Значение тока от времени на нагрузке

Figure 10. Current value versus time at the load

Суммарный ток системы солнечного электроснабжения [27]:

$$I = N_{\text{ФЭП парал}} \cdot I_{\text{ном}} ,$$

где I — суммарный ток системы, А;

$N_{\text{ФЭП парал}}$ — количество соединенных цепочек ФЭП, шт.;

$I_{\text{ном}}$ — номинальный ток одной солнечной батареи, А.

Количество цепочек рассчитаем по формуле:

$$N_{\text{ФЭП парал}} = \frac{N_{\text{ФЭП}}}{N_{\text{ФЭП послед}}} ,$$

где $N_{\text{ФЭП}}$ — общее количество панелей, шт.;

$N_{\text{ФЭП послед}}$ — число цепочек, соединенных последовательно, шт.

Количество требуемых преобразователей:

$$N_{\text{ФЭП}} = \frac{P_{\text{ФЭП}}}{\eta_{\text{ФЭП}} * E * S * \eta_{\text{тепл}}} ,$$

где $P_{\text{ФЭП}} = 1,2 \cdot P_{\text{полн.сист}}$ — потребляемая мощность, Вт·ч/сут;

$\eta_{\text{ФЭП}}$ — КПД фотоэлектрического модуля;

E — среднемесячный приход радиации, Вт·ч/мес.;

S — площадь фотоэлектрического модуля,

$\eta_{\text{тепл}}$ — тепловой коэффициент фотоэлектрического модуля, учитывает потери при нагреве ФЭП.

Список литературы

1. Ланин В.А. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств // Технологии в электронной промышленности. 2007. С. 65.
2. Markvart T., Castaner L. Practical Handbook of Photovoltaics Fundamental and Applications. Oxford Elsevier ltd, 2003. P. 1015.

Анализ результатов

Была смоделирована автономная фотоэлектрическая система по параметрам напряжения, тока фотоэлектрических модулей, хорошо согласующихся с экспериментальными данными. Также по итогам моделирования была рассчитана площадь солнечной батареи (СБ) на основе равенства средней мощности нагрузки и средней удельной мощности СБ $S_{\text{СБ}} = 8,25 \text{ м}^2$. В основе идеальной модели $S_{\text{СБ}} = 8,82 \text{ м}^2$ и по характеристикам рыночной солнечной электростанции $S_{\text{СБ}} = 9,3 \text{ м}^2$.

Для подбора ёмкости аккумуляторных батарей (АБ) были рассчитаны три варианта: по зарядному току, по разрядному току и по энергобалансу. Был выбран вариант с наибольшей номинальной ёмкостью АБ.

На основе технических характеристик СБ и АБ рекомендована наиболее результативная ФЭУ по следующим показателям: имеющая гелевую аккумуляторную батарею с допустимой максимальной глубиной разряда до 80 %, а также обладающая солнечным элементом *C-Si*, как имеющая минимальный температурный коэффициент по напряжению.

3. Белов М.П., Нтавухоракомейе Н. Техническая методика расчет мощности солнечных электростанции в тропическом климате как в Республике Бурунди // ИЗВЕСТИЯ СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 8. С. 66–74.

4. Einstein A. Concerning an Heuristic Point of View toward the Emission and Transformation of Light // *Annalen der Physik* 17. 1905. С. 132.

5. Tiwari G.N., Dubey S. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2009. P. 121.
6. Жуков Г.Ф. Общая теория энергии // Технологии в электронной промышленности. 1995. С. 11–25.
7. Видяпин В.И., Журавлева Г.П. Физика // Общая теория. 2005. С. 166–174.
8. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы: учеб. пособие для студентов средних и высших учебных заведений. М.: Изумруд, 2003. 224 с.
9. Power Rehabilitation and Energy Project // Report No. 6834-So. 1997. No. 5. P. 3.
10. Reve magazine [Электронный ресурс]. URL: <https://www.evwind.es> (дата обращения: 08.12.2019).
11. Используются мировые базы данных «METEONORM» [Электронный ресурс]. URL: <https://meteonorm.com/en> (дата обращения 02.03.2020).
12. World Data Information [Электронный ресурс]. URL: <https://worlddata.info> (дата обращения: 02.03.2020).
13. Белгородский институт альтернативной энергетики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.altenergo-nii.ru> (дата обращения: 02.03.2020).
14. International Energy Agency (IEA). Cities are at the frontline of the Energy Transition [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/september/cities-are-at-the-frontline-of-the-energy-transition.html>. (дата обращения: 08.12.2019).
15. Florida R. The Economic Power of Cities Compared to Nations, CityLab [Электронный ресурс]. URL: <https://www.citylab.com/life/2017/03/the-economic-power-of-global-cities-compared-to-nations/519294>.
16. Wind Power, Solar Power, Diesel Power. Comparison. Uprise Energy, Technical Article [Электронный ресурс]. URL: <http://upriseenergy.com/blog/2012/9/15/wind-power-vs-diesel-power-vs-solar-power-comparison>. (дата обращения: 08.12.2019).
17. United Nations Environment Programme (UN Environment), Cities and Climate Change [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/cities-and-climate-change>, (дата обращения: 03.05.2019).
18. IRENA, Renewable Energy in District Heating and Cooling [Электронный ресурс]. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Mar/IRENA_REmap_DHC_Report_2017.
19. Austrian Biomass Association, Bioenergy in Austria — A Factor Creating Added Value [Электронный ресурс]. URL: http://www.aebiom.org/wpcontent/uploads/2016/10/Folder_Bioenergy_in_Austria_AA-5.pdf.
20. ICLEI — Local Governments for Sustainability, ICLEI 100 % RE Cities and Regions Network Leaders, [Электронный ресурс]. URL: https://iclei.org/en/Meet_the_cities_and_regions.html (дата обращения: 05.05.2019).
21. Project Information Document/ Integrated Safeguard Data Sheet (PID/ISDS)/The World Bank. Режим доступа: <http://documents.worldbank.org/curated/en/575751525514611360/pdf/Concept-Project-Information-Documents-Integrated-Safeguards-Data-Sheet-Somali-Electricity-Access-Project-P165497.pdf>.
22. Dittrich Th. Materials Concepts for Solar Cells Helmholtz Center Berlin for Materials and Energy. Germany, April 2018. P. 8–11.
23. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. М.: ДМК Пресс, 2011. 144 с.
24. MATLAB exponent. Simulink [Электронный ресурс]. URL: <https://matlab.ru/products/simulink> (дата обращения 25.10.2018)
25. Велькин В.И., Завьялов А.С., Стариков Е.В. Расчет автономной фотоэлектрической системы электроснабжения для резервирования собственных нужд АЭС: методические указания к выполнению курсового проекта. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УРФУ, 2014. 25 с.
26. Waffenschmidt E. Direct Current (DC) Supply Grids for LED Lighting // LED Professional. 2015. No. 48. P. 12.
27. Aldo V. Da Rosa. Fundamentals of Renewable Energy Processes. London: Elsevier Inc, 2009. 818 p.

References

1. Lanin V.A. Vysokochastotnyi elektromagnitnyi nagrev dlya paiki elektronnykh ustroystv [High-Frequency Electromagnetic Heating for Soldering Electronic Devices].

- Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti* [Technologies in the Electronic Industry]. 2007. P. 65. [in Russian].
2. Markvart T., Castaner L. *Practical Handbook of Photovoltaics Fundamental and Applications*. Oxford Elsevier Ltd, 2003. P. 1015.
 3. Belov M.P., Ntawuhorakomeye N. Tekhnicheskaya metodika raschet moshchnosti solnechnykh elektrostantsii v tropicheskom klimate kak v Respublike Burundi [Technical Method of Calculating Power of Solar Power Plants in Tropical Climates as in the Republic of Burundi]. *Izvestiya SPBGETU LETI*, 2019, No. 8, pp. 66–74. [in Russian].
 4. Einstein A. Concerning an Heuristic Point of View toward the Emission and Transformation of Light. *Annalen der Physik* 17. 1905, pp. 132.
 5. Tiwari G.N., Dubey S. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2009. P. 121.
 6. Zhukov G.F. Obshchaya teoriya energii [General Theory of Energy]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti — Technologies in the Electronics Industry*, 1995, pp. 11–25. [in Russian].
 7. Vidyapin V.I., Zhuravleva G.P. Fizika [Physics]. *Obshchaya teoriya* [General Theory]. 2005, pp. 166–174. [in Russian].
 8. Khrustalev D.A. *Akkumulyatory: ucheb. posobie dlya studentov srednikh i vysshikh uchebnykh zavedenii* [Accumulators: Textbook for Students of Secondary and Higher Educational Institutions]. Moscow, Izumrud Publ., 2003. 224 p. [in Russian].
 9. Power Rehabilitation and Energy Project. *Report No. 6834-So*. 1997. No. 5. P. 3.
 10. *Reve Magazine* [Electronic Resource]. URL: <https://www.evwind.es> (accessed 08.12.2019).
 11. *Ispol'zovany mirovye bazy dannykh «METEONORM»* [Electronic Resource]. URL: <https://meteonorm.com/en> (accessed 02.03.2020).
 12. *World Data Information* [Electronic Resource]. URL: <https://worlddata.info> (accessed 02.03.2020).
 13. *Belgorodskii institut al'ternativnoi energetiki* [Electronic Resource]. URL: <http://www.altenergo-nii.ru> (accessed 02.03.2020). [in Russian].
 14. *International Energy Agency (IEA). Cities are at the frontline of the Energy Transition* [Electronic Resource]. URL: <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/september/cities-are-at-the-frontline-ofthe-energy-transition.html> (accessed 08.12.2019).
 15. *Florida R. The Economic Power of Cities Compared to Nations, CityLab* [Electronic Resource]. URL: <https://www.citylab.com/life/2017/03/the-economic-power-of-global-cities-compared-to-nations/519294>.
 16. *Wind Power, Solar Power, Diesel Power. Comparison. Uprise Energy, Technical Article* [Electronic Resource]. URL: <http://upriseenergy.com/blog/2012/9/15/wind-power-vs-diesel-power-vs-solar-power-comparison> (accessed 08.12.2019).
 17. *United Nations Environment Programme (UN Environment), Cities and Climate Change* [Electronic Resource]. URL: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/cities-andclimate-change> (accessed 03.05.2019).
 18. *IRENA, Renewable Energy in District Heating and Cooling* [Electronic Resource]. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Mar/IRENA_REmap_DHC_Report_2017.
 19. *Austrian Biomass Association, Bioenergy in Austria — A Factor Creating Added Value* [Electronic Resource]. URL: http://www.aebiom.org/wpcontent/uploads/2016/10/Folder_Bioenergy_in_Austria_AA-5.pdf.
 20. *ICLEI — Local Governments for Sustainability, ICLEI 100 % RE Cities and Regions Network Leaders* [Electronic Resource]. URL: https://iclei.org/en/Meet_the_cities_and_regions.html (accessed 05.05.2019).
 21. *Project Information Document/ Integrated Safeguard Data Sheet (PID/ISDS)/The World Bank*. Available at: <http://documents.worldbank.org/curated/en/575751525514611360/pdf/Concept-Project-Information-Documents-Integrated-Safeguards-Data-Sheet-Somali-Electricity-Access-Project-P165497.pdf>.
 22. Dittrich Th. *Materials Concepts for Solar Cells* Helmholtz Center Berlin for Materials and Energy. Germany, April 2018. P. 8–11.
 23. Kashkarov A.P. *Vetrogenerator, solnechnye batarei i drugie poleznye konstruksii* [Wind Turbines, Solar Panels and Other Useful

Structures]. Moscow, DMK Press Publ., 2011. 144 p. [in Russian].

24. MATLAB Exponent. Simulink [Electronic Resource]. URL: <https://matlab.ru/products/simulink> (accessed 25.10.2018).

25. Vel'kin V.I., Zav'yalov A.S., Starikov E.V. Raschet avtonomnoi fotoelektricheskoi sistemy elektrosnabzheniya dlya rezervirovaniya sobstvennykh nuzhd AES: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu kursovogo proekta [Calculation of an Autonomous Photovoltaic

Power Supply System for Backing up the Own Needs of a Nuclear Power Plant: Guidelines for the Implementation of the Course Project]. Ekaterinburg: FGAOU VPO URFU, 2014. 25 p. [in Russian].

26. Waffenschmidt E. Direct Current (DC) Supply Grids for LED Lighting. LED Professional, 2015, No. 48, pp. 12.

27. Aldo V. Da Rosa. Fundamentals of Renewable Energy Processes. London, Elsevier Inc, 2009. 818 p.

**Юдинцев А. Г.****Yudin A. G.**

кандидат технических наук, директор
Научно-исследовательского института
автоматики и электромеханики,
ФГБОУ ВО «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»,
г. Томск, Российская Федерация

УДК 621.314

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-55-64

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ИМИТАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Актуальность

Освоение космического пространства с помощью автоматических космических аппаратов — спутников различного назначения, аппаратов исследования дальнего космоса, насчитывает не одно десятилетие. При этом, даже на современном уровне надёжности, космические аппараты выходят из строя, не достигнув запланированного конца срока активного существования. Базовую часть, так называемую платформу космического аппарата, как правило, составляют его жизнеобеспечивающие системы: система терморегулирования, система ориентации, двигательная система, бортовой вычислительный комплекс управления. Сбой в работе каждой из них приводит к нештатной ситуации на борту, но достаточно выхода из строя любой части системы электроснабжения, чтобы аппарат в итоге оказался полностью неработоспособным. В связи с этим система электроснабжения космического аппарата должна подвергаться тщательной наземной проверке, проходить несколько стадий испытаний, от автономных до итоговых в составе космического аппарата. С целью подтверждения прогнозируемой надёжности и работоспособности системы электроснабжения космического аппарата в наземных условиях должны быть смоделированы номинальные и предельные режимы её работы. Но, в силу очевидных причин, применение в наземных условиях бортовых солнечной и аккумуляторной батарей, а также всего комплекса служебной и полезной электрических нагрузок является трудновыполнимым и малоэффективным. Поэтому с целью проведения полноценной наземной экспериментальной отработки применяют особый класс контрольно-проверочной аппаратуры — аппаратно-программные комплексы, имитирующие режимы работы системы электроснабжения, состоящие из имитаторов солнечной, аккумуляторной батарей и бортовой электрической нагрузки, автоматизированных систем контроля соединений, зарядно-разрядных устройств бортовых аккумуляторных батарей.

Цели исследования

Провести анализ состояния систем электроснабжения космических аппаратов и контрольно-проверочной аппаратуры для проведения их наземных испытаний. Проанализировать структуры имитаторов для моделирования эксплуатационных режимов работы систем электроснабжения космических аппаратов в наземных условиях.

Методы исследования

Для достижения поставленных целей в статье используются методы системного анализа, теоретических основ электротехники и теории автоматического управления.

Результаты

Проведён анализ систем электроснабжения автоматических космических аппаратов, созданных за последние 20 лет, используя данные передовых отечественных предприятий. Сформулированы основные требования, предъявляемые к современным комплексам имитации систем электроснабжения космических аппаратов. Проанализированы возможные варианты структурной реализации имитаторов элементов систем электроснабжения, автоматизированного испытательного комплекса имитации, построенного на их основе, выявлены их основные достоинства и недостатки.

Ключевые слова: система электроснабжения космического аппарата, наземные испытания, контрольно-проверочная аппаратура, имитатор аккумуляторной батареи, имитатор солнечной батареи, имитатор нагрузки.

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEXES FOR SIMULATING SPACECRAFT POWER SUPPLY SYSTEMS

Relevance

Space exploration via automatic spacecraft, namely multi-purpose satellites and deep space exploration vehicles, has been going on for more than one decade. At the same time, spacecraft fail before reaching the planned active life-cycle time despite the high level of modern spacecraft reliability. The basic part of the spacecraft (the so-called platform) consists of its life-supporting systems: a thermal control system, a positioning system, a propulsion system, and an onboard computer control complex. Failure of any element listed above leads to an abnormal situation onboard. However, the failure of any part of the power supply causes the spacecraft to become completely inoperative. In this regard, the power supply of the spacecraft must undergo a thorough ground testing, divided into several stages. First, autonomous parts of the spacecraft should be tested separately. Then all the parts are combined in a single complex and are tested within the structure of the spacecraft. In order to confirm the predicted reliability and operability of the spacecraft power supply, the rated and limiting modes of its operation should be simulated under conditions of ground testing. Unfortunately, due to a number of reasons, the ground testing of on-board solar and storage batteries is hard to perform and ineffective. This statement is also referred to the entire complex used to simulate the service and useful electric loads. Therefore, to carry out a full-range ground testing we apply a special class of control and verification equipment. This includes hardware and software complexes that simulate the operating modes of the power supply under test. The complexes consist of simulators of solar panels, storage batteries, onboard electrical loads, automated systems for connections control, onboard charging and discharging devices for the batteries.

Aims of research

To analyze the state of power supply systems of spacecraft and test equipment for conducting their ground tests. To analyze the structures of simulators for modeling the operational modes of operation of spacecraft power supply systems in ground conditions.

Research methods

To achieve these aims, the article employs the methods of system analysis, the theoretical foundations of electrical engineering and the theory of automatic control.

Results

The paper analyzes the power supplies of automatic spacecraft, developed over the past 20 years, using information from leading domestic enterprises. The basic requirements for modern simulation complexes of the spacecraft power supplies are formulated. We represent possible design options for the simulators for the elements of the power supplies, as well as for the entire automated simulation complex based on the said elements. Their main advantages and drawbacks of the considered equipment are also given herein.

Keywords: spacecraft power supply, technical ground testing, test equipment, battery simulator, solar battery simulator, electric load simulator.

Введение

Одна из важнейших систем, образующих платформу космического аппарата (КА), и во многом определяющая срок его активного существования, является система электроснабжения (СЭС) [1].

Как правило, СЭС КА состоит из: солнечной батареи (СБ, БС), аккумуляторной батареи (АБ), блока энергопреобразующей аппа-

ратуры (ЭПА) и бортовой электрической нагрузки — служебной и полезной.

ЭПА является системообразующим элементом СЭС КА и предназначена для обеспечения совместной работы источников (БС) и накопителей (АБ) электрической энергии, с целью надёжного электроснабжения бортовой аппаратуры (БА) электроэнергией заданного качества.

Система электроснабжения, как составная часть, вносит особый вклад в прогнозируемую надёжность КА. Статистика отказов показывает, что, несмотря на многолетний опыт, необходимым является увеличение надёжности СЭС КА. Следует отметить, что большая часть отказов выявляется и устраняется до запуска КА [2]. К авариям приводят, как правило, не выявленные до эксплуатации причины отказов. Показатели качества рассчитываются ещё на этапе проектирования, но особым этапом в создании системы электроснабжения КА, подтверждении её надёжности и работоспособности в предельных и эксплуатационных режимах, являются наземные испытания.

Современное состояние систем электроснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА)

Анализируя технические данные КА, выпускаемых передовыми отечественными предприятиями, можно сделать вывод, что за все время их разработки и производства непрерывно происходит рост мощности бортовой аппаратуры, как следствие, рост мощности СЭС, а также срока активного существования (САС) аппарата [3]. Так, за последние 10–15 лет мощность СЭС КА в среднем увеличилась с 6–7 до 15–25 кВт, САС — до 15 лет (таблица 1). Кроме того, космические аппараты проектируют без использования гермоконтейнера (применяют открытую архитектуру и сотопанели), никель-водородные аккумуляторные батареи (АБ) заменены на литий-ионные, напряжение на общей обеспечивающей шине прошло эволюцию от 27 до 100 В. При этом число самих КА, работающих на земных орбитах, с каждым годом неуклонно растёт.

Наземная экспериментальная отработка КА

Наземная экспериментальная отработка КА с применением бортовых солнечных батарей (СБ), АБ и всего комплекса нагрузок, в эксплуатационных режимах работы СЭС, в наземных условиях не представляются возможными в силу очевидных причин. С учётом этого, при проведении наземных испытаний для подтверждения прогнозируемой надёжности и работоспособности энергопреобразую-

щей аппаратуры СЭС КА в номинальных и предельных режимах, применяется специальная контрольно-проверочная аппаратура (КПА) — аппаратно-программные энергопреобразующие комплексы имитации СЭС КА, заменяющие основные элементы СЭС КА их физическими моделями, адекватно отражающими их электротехнические свойства — вольт-амперные (ВАХ) и частотные характеристики, внутреннее сопротивление, выходные динамические параметры.

Являясь физическими моделями реальных объектов, имитаторы элементов (ИЭ) СЭС должны обладать, максимально близкими к бортовым, характеристиками солнечной и аккумуляторной батарей, а также обеспечивать имитацию статических и динамических токовых нагрузок, для отработки профиля мощности, потребляемой бортовой аппаратурой. В некоторых случаях (определяется заказчиком), предстартовое энергообеспечение СЭС КА может осуществляться имитаторами солнечных, либо аккумуляторных батарей.

Таким образом, энергопреобразующие комплексы, применяемые в ходе наземных испытаний, должны отвечать ряду требований, самыми важными из которых, как и для самой СЭС КА, также являются энергетическая эффективность, оптимальные массогабаритные показатели, точность стабилизации выходных параметров и длительные сроки безотказной эксплуатации.

Отказы энергопреобразующих комплексов, спроектированных и изготовленных с не выявленными дефектами, при проведении этапов наземной отработки, приводят к нежелательным последствиям: создаются аварийные ситуации для энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА), АБ, либо всего космического аппарата, длительное выяснение причин остановки испытаний, дорогостоящие простои производства и т. д.

Как отмечалось выше, в связи с постоянным увеличением средней мощности СЭС КА увеличивается мощность КПА. Поэтому необходимы не только разработка и производство, а также развитие методов и современных подходов к проектированию эффективных энергопреобразующих комплексов имитации СЭС КА. Сегодня существуют

Таблица 1. Эволюция мощности систем электроснабжения КА**Table 1.** The evolution of power ratings of the spacecraft power supplies

Тип КА	Мощность СЭС, Вт	САС, лет	Начало летных испытаний	Масса, кг
Экспресс-А	2540	7	12.03.2000	2600
SESAT	5300	10	18.04.2000	2600
Молния-3К	1470	5	20.07.2001	1740
Глонасс-М	1400	7	10.12.2003	1415
Экспресс-АМ	6300	12	29.12.2003	2600
Экспресс-АМ33	6770	12	28.01.2008	2579
Экспресс-АМ44	6770	12	11.02.2009	2532
Луч-5А	2200	10	11.12.2011	1140
АМОС-5	7600	15	11.12.2011	1972
Ямал-300К	7600	14	03.11.2012	1870
Луч-5Б	2200	10	03.11.2012	1350
Spacebus-4000 С2	8000	15	2011–2012	4850
Spacebus-4000 С3	10000	15	2011–2012	5300
Spacebus-4000 С4	12000	15	2011–2012	5900
SSL/1300	5–25	> 15	2013	3700–6400
КАZSAT-3	9320	15	28.04.2014	1740
Экспресс-АМ5	16200	15	21.10.2014	3360
Экспресс-АМ6	16200	15	21.10.2014	3360
Экспресс-АМ8	5880	15	14.09.2015	2100
Ямал-401	16800	14	14.12.2015	2976

различные реализации ИЭ СЭС КА для проведения наземных испытаний, разработанные предприятиями отечественной и зарубежной промышленности. Но их эффективность, точность, показатели надёжности, массогабаритные параметры, гарантийные сроки эксплуатации ставят перед разработчиками ряд задач по проектированию и созданию более эффективных комплексов имитации СЭС КА [4].

Обобщённая схема замещения структур СЭС КА

За всю историю проектирования и производства космических аппаратов к настоящему времени были разработаны различные структуры СЭС, построенные под определенные типы задач, рабочие орбиты и массогабаритные параметры спутников. Но из структур, нашедших применение, можно выделить следующие: параллельная с шунтовым стабилизатором, параллельно-последовательные и с экстремальным регулятором мощности [5].

При этом все существующие структуры СЭС КА обобщенно можно представить в виде Т-образной модели баланса мощностей, состоящей из генерирующего (солнечная батарея — СБ), накапливающего (аккумуляторная батарея — АБ) и потребляющего (обобщённая нагрузка — Н) элементов, объединённых посредством блока ЭПА (рисунк 1).

муляторная батарея — АБ) и потребляющего (обобщённая нагрузка — Н) элементов, объединённых посредством блока ЭПА (рисунк 1).

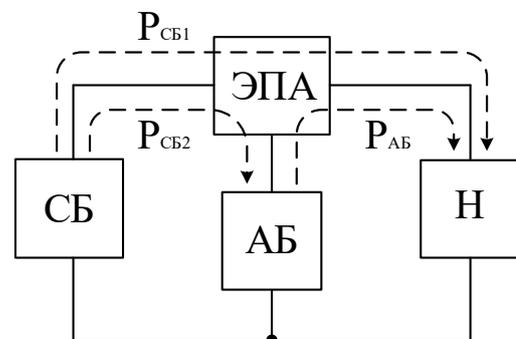


Рисунок 1. Т-образная модель баланса мощностей СЭС КА

Figure 1. T-shape model of the power balance for the spacecraft power supply

Представленная модель отображает четыре возможных режима передачи мощности через преобразователи блока ЭПА:

1) АБ не задействована, нагрузка питается только от СБ:

$$P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1};$$

2) АБ заряжается избытком мощности СБ:

$$P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1} - P_{СБ2} \cdot \eta_{ЭПА2};$$

3) Режим пиковой нагрузки — АБ компенсирует недостаток мощности СБ:

$$P_H = P_{СБ1} \cdot \eta_{ЭПА1} + P_{АБ} \cdot \eta_{ЭПА3};$$

4) Теневой участок орбиты — нагрузка обеспечивается энергией, передаваемой только от АБ:

$$P_H = P_{АБ} \cdot \eta_{ЭПА3};$$

где $\eta_{ЭПА1}$ — $\eta_{ЭПА3}$, КПД каналов преобразования ЭПА СЭС КА.

Блок ЭПА обладает рядом основополагающих функций, и в зависимости от структуры СЭС содержит стабилизатор напряжения, шунтовой стабилизатор, зарядно-разрядные устройства АБ, а также устройство обмена информацией с бортовой ЭВМ. Таким образом, блок ЭПА, являясь системообразующим элементом, который обеспечивает алгоритм работы СЭС КА, *определяет надёжность функционирования космического аппарата в целом.*

Автоматизированный испытательный комплекс

В зависимости от типа рабочего места и соответствующего ему вида испытаний, имитаторы элементов СЭС могут применяться как по-отдельности, так и в составе испытательного комплекса. Для проведения комплексной наземной отработки ЭПА СЭС КА создается интегрированная испытательная площадка — автоматизированный имитационный комплекс (АИК) (рисунок 2) [6]. АИК является физической реализацией Т-образной модели баланса мощностей и состоит из ИЭ СЭС КА, питающихся от промышленной 3-фазной сети, управляющей ЭВМ и автоматизированной системы контроля, имитирующей формирование команд управления и обработки телеметрии, поступающей от блока ЭПА, а также необходимой для проведения проверок кабельной сети и сопротивления изоляции [6, 7].

Структура АИК в общем виде остается постоянной, изменяются количество и типы имитаторов АБ и СБ, которые определяются мощностью и структурой СЭС, при этом функционал комплекса имитации нагрузки может расширяться дополнительными блоками формирования динамических режимов нагрузочных токов.

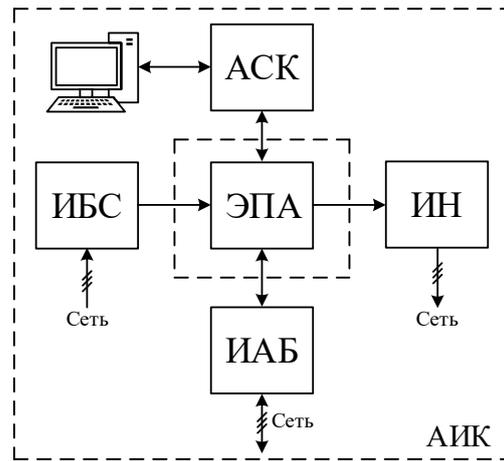


Рисунок 2. Структура автоматизированного испытательного комплекса имитации СЭС КА
Figure 2. Structure of the automated test complex of simulation of the spacecraft power supply

Основной вклад в эффективность испытательного комплекса в целом, вносят имитаторы элементов СЭС, приведенные на рисунок 2. Поэтому разработка и исследование структур ИЭ, их оптимизация, увеличение энергетических показателей, моделирование, определение общих подходов к проектированию и решению частных задач, являющихся свойством отдельной физической модели элемента СЭС, представляют особый интерес.

Имитатор аккумуляторной батареи

Любой из имитаторов, применяемых при испытаниях СЭС, можно представить в виде функционального блока, на вход которого подается 3-фазное напряжение промышленной сети, при этом на выходе обеспечивается ВАХ, импеданс и динамические режимы работы данного элемента СЭС (рисунок 3).



Рисунок 3. Имитатор элемента СЭС КА в виде «чёрного ящика»

Figure 3. Simulator of the spacecraft power supply represented as «a black box»

Рассмотрим возможные варианты структурной реализации ИЭ СЭС КА, раскрывая блок «чёрного ящика», представленный на рисунке 3. Например, один из вариантов

функциональной схемы имитатора аккумуляторной батареи (ИАБ) — энергопреобразующего комплекса, представленного на рисунке 4, содержит два силовых преобразовательных канала — «Разряд» и «Заряд» АБ.

Канал «Разряд» АБ содержит выпрямитель В1, НЧ-фильтр Ф1, автономный инвертор (АИ), выпрямитель В2, ВЧ-фильтр Ф2. Канал «Заряд АБ» состоит из ведомого инвертора (ВИ), НЧ-фильтра Ф3, повышающего преобразователя (ПП) и ВЧ-фильтра Ф4. Силовые преобразователи каналов, АИ и ПП управляются блоком управления (БУ), на который подаются сигналы от задающего устройства и сигналы обратных связей по входному/выходному току и напряжению выхода ИАБ. При этом одним из основных требований в технических заданиях на разработку и изготовление любого ИЭ СЭС является наличие гальванической развязки между выходом ИЭ и питающей 3-фазной сетью. Целесообразно это обеспечить с помощью силового трансформатора. Трансформатор, осуществляющий гальваническую развязку и согласование уровней напряжения, размещают в высокочастотных блоках АИ и ПП, при этом, как известно, значительно снижаются его массогабаритные показатели.

Основными параметрами, отражающими степень адекватности ИАБ являются: ширина диапазона имитируемого выходного напряжения (3–200 В), пульсации напряжения на

выходе имитатора (не более 100 мВ), импеданс каналов заряд/разряд (не более 1 Ом), скорость реакции системы на внешнее возмущение (не более 1–2 мс), КПД (не менее 0,9), уровень электромагнитных излучений, соответствующий ГОСТ Р 54148-2010.

Имитатор эквивалентной нагрузки

Функциональная схема имитатора эквивалентной нагрузки (ИЭН) СЭС представлена на рисунке 5. Основная задача данного энергопреобразующего комплекса — формирование статических и динамических режимов имитации потребляемых токов в выходной шине ЭПА СЭС КА. Динамические режимы воспроизводит блок формирования нелинейных нагрузок (БФНН), в него, как правило, входят формирователи гармонических токов широкого спектра частот, формирователи фронтов тока, имитаторы подключения ёмкостной нагрузки и т. д. Режим формирования статических (постоянных) токов осуществляет силовой преобразовательный канал, содержащий ВЧ-фильтр Ф1, НЧ-фильтр Ф2, повышающий преобразователь ПП и ведомый инвертор ВИ. Стабилизацию входного тока имитатора нагрузок обеспечивает блок управления, на который подаются сигналы обратной связи $I_{oc}(t)$ и от задающего устройства $I_{уст}(t)$.

Следует отметить, что силовой преобразовательный канал «Заряд» в ИАБ и канал формирования статических нагрузок в ИЭН, как правило идентичны по своей структуре. При

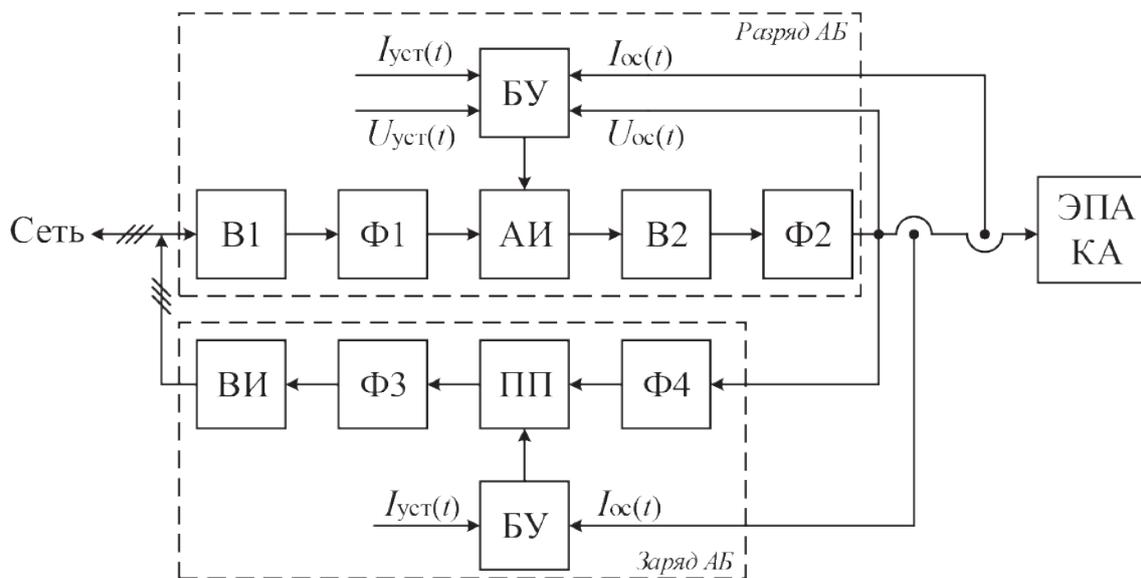


Рисунок 4. Функциональная схема имитатора АБ

Figure 4. Block diagram of the battery simulator

этом энергия, потребляемая от ЭПА СЭС КА, не рассеивается в окружающее пространство (за исключением собственных потерь), а передается в питающую 3-фазную сеть. Преимущества такого способа формирования потребляемых токов очевидны. Несмотря на это, сегодня существуют нагрузочные комплексы, преобразующие электрическую энергию полностью в тепловую [8].

Имитатор солнечной батареи

Принцип действия имитатора СБ основан на преобразовании электроэнергии переменного тока питающей сети с помощью промежуточных звеньев повышенной частоты в энергию постоянного тока на выходе ИБС и формировании ВАХ, соответствующей схеме замещения преобразователя солнечной энергии в электрическую (рисунки 6, 7) [9]. При этом ИБС должен обладать динамическими свойствами СБ, обеспечивать формирование линейных и нелинейного участков ВАХ, а

также необходима имитация эквивалентной ёмкости бортовой СБ [10].

Имитаторы солнечных батарей могут быть как одноканальными, так и многоканальными при имитации многосекционных солнечных батарей спутника. Одна из используемых при проектировании функциональных схем энергопреобразующего комплекса — имитатора солнечной батареи КА представлена на рисунке 8. Аналогично предыдущим структурам ИЭ, в данном случае напряжение силовой сети поступает на выпрямитель В1, затем сглаживается НЧ-фильтром Ф1. Сглаженное напряжение подается на блок стабилизации тока (БСТ), основная задача которого — имитация тока короткого замыкания $I_{кз}$ солнечной батареи. Ток с выхода БСТ поступает в нагрузку, в цепь шунтового сопротивления $R_{ш}$ и в цепь с нелинейным элементом (НЭ), состоящим из диодно-резистивных матриц. Наклон ВАХ на участке напряжения (рисунок 6) определя-

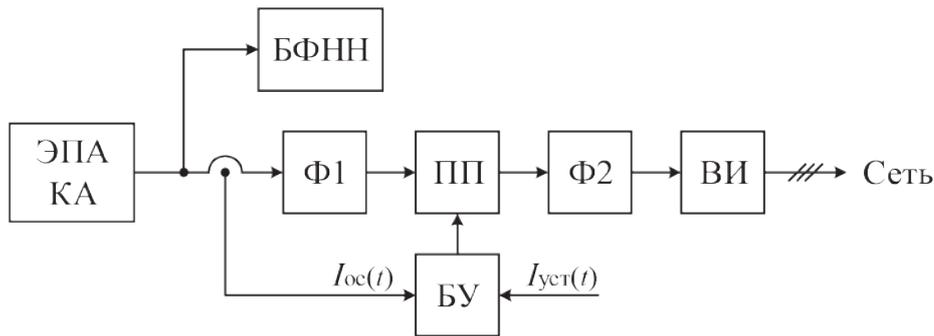


Рисунок 5. Функциональная схема имитатора эквивалентной нагрузки СЭС КА
Figure 5. Block diagram of the equivalent load simulator for the spacecraft power supply

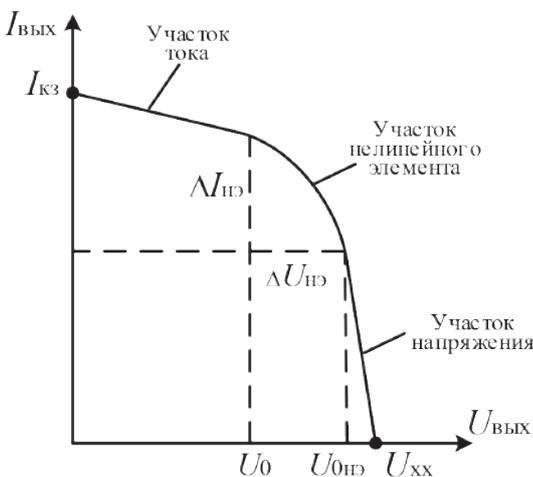


Рисунок 6. Вольт-амперная характеристика имитатора солнечной батареи
Figure 6. V-I characteristic of the solar panel simulator

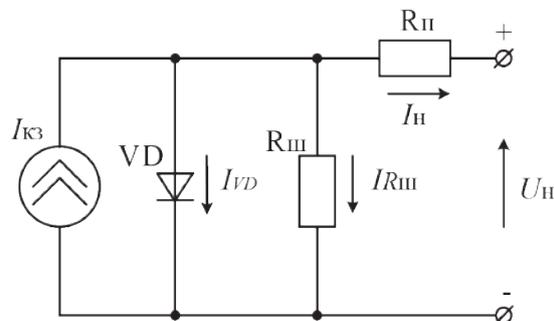


Рисунок 7. Схема замещения элемента солнечной батареи
Figure 7. Equivalent circuit of the solar panel

ется величиной сопротивления R_n , наклон ВАХ на участке тока — величиной сопротивления $R_{ш}$. Форма ВАХ на нелинейном участке задается блоком НЭ. Последовательно с НЭ включен источник напряжения U_0 , который определяет напряжение холостого хода ИБС. С целью снижения тепловых потерь в блоке НЭ, особенно в режиме холостого хода, в схему включают источник напряжения $U_{0НЭ}$. С помощью блока $C_{вых}$ имитируется выходная ёмкость солнечной батареи. Диоды VD1–VD3 выполняют отсекающую функцию, исключая взаимовлияние источников энергии друг на друга, диод VD4 выполняет защитную функцию выхода имитатора.

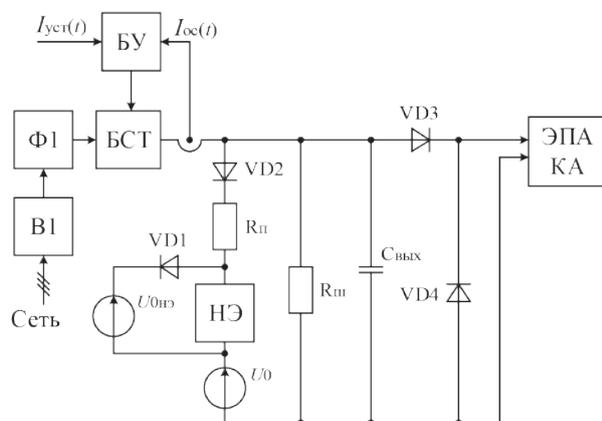


Рисунок 8. Функциональная схема имитатора солнечной батареи

Figure 8. Block diagram of the solar panel simulator

Основным преимуществом данной структуры является высокое быстродействие, выраженное в способности системы в течение не более 1 мс реагировать на внешнее возмущение со стороны ЭПА СЭС КА. Одним из основных недостатков данного энергопреобразующего комплекса является низкая энергоэффективность, т.к. участки цепей, формирующие ВАХ ИБС, такие как $R_{ш}$, R_n , блок НЭ, рассеивают значительную мощность, требуют постоянного контроля температуры и, в случае необходимости, включения системы активного охлаждения.

Представленные функциональные схемы энергопреобразующих комплексов не являются единственно возможными и приведены в качестве примеров, демонстрирующих уровень сложности данных систем.

Выводы

1. С целью подтверждения прогнозируемой надёжности космического аппарата необходимо проведение комплексной наземной отработки его системы электроснабжения путем её физической имитации.

2. Мощность бортовой аппаратуры и, как следствие, мощность СЭС КА постоянно растут. Согласно обработанным данным за последние 10–15 лет, мощность СЭС КА в среднем увеличилась с 6–7 до 15–25 кВт.

3. За последние 20 лет СЭС и КА претерпели изменения: при проектировании СЭС в основном применяются структуры — параллельная с шунтовым стабилизатором, параллельно-последовательные и с экстремальным регулятором мощности, ввиду большей энергетической эффективности и надёжности; с целью увеличения объёма полезной нагрузки выполняется внегермоконтейнерное конструирование КА; никель-водородные АБ заменены на более энергоёмкие литий-ионные; напряжение общей обеспечивающей шины увеличено с 27 до 100 В с целью уменьшения веса бортовой кабельной сети при возросших мощностях потребления.

4. Сегодня используются различные структурные реализации энергопреобразующих имитационных комплексов, но учитывая то, что на фоне роста средней мощности СЭС с каждым годом растёт и количество самих КА, функционирующих в околоземном пространстве, существует острая необходимость в увеличении энергоэффективности ЭИК и, как следствие, их надёжности для увеличения качества наземной отработки и предстартового обслуживания СЭС КА.

5. Энергопреобразующие имитационные комплексы для наземных испытаний СЭС КА являются большими сложными нелинейными системами. Для увеличения их энергоэффективности и надёжности необходимо проведение всесторонних исследований: построение имитационных и математических моделей, поиск способов снижения теплонагруженности элементов силовых преобразовательных модулей, анализ способов увеличения адекватности ЭИК, имитирующих нелинейные режимы работы.

Список литературы

1. ТАСС. Ангольский телекоммуникационный спутник «Анголат-1» // Досье: портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tass.ru/info/4847125> (дата обращения: 27.01.2019).

2. Куренков В.И., Волоцуев В.В. Надёжность изделий и систем ракетно-космической техники: курс лекций. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2010. 55 с.

3. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва // Космические аппараты АО «ИСС»: портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft> (дата обращения: 02.02.2019).

4. Пат. 2349518 Российская Федерация, МПК 51 В 64 G 7/00. Стенд для моделирования системы электропитания космического аппарата / В.И. Пушкин, А.С. Гуртов, С.И. Миненко, В.Н. Фомакин, Ю.Д. Петренко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное Унитарное Предприятие Государственный научно-производственный ракетно-космический центр (ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»), Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации. № 2007126588/11; заявл. 12.07.07; опублик. 20.03.09, Бюл. № 8.

5. Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с.

6. Бубнов О.В., Кремзуков Ю.А., Пчельников В.А., Рулевский В.М., Шурыгин Ю.А. Автоматизированное рабочее место обработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20, № 3. С. 35-39.

7. Мишин В.Н., Целебровский И.В., Пчельников В.А., Бубнов О.В., Кремзуков Ю.А., Юдинцев А.Г., Рулевский В.М. Автоматизированная система функционального контроля испытаний энергоснабжения систем электропитания космических аппаратов // Электропитание, 2014, №3, С. 56-60.

8. Силин Е. Программируемые электронные нагрузки Chroma 63800-ТЕСТ // Силовая электроника. 2013. № 5. С. 110-111.

9. Кремзуков Ю.А., Мишин В.Н., Пчельников В.А., Бубнов О.В., Рулевский В.М., Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов. Томск: Изд-во Томского университета, 2014. 86 с.

10. Шурыгин Ю.А., Андреев Ю.А., Бубнов О.В. Нелинейный элемент для имитатора солнечных батарей // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21, № 1. С. 135-138.

References

1. TASS. *Angol'skij telekommunikacionnyj sputnik «Angosat-1»*. *Dos'e: portal* [TASS. Angolan Telecommunication Satellite «Angosat-1». Dossier: Portal]. Available at: <https://tass.ru/info/4847125> (accessed 27.01.2019). [in Russian].

2. Kurenkov V.I., Volotsuev V.V. *Nadejnost izdeliy i sistem raketno-kosmicheskoy tehniki: kurs lektsiy Samara* [Reliability of Products and Systems of Rocket and Space Technology. Lecture Course]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskij universitet, 2010, 55 p. [in Russian].

3. *AO Informatsionnyie sputnikovye sistemy imeni akademika M.F. Reshetneva. Kosmicheskie apparaty AO ISS* [JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems]. Available at: <https://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft> (accessed 02.02.2019).

4. Pushkin V.I., Gurtov A.S., Minenko S.I., Fomakin V.N., Petrenko Yu.D. *Stend dlya modelirovaniya sistemy elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [Stand for Modeling a Spacecraft Power System]. Patent RF, No. 2349518, 2009.

5. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyishhev A.I., Islyaev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft Power Systems]. Novosibirsk, VO Nauka, Sibirskaya izdatelskaya firma, 1994, 318 p. [in Russian].

6. Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Pchel'nikov V.A., Rulevskiy V.M., Shuryigin Yu.A.

[The Automated Workstation for Testing the Energy-Converting Equipment of the Spacecraft's Power Supply System]. *Doklady TUSUR — TUSUR Reports*, 2017, Vol. 20, No. 3, pp. 35–39. [in Russian].

7. Mishin V.N., Tselebrovskiy I.V., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Yudintsev A.G., Rulevskiy V.M. Avtomatizirovannaya sistema funktsional'nogo kontrolya ispytaniy energosnabzheniya sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov [The Automated System for Functional Control of Tests of Power Supply for Spacecraft Power Systems]. *Elektropitanie — Power Supply*, 2014, No. 3, pp. 56-60. [in Russian].

8. Silin E. Programmiruemye elektronnye nagruzki Chroma 63800-TECT [Programmable Electronic Loads Chroma 63800-TEST].

Silovaya elektronika — Power Supply, 2013, No. 5, pp. 110-111. [in Russian].

9. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Rulevskiy V.M., Shinyakov Yu. A., Shuryigin Yu.A. *Proektirovanie modulnykh imitatorov solnechnykh batarey avtomatizirovannoy kontrolno-ispytatelnoy apparatury sistem elektropitaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Design of Modular Simulators of Solar Panels for Automated Test Equipment of Power Systems for Automatic Spacecraft]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 2014, 86 p. [in Russian].

10. Shuryigin Yu.A., Andreev Yu.A., Bubnov O.V. Nelineinyi element dlya imitatora solnechnykh batarey [Non-Linear Element for Solar Simulator]. *Doklady TUSUR — TUSUR Reports*, 2018, Vol. 21, No. 1, pp. 135-138. [in Russian].



Бордюг А. С.
Bordyug A. S.

кандидат технических наук,
доцент кафедры электрооборудования
судов и автоматизации производства,
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-65-73

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ СУДОВОГО КРАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ

Актуальность

На морских судах для использования морских кранов при различных погодных условиях необходимо постоянно повышать работоспособность крана. В этом контексте работоспособность крана выражается с помощью так называемой рабочей погодной зоны. Рабочая погодная зона рассчитывается на основе характеристик крана в сочетании с характеристиками судна и грузоподъемностью и текущего состояния моря и ветра. Наиболее важными характеристиками работоспособности крана, которые входят в расчет рабочей зоны, являются максимальная скорость движения троса и грузоподъемность. Рабочая погодная зона крана рассчитывается на этапе планирования подъема и указывает, при каких условиях подъемное оборудование может выполнять операцию. Эти условия в основном связаны с высотой волны и скоростью ветра. За пределами рабочей погодной зоны риск перегрузки крана или повреждения поднятого оборудования рассчитывается как настолько высокий, что операции будут отменены.

Цель исследования

Повышение надежности кранов или других подъемных устройств на морских судах с помощью компенсации движения установки с обеспечением высокого уровня безопасности и сведения к минимуму риска повреждения крана или груза. Примерами могут быть спуск кабеля или трубопровода на дно моря. В любом случае компенсация движения необходима для получения коммерчески полезной рабочей погодной зоны для любой морской операции.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались положения теории рабочих процессов судовых грузоподъемных механизмов, опыт проектирования и технической эксплуатации судовых кранов, дифференциальные уравнения динамики крановых механизмов, математический аппарат теории автоматического управления.

Результаты

Теоретические исследования, выполненные в данной работе, позволили получить следующие результаты:

1. Проанализировано влияние погодных условий на рабочие характеристики судовых кранов;
2. Разработанные параметрические модели для системного трения и трения двигателя позволяют корректировать систему управления крана при выполнении грузовых операций в различных погодных условиях при отсутствии штатных измерительных систем для мониторинга данных параметров.

Ключевые слова: судовой кран, крен, ветер, система управления, модель.

DEVELOPMENT OF A PARAMETRIC MODEL OF HYDRAULIC LOSSES OF A SHIP CRANE TO INCREASE THE RELIABILITY OF CARGO OPERATIONS

Relevance

On sea vessels in order to use sea cranes in various weather conditions, it is necessary to constantly improve the performance of the crane. In this context the working capacity of the crane is expressed by the so-called working weather zone. The working weather zone is calculated based on the characteristics of the crane combined with the characteristics of the vessel and the load capacity and the current state of the sea and wind. The most important performance characteristics of the crane that are included in the calculation of the working area are the maximum speed of the cable and the load capacity. The operating weather zone of the crane is calculated at the lifting planning stage and indicates under what conditions the lifting equipment can perform the operation. These conditions are mainly related to wave height and wind speed. Outside of the working weather zone, the risk of overloading the crane or damage to the lifted equipment is calculated as so high that operations will be canceled.

Aim of research

To improve the reliability of cranes or other lifting devices on marine vessels by compensating for the movement of the installation, ensuring a high level of safety and minimizing the risk of damage to the crane or cargo. Examples may be the descent of a cable or pipeline to the bottom of the sea. In any case, motion compensation is necessary to obtain a commercially useful operational weather zone for any maritime operation.

Research methods

When solving the tasks, the provisions of the theory of working processes of ship lifting mechanisms, experience in the design and technical operation of ship cranes, differential equations of the dynamics of crane mechanisms, and the mathematical apparatus of the theory of automatic control were used.

Results

The theoretical studies carried out in this work allowed us to obtain the following results:

1. The influence of weather conditions on the performance characteristics of ship cranes is analyzed;
2. The developed mathematical models of the ship crane control system increase its reliability, and also take into account the parameters and performs the forecast of cargo operations in various weather conditions in the absence of standard measuring systems for monitoring these parameters.

Keywords: ship crane, roll, wind, control system, model.

Введение

Чаще всего компенсация движения делится между судном и самим краном. Горизонтальное позиционирование осуществляется системой динамического позиционирования (DP) судна, а оставшаяся компенсация движения обрабатывается посредством управления движением крана. Обычно это делается путем управления вращением основной лебедки и, тем самым, выдаваемого троса. Этот тип компенсации движения обычно называется компенсацией вертикальной качки (НС), и для большинства операций, выполняемых под водой, этого считается достаточно.

Применение цифрового двойника в морской отрасли

Цифровой двойник — это виртуальная модель реальной системы, процесса или

услуги, которая позволяет реалистично прогнозировать физическое действие. Цифровой двойник может использоваться как отдельная модель или в кластере в сочетании с другими цифровыми двойниками. Обычно его можно использовать двумя способами:

- в качестве автономного устройства для прогнозирования производительности системы или тестирования виртуального прототипа;
- как встроенный блок с непрерывным обменом данными с реальной системой.

Встроенный цифровой двойник хорошо подходит для поддержки принятия решений в реальном времени, оперативного или диагностического обслуживания, принятия решений (автоматизации) и оптимизации процессов. Цифровой двойник обеспечивает

расширенный анализ собранных данных, которые можно использовать для оптимизации процесса или системы, определения текущих потребностей в обслуживании или прогнозирования будущих потребностей. Цифровой двойник также является отличным инструментом для разработки, например для тестирования новых модификаций или анализа потенциального взаимодействия физического двойника с другими системами или процессами.

Концепция цифрового двойника была впервые представлена в 2002 году Майклом Гривсом [1]. Гривс описывает три основные части цифрового двойника: (1) физический двойник, (2) виртуальный двойник и (3) связь между виртуальным и физическим двойником [1–6]. Комбинация симуляций с самыми продвинутыми моделями и облачными сервисами затруднит достижение свойств в реальном времени.

Уровень 1 — это доцифровой двойник, больше похожий на традиционный прототип. Модель обычно разрабатывается во время концептуального проектирования и проектирования перед построением физической системы. Следовательно, у модели нет автоматического обмена данными с физическим двойником. Уровень 2 цифрового двойника имеет обмен данными, но модель обычно не поддерживает работу в реальном времени, и поэтому данные принимаются партиями. Уровень 3 — это цифровая модель, способная адаптироваться к физическому близнецу. Для модели такого уровня потребуются продвинутое адаптивные контроллеры, такие

как алгоритмы машинного обучения с учителем. Двойники уровня 4 имеют те же возможности, что и уровня 3, но, кроме того, имеют возможность неконтролируемого машинного обучения. В панельной дискуссии [7] DNV GL указал, что цифровые двойники можно рассматривать как кластер функциональных элементов или подмоделей. Эти функциональные элементы будут на разных уровнях сложности системы, как показано на рисунке 1.

Прецифровый двойник или цифровой двойник — это типичный инструмент для виртуального прототипирования, когда непроверенная модель используется в качестве основы для дальнейшей модификации или разработки нового продукта. Следовательно, варианты использования цифрового двойника перекрывают области так называемого виртуального прототипирования (рисунок 2).

Для морских кранов с компенсацией вертикальной качки очень выгодно использование цифровых двойников. Потенциально это позволяет оптимизировать конструкцию, прогнозировать производительность и разрабатывать контроллеры, которые, в зависимости от уровня цифровых двойников, синхронизируются с фактическим поведением физического крана. Существенными проблемами при разработке системы компенсации вертикальной качки являются точность модели, затраты, связанные с получением данных из физической системы, а также необходимость в процедурах валидации и верификации.



Рисунок 1. Кластер функциональных элементов цифровых двойников

Figure 1. Cluster of functional elements of digital twins

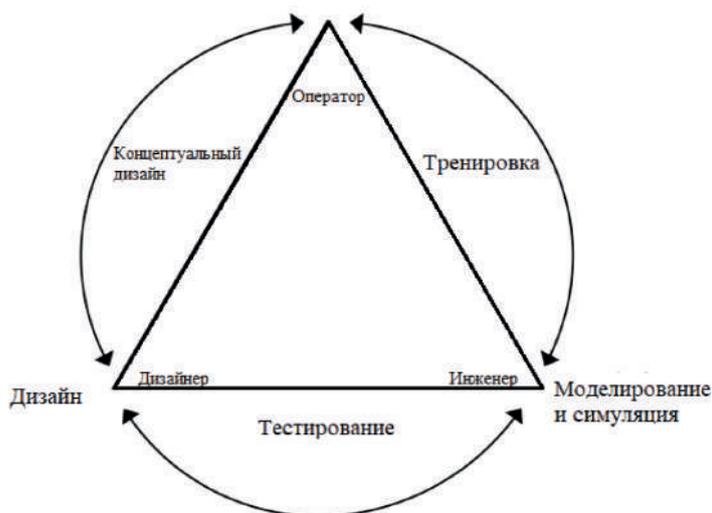


Рисунок 2. Виртуальное прототипирование

Figure 2. Virtual prototyping

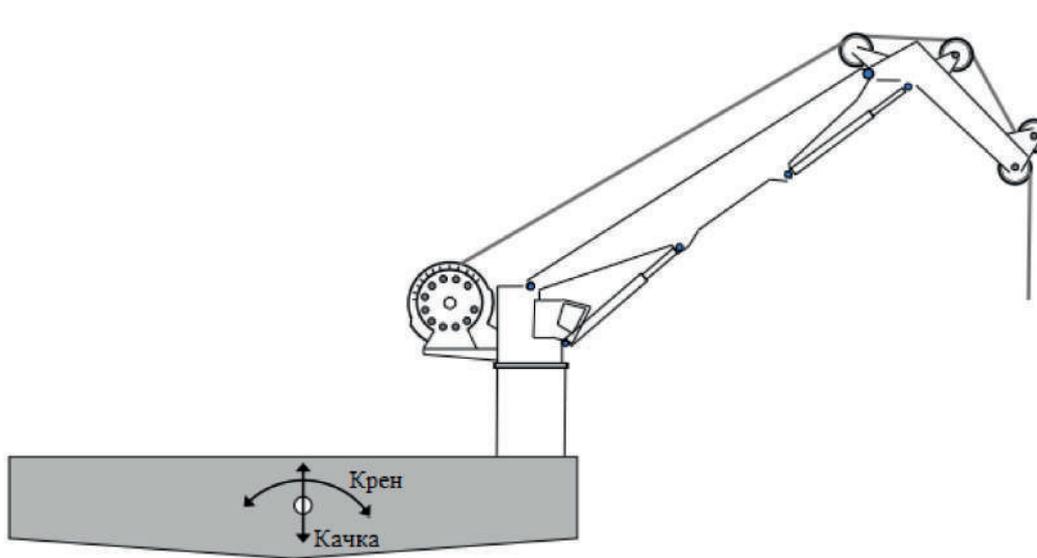


Рисунок 3. Качка на морском судне

Figure 3. Rocking on a sea ship

Компенсация качки. Компенсация вертикальной качки используется для разделения движения судна от груза, что позволяет безопасно поднимать и опускать грузы на морском дне. Крен, тангаж и качка судов влияют на вертикальное движение конца стрелы и заставляют груз перемещаться относительно неподвижного морского дна (рисунок 3).

Компенсация вертикальной качки — это стратегия одномерной компенсации, получаемая путем демпфирования движения или подачи опорного сигнала обратного движения на кончик крана или трос. Для более крупных кранов используется исключительно тросовое управление, т. е. конец стрелы крана фиксируется относительно судна. Это связано с тем, что гидроцилин-

дры, управляющие краном, должны управлять массой стрел крана вместе с полезной нагрузкой. Кроме того, гидравлические двигатели симметричны, и существует линейная зависимость между вращением двигателя и отдачей троса.

Существует три метода компенсации:

1. Пассивная компенсация;
2. Активная компенсация;
3. Комбинация из двух, называемая активно-пассивной компенсацией.

Моделирование потерь

при компенсации вертикальной качки

Наиболее распространенной гидравлической системой компенсации вертикальной качки является активно-пассивная гидравлическая система, показанная на рисунке 4.

Активно-пассивная благодаря сочетанию активных и пассивных функций позволяет проектировать лебедочную систему с большой грузоподъемностью по сравнению с чисто активными системами. Разработанные методы управления могут использоваться как чисто активными, так и пассивно-активными системами, в работе основное внимание уделяется разработке средств управления в активной системе. Классический способ управления активной системой — необходимость зафиксировать изменения двигателя и использовать активные насосы в качестве основных органов управления.

Стратегия первичного контроля ставит две серьезные проблемы. Во-первых, это приводит к ограничению максимальной скорости каната, а, во-вторых, ошибка управления во время компенсации вертикальной качки возникает при изменении направления вращения лебедки. Ошибка вызвана прерывистым скольжением при передаче мощности от гидравлического двигателя к полезной нагрузке. Практический опыт показывает, что сочетание прерывистого скольжения и небольшого смещения двигателя в активной системе оказывает значительное влияние на колебания. Активная система должна реагировать на возмущения, вызванные трением, ускорением и взаимодействием между полез-

ной нагрузкой и морем. Кроме того, эффективное передаточное отношение скорости зависит от протеканий в гидравлических компонентах. Самый неуловимый параметр возмущения — это потери на трение.

Система лебедки включает несколько компонентов потерь на трение. Между подвешенным грузом и гидравлическими насосами — это потери крутящего момента в гидравлических двигателях, редукторах, зубчатой передаче, подшипниках барабана, канатных шкивах и внутри самого троса.

Разработка параметрической модели гидравлических потерь судового крана для повышения надежности выполнения грузовых операций

Проект начался с проведения полевых испытаний кранов теплохода «Иван Поддубный». Главный вывод по результатам полевых испытаний и измерений явился четким указанием на то, что невозможно создать модель трения для всей системы лебедки, не разбивая ее на подмодели. В то же время не удалось измерить потери на трение покомпонентно. Единственный реальный способ измерить трение в рамках временных и бюджетных ограничений проекта — это оценить его на основе датчиков давления в гидравлической системе, поэтому измеряемое трение включает от двигателей и до полезной

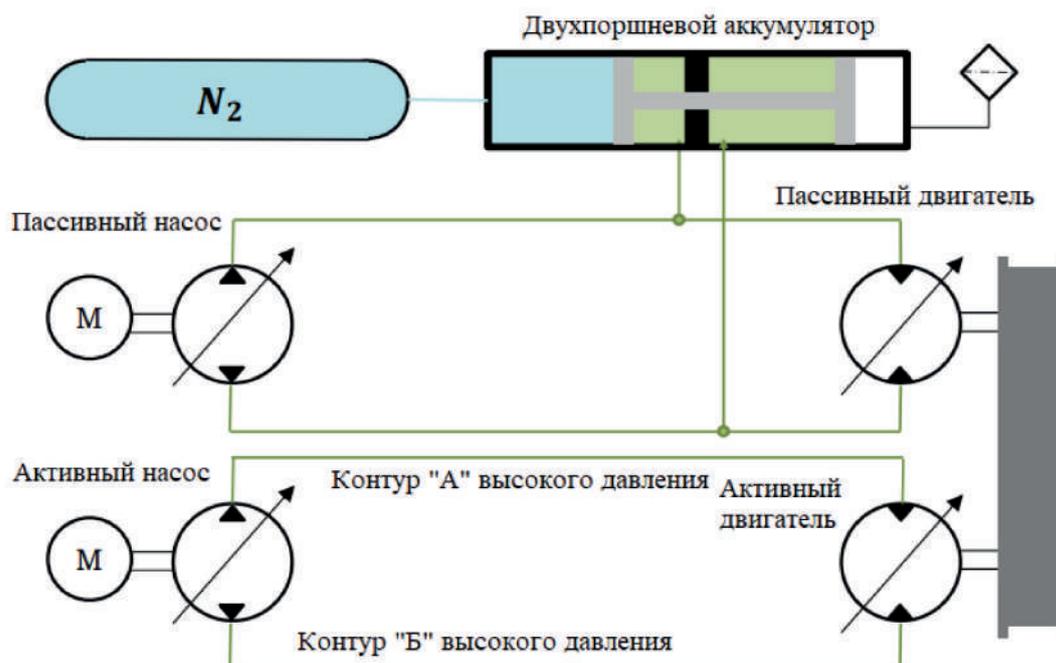


Рисунок 4. Активно-пассивная гидравлическая система

Figure 4. Active-passive hydraulic system

нагрузки. Был разработан метод, разделяющий трение на две части; моторное трение и системное трение. Трение системы — это сосредоточенное трение всего измеренного трения, кроме трения двигателя. Трение двигателя оценивается на основе данных поставщика, а трение в системе оценивается на основе модели трения двигателя и измерений. Таким образом, новый подход требовал данных субпоставщиков и модели потерь на трение для двигателей лебедки.

При исследовании модели трения крана, используется рабочий процесс, показанный на рисунке 5.

Пример данного метода используется на кране L4593, установленный на теплоходе «Иван Поддубный». L4593 — кран с активной компенсацией вертикальной качки грузоподъемностью до 100 т (рисунок 6).

Модель трения для данного двигателя показана в уравнении (1) [8]. Потери на трение для каждого вала двигателя T_{fm} , рассчитываются на основе скорости вращения вала двигателя ω_m , рабочего объема двигателя D_m и падения давления на двигателе Δp_m :

$$T_{fm} = X_1 \cdot \omega_m + X_2 \cdot \omega_m^2 \cdot D_m^3 + X_3 \cdot \Delta p_m \cdot D_m + X_4 + X_5 \cdot \Delta p_m^2. \quad (1)$$

Предполагается, что модель трения двигателя имеет потери, аналогичные потерям, полученным из данных гидромеханической эффективности, предоставленных поставщиком. Модель включает кулоновское и вязкое трение, турбулентные потери потока через пазы и клапаны, а также некоторые потери высокого давления.

На рисунке 7 показано сравнение табличных данных производителя и модели. Поскольку данные изготовителя берутся из таблицы [9], значения интерполируются для получения непрерывной кривой.

Следующим этапом является использование измерений трения, выполненных на кране (рисунок 8), для определения параметров трения системы. Данный кран был испытан в июне 2020 года, и были получены оценки трения. Данные включают широкий диапазон нагрузок — от 0 % до 100 % и диапазон рабочего давления от 120 до 215 см³/об.

Определим модель оставшейся системы — это вся система лебедки, показанная в уравнении (2), за исключением гидравлической системы и гидравлических двигателей [9]:

$$T_{fs3} = (Y_1 \cdot T_d + Y_3) \cdot e^{\frac{-|w_m| \cdot 60}{Y_4 \cdot 2\pi}} + Y_2 + Y_5 \cdot w_m + Y_6 \cdot T_d. \quad (2)$$

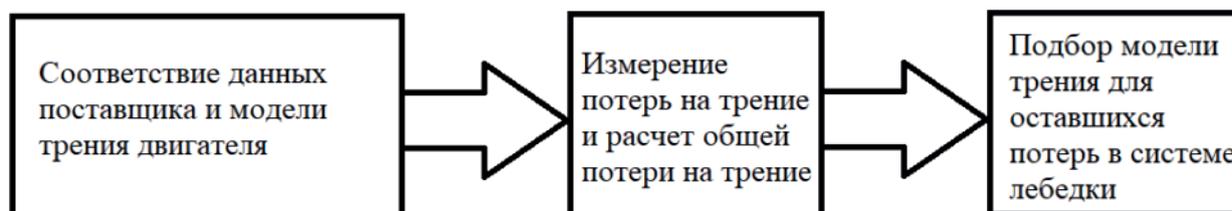


Рисунок 5. Блок-схема рабочего процесса при моделировании крана

Figure 5. Workflow flowchart for crane simulation



Рисунок 6. Кран L4593, установленный на теплоходе «Иван Поддубный»

Figure 6. Crane L4593 installed on motoship «Ivan Poddubny»

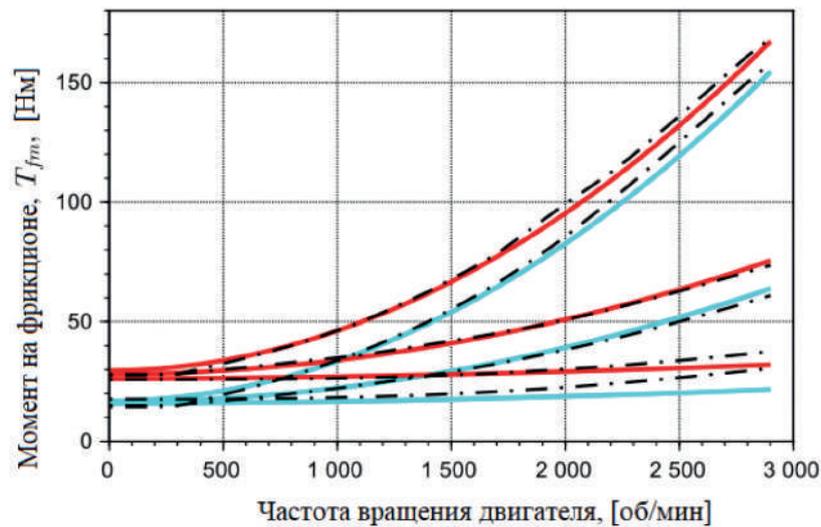


Рисунок 7. Сравнение данных о трении от производителя (пунктир) и модели

Figure 7. A comparison between the friction data given from supplier (mapping) and the model

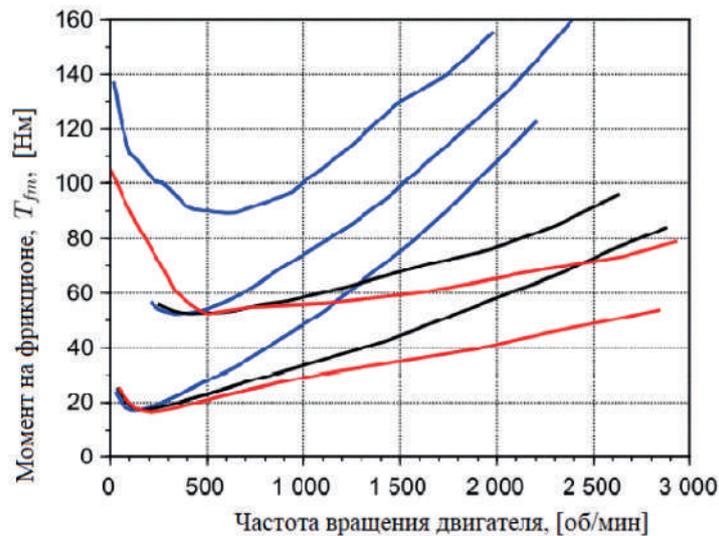


Рисунок 8. Общий момент трения, измеренный на гидравлической стороне двигателя

Figure 8. Total friction torque, measured at the hydraulic side of the motor

Параметры Y1–6 были найдены с помощью так называемого метода комплексной оптимизации [10, 11]. Процедура оптимизации — это итерационный процесс, работающий над совокупностью проектов. На каждой итерации процедура направлена на улучшение наихудшего набора проектов в общей совокупности путем отражения его в центре иде (точке в пространстве проекта) оставшегося проекта. В этом случае размер совокупности был установлен равным 36, и начальная совокупность была сгенерирована как случайные планы в пределах определенной

границы для каждого параметра. Данные испытаний включают диапазон смещения от 120 до 215 см³/об для гидравлических двигателей, а включенные испытательные нагрузки находились в диапазоне от 0 до 100 т. Для оптимизации были выбраны наборы данных 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10. Параметры модели были определены путем минимизации квадратичной ошибки между измеренным трением и моделированием (рисунок 9). Ошибка была рассчитана на весь диапазон измеряемых скоростей с шагом итераций 25 об/мин.

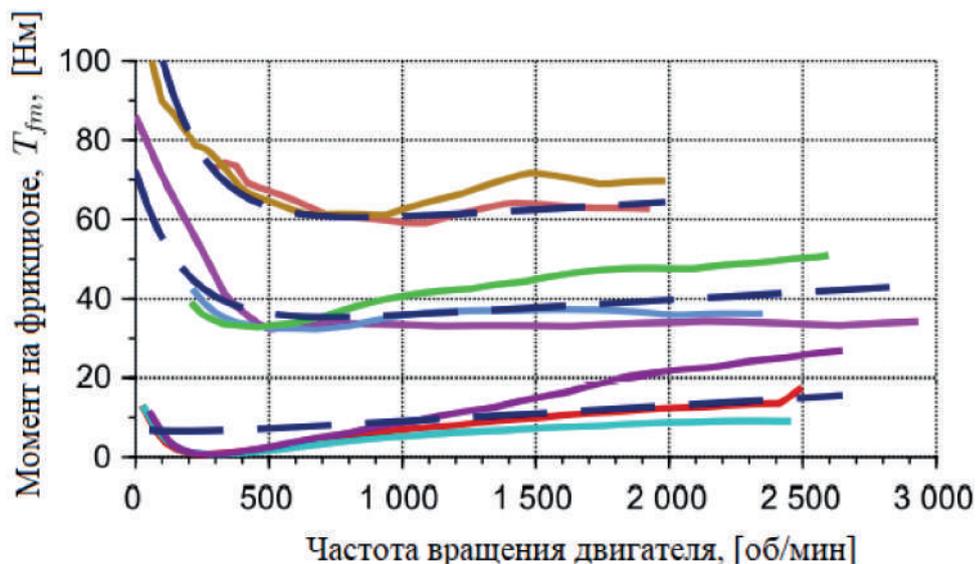


Рисунок 9. Момент трения системы при сравнении измерения и модели
 Figure 9. Frictional moment of the system when comparing measurement and model

Выводы

Параметрические модели для системного трения и трения двигателя показывают хорошую корреляцию. Использование полной карты тестовых данных в качестве модели можно было бы сделать с аналогичным результатом, но параметрические модели были предпочтительнее в основном из-за трех аспектов. Во-первых, возможность более точной оценки потерь за пределами измеренных операционных сценариев. Это уменьшит необходимый объем тестовых данных, необходимых для определения параметрической модели, по сравнению с отображенной моделью. Во-вторых, изменение только нескольких параметров более удобно, чем изменение значений на большой карте данных. В-третьих, параметрические модели

дают возможность легко собирать и сравнивать параметры моделей для разных кранов и двигателей. Таким образом можно создать библиотеку параметров.

Исследования, выполненные в данной работе, позволили получить следующие результаты.

1. Проанализировано влияние погодных условий на рабочие характеристики судовых кранов.
2. Разработанные параметрические модели для системного трения и трения двигателя позволяют корректировать систему управления крана при выполнении грузовых операций в различных погодных условиях при отсутствии штатных измерительных систем для мониторинга данных параметров.

Список литературы

1. Madni A., Madni C., Lucero S. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // *Systems*. 2019. No. 7(1):7. DOI: 10.3390/systems7010007.
2. Jones D., Snider Ch., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. No. 1(2019). DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
3. Bacchiega G. Developing an Embedded Digital Twin for HVAC Device Diagnostics.

https://www.slideshare.net/gbacchiega/embedded-digital-twin-76567196?from_action=save, 2017.

4. Miskinis C. Explaining the Definition of Digital Twin and How It Works. <https://www.challenge.org/insights/what-is-digital-twin>, 2018.

5. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, Hawaii, USA, 2012. P. 1–14.

6. Marr B. What Is Digital Twin Technology — And Why Is It So Important? // *Forbes*. 2017. P. 4–7.

7. Woodacre J.K., Bauer R.J., Irani R.A. A Review of Vertical Motion Heave Compensation Systems // *Ocean Engineering*. 2015. No. 104. P. 140–154. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.00.

8. Moslatt G.-A., Hansen M.R., Karl- sen N.S. A Model for Torque Losses in Variable Displacement Axial Piston Motors // *Modeling, Identification and Control*. 2018. No. 39(2). P. 107–114. DOI: 10.4173/mic.2018.2.5.

9. Moslatt G.-A., Hansen M.R. Modeling of Friction Losses in Offshore Knuckle Boom Crane Winch System // 2018 Global Fluid Power Society PhD Symposium (GFPS). Samara, Russia, July 2018. P. 1–7.

10. Box M.J. A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods // *The Computer Journal*. 1965. No. 8(1). P. 42–52. DOI: 10.1093/comjnl/8.1.42.

11. Krus P., Jansson A., Palmberg J.-O. Optimization for Component Selection Hydraulic Systems // Fourth Bath International Fluid Power Workshop. 1991.

12. Brueninghaus Hydromatik and Bosch Rexroth AG. Testreport 1229 A4VSG355DS, 2000.

13. Chernyi S.G., Bordug A.S., Kozachenko L.N., Erofeev P.A., Zhukov V.A. The Reliability Assessment of Functioning of Autonomous Power System of Drilling Rigs // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020. 2020. P. 259–263.

References

1. Madni A., Madni C., Lucero S. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 2019, No. 7(1):7. DOI: 10.3390/systems7010007.

2. Jones D., Snider Ch., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, No. 1(2019). DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

3. Bacchiega G. *Developing an Embedded Digital Twin for HVAC Device Diagnostics*. [https://www.slideshare.net/gbacchiega/embed-](https://www.slideshare.net/gbacchiega/embedded-digital-twin-76567196?from_action=save)

[ded-digital-twin-76567196?from_action=save](https://www.slideshare.net/gbacchiega/embedded-digital-twin-76567196?from_action=save), 2017.

4. Miskinis C. *Explaining the Definition of Digital Twin and How It Works*. <https://www.challenge.org/insights/what-is-digital-twin>, 2018.

5. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Honolulu, Hawaii, USA, 2012, pp. 1–14.

6. Marr B. What Is Digital Twin Technology — And Why Is It So Important? *Forbes*, 2017, pp. 4–7.

7. Woodacre J.K., Bauer R.J., Irani R.A. A Review of Vertical Motion Heave Compensation Systems. *Ocean Engineering*, 2015, No. 104, pp. 140–154. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.00.

8. Moslatt G.-A., Hansen M.R., Karl- sen N.S. A Model for Torque Losses in Variable Displacement Axial Piston Motors. *Modeling, Identification and Control*, 2018, No. 39(2), pp. 107–114. DOI: 10.4173/mic.2018.2.5.

9. Moslatt G.-A., Hansen M.R. Modeling of Friction Losses in Offshore Knuckle Boom Crane Winch System, *2018 Global Fluid Power Society PhD Symposium (GFPS)*, Samara, Russia, July 2018, pp. 1–7.

10. Box M.J. A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods. *The Computer Journal*, 1965, No. 8(1), pp. 42–52. DOI: 10.1093/comjnl/8.1.42.

11. Krus P., Jansson A., Palmberg J.-O. Optimization for Component Selection Hydraulic Systems. *Fourth Bath International Fluid Power Workshop*, 1991.

12. Brueninghaus Hydromatik and Bosch Rexroth AG. Testreport 1229 A4VSG355DS, 2000.

13. Chernyi S.G., Bordug A.S., Kozachenko L.N., Erofeev P.A., Zhukov V.A. The Reliability Assessment of Functioning of Autonomous Power System of Drilling Rigs. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020*, 2020, pp. 259–263.



Гупаленко Д. Д.
Guralenko D. D.
аспирант,
специалист 1-ой категории,
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация



Токарева С. А.
Tokareva S. A.
ведущий экономист,
ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский
государственный
экономический
университет»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация



Захаров Д. Ю.
Zakharov D. Yu.
кандидат технических наук,
главный специалист,
ООО «Газпром ПХГ»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

УДК 338.984

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-74-80

РАЗРАБОТКА КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УПРАВЛЕНИЙ АВАРИЙНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ И КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА СКВАЖИН

Актуальность

От надежной работы единой системы газоснабжения (ЕСГ) во многом зависит развитие топливно-энергетического комплекса России. Частью ЕСГ является сеть подземных хранилищ газа (ПХГ) страны, которые позволяют сглаживать сезонную неравномерность потребления, обеспечивать надежность снабжения потребителей и своевременное выполнение договорных обязательств по экспортным поставкам газа. В России существует 23 ПХГ, за надежное функционирование которых отвечает ООО «Газпром ПХГ», как составная производственная часть Группы Газпром. Дочернее общество является крупнейшим оператором ПХГ в мире.

Из-за устаревания и износа оборудования и необходимости его замены, эффективность эксплуатации скважин зависит не только от качества строительства ПХГ, но и от своевременного выполнения текущего и капитального ремонта, а также скорости проведения аварийно-восстановительных работ. Качественное выполнение перечисленных мероприятий повышает безопасность всех процессов и увеличивает производительные возможности скважин. Для выполнения данных работ в Управлении геологии ООО «Газпром ПХГ» создан отдел организации и контроля строительства скважин, который контролирует филиалы — Управления аварийно-восстановительных работ и капитального ремонта скважин (УАВРиКРС).

Цель исследования

Провести анализ хозяйственной деятельности одного из дочерних обществ ПАО «Газпром» ООО «Газпром ПХГ», приоритетным направлением которого является проведение мероприятий по наращиванию суточной производительности хранилищ, поддержание существующего уровня мощностей, для чего инициируются работы по ремонту существующих и замене устаревших основных фондов, а также по наращиванию мощностей, действующих ПХГ и сооружению новых.

Методы исследования

В ходе исследования деятельности филиалов ООО «Газпром ПХГ» и изучения существующих практик разработки, внедрения и мониторинга ключевых показателей эффективно-

сти (КПЭ) использованы методы теоретического, эмпирического и общелогического исследования.

Результаты

Для проведения мониторинга деятельности филиалов и в качестве одного из инструментов саморегулирования структурных подразделений проведен анализ существующих практик, составлены и внедрены в работу 11 КПЭ деятельности филиалов УАВРиКРС. КПЭ предложено сформировать в 3 блока (направления): производственно-экономический, квалификационный и блок безопасности. Таким образом, оценка результатов деятельности филиалов с помощью сбалансированного набора ключевых показателей эффективности позволяет сделать более результативной систему контроля за филиалами, наладить обратную связь и коррекцию деятельности в процессе реализации стратегических целей компании.

Ключевые слова: ключевые показатели эффективности, филиалы, подземные хранилища газа, эффективность деятельности, управление, оценка, производственно-хозяйственная деятельность, ремонт скважин, затраты, стратегия.

THE DRAFTING OF KEY PERFORMANCE INDICATORS OF ACTIVITY OF BRANCHES OF EMERGENCY AND RECOVERY OPERATIONS AND WORKOVER

Relevance

The development of the Russian fuel and energy complex largely depends on the reliable operation of the unified gas supply system (UGSS). Part of the UGSS is the country's network of underground gas storage facilities (UGS), which allow to smooth out seasonal unevenness of consumption, ensure reliable supply to consumers and timely fulfillment of contractual obligations for gas exports. In Russia, there are 23 UGS, for the reliable operation of which Gazprom UGS LLC is responsible, as an integral production part of the Gazprom Group.

Due to the obsolescence and wear of equipment and the need to replace it, the efficiency of well operation depends not only on the quality of UGS construction, but also on the timely implementation of current and major repairs, as well as the speed of emergency recovery operations. High-quality implementation of these measures increases the safety of all processes and increases the production capacity of wells. To perform these works in the Geology Department, Gazprom UGS LLC, there has been created a Department for organizing and controlling well construction, which controls branches of the Department of emergency and recovery operations and workover (DEROW).

Aim of research

To analyze the economic activities of one of the subsidiaries of PJSC Gazprom — Gazprom UGS LLC, whose priority is to carry out measures to increase the daily productivity of storage facilities, maintain the existing level of capacity, for which work is initiated to repair existing and replace outdated fixed assets, as well as to increase the capacity of existing UGS and build new ones.

Research methods

In the course of researching the activities of Gazprom UGS subsidiaries and studying existing practices for the development, implementation and monitoring of key performance indicators (KPIs), the methods of theoretical, empirical and general logical research are used.

Results

To monitor the activities of branches and as one of the tools for self-regulation of structural divisions, existing practices were analyzed, 11 key performance indicators (KPIs) of DEROW branches were compiled and implemented. KPIs are proposed to be formed in 3 blocks (areas): production and economic, qualification and security block. Thus, evaluating the performance of branches using a balanced set of key performance indicators makes it possible to make the system of control over branches more effective, establish feedback and correct activities in the process of implementing the company's strategic goals.

Keywords: key performance indicators, branches, underground gas storage, efficiency of activity, management, evaluation, production and economic activities, repair of wells, costs, strategy.

Введение

ООО «Газпром ПХГ» является дочерним обществом ПАО «Газпром», объединяющим в своей структуре практически все подземные хранилища газа (ПХГ), локализованные на территории России и обеспечивающие баланс в единой системе газоснабжения (ЕСГ) России [1].

В настоящее время ООО «Газпром ПХГ» эксплуатирует 23 хранилища, созданных в 27 геологических структурах [2]. Фонд арендуемых и собственных скважин составляет более 4500 единиц.

В составе Общества находятся 25 филиалов, которые размещены в основных районах потребления природного газа: от Калининградской области до Ханты-Мансийского автономного округа и от Ленинградской области до Ставропольского края [3]. Среди них 4 Управления аварийно-восстановительных работ и капитального ремонта скважин (УАВРиКРС).

Перед дочерним обществом стоит задача разработать показатели оценки эффективности деятельности филиалов УАВРиКРС.

На сегодняшний день ключевые показатели эффективности (КПЭ) являются инструментом, который позволяет оценить и наглядно представить результат эффективности деятельности компании в области реализации стратегии и программ инновационного развития [4].

КПЭ являются основанием для принятия ряда управленческих решений: премирование сотрудников, решение о реализации инвестиционного проекта, выход компании на новые рынки, ликвидация бизнеса и т.д.

Анализ

ООО «Газпром ПХГ» — единственное дочернее общество ПАО «Газпром», проводящее текущий и капитальный ремонт, реконструкцию, консервацию и ликвидацию, бурение скважин собственными силами филиалов УАВРиКРС.

УАВРиКРС осуществляют свою деятельность на следующих объектах:

«Башкирское УАВРиКРС» — Канчурино-Мусинского комплекса ПХГ (Республика Башкортостан), Совхозного ПХГ (Оренбургская область), Пунгинского

ПХГ (ХМАО-Югра), Карашурского ПХГ (Удмуртская Республика);

«Саратовское УАВРиКРС» — Елшанского, Песчано-Уметского, Степновского (Саратовская область), Волгоградского и Похвистневского (Самарская область) управлений подземного хранения газа;

«Московское УАВРиКРС» — Московского (г. Щелково), Калужского (г. Калуга), Невского (Новгородская область) и Касимовского (Рязанская область) управлений подземного хранения газа;

«Ставропольское УАВРиКРС» — Ставропольского, Краснодарского, Кушевского, Ленинградского управлений подземного хранения газа и Увязовской площади Касимовского управления подземного газа.

Работы по электро-химзащите выполняются Ставропольским и Саратовским УАВРиКРС.

Строительство скважин выполняется Ставропольским УАВРиКРС.

Как было выше отмечено, разработка КПЭ с целью оценки деятельности филиалов УАВРиКРС является одной из актуальных задач для ООО «Газпром ПХГ».

Согласно методическим указаниям, КПЭ — это оценочный критерий достижения цели, используемый для определения эффективности деятельности, поддающийся количественному измерению и являющийся значимым с точки зрения долгосрочных и среднесрочных задач [5].

Необходимо выделить блоки (направления) ключевых показателей с соответствующим обоснованием. Предлагаются следующие направления (таблица 1).

Разрабатываемые показатели должны соответствовать следующим требованиям: измеримость, прозрачность, достижимость, адресность, направленность на достижение целей компании, непротиворечивость, сопоставимость, объективность, адаптивность и структурированность [6].

Производственно-экономический блок является основным и должен объединять в себе такие показатели, как затраты на ремонты, количественные показатели ремонтов, непроизводительное время/время простоев, общая продолжительность работ.

Таблица 1. Ключевые показатели эффективности по направлениям**Table 1.** KPI by area

Направление	КПЭ
Производственно-экономические	Затраты на капитальный ремонт по статье хоз. способ
	Затраты на текущий ремонт по статье хоз. способ
	Выполнение плана капитального ремонта
	Выполнение плана текущего ремонта
	Непроизводительное время в общем времени капитального ремонта (с дополнительными работами)
	Непроизводительное время в общем времени текущего ремонта (с дополнительными работами)
	Общая продолжительность капитального ремонта (с дополнительными работами)
	Общая продолжительность текущего ремонта (с дополнительными работами)
	Средние затраты на 1 ч ремонтных работ хоз. способом
Безопасности	Частота аварий и инцидентов на производстве
Квалификационные	Численность работников, прошедших обучение по программам дополнительного профессионального образования, повышения квалификации, профессиональной переподготовки

Данный блок потенциально возможен к дополнению показателями своевременного вовлечения материально-технических ресурсов, энергосбережения.

К показателям безопасности в обязательном порядке следует относить количество аварий и инцидентов. При формировании данного показателя необходимо учитывать его прогнозируемо малое количественное выражение, поэтому целесообразно рассчитывать его в разрезе предыдущих десяти лет. Расчет планового показателя возможно вести исходя из не превышения суммарного числа инцидентов за прошедшие десять лет с учетом планового периода, таким образом стремясь к его снижению. Данный блок потенциально возможен к дополнению показателями экологической безопасности [7].

Квалификационный блок необходим с учетом обязательных требований к квалификации и аттестации работников для допуска к работам. В частности, допуск к работам на скважине невозможен без аттестации работника по курсу «Контроль скважины. Управление при ГНВП». Своевременное прохождение обучения является залогом своевременного и качественного исполнения планов капитального и текущего ремонтов.

Тем не менее, при формировании КПЭ стоит руководствоваться принципом необходимости и достаточности, так как они должны отражать именно ключевые аспекты производственно-хозяйственной деятельности.

Методика расчета ключевых показателей эффективности

Затраты на капитальный ремонт по статье хоз. способ:

$$\text{КПЭ}_1 = \text{З}_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где $\text{З}_{\text{кр}}$ — затраты на капитальный ремонт, выполняемый хоз. способом.

Затраты на текущий ремонт по статье хоз. способ:

$$\text{КПЭ}_2 = \text{З}_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $\text{З}_{\text{тр}}$ — затраты на текущий ремонт, выполняемый хоз. способом.

Выполнение плана капитального ремонта, шт. (факт/плану):

$$\text{КПЭ}_3 = \left(\frac{K_{1\text{факт}}}{K_{1\text{план}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $K_{1\text{факт}}$ — количество скважин, фактически законченных капитальным ремонтом, шт.;

$K_{1\text{план}}$ — количество скважин, планируемых капитальным ремонтом, шт.

Выполнение плана текущего ремонта, шт. (факт/плану):

$$\text{КПЭ}_4 = \left(\frac{K_{2\text{факт}}}{K_{2\text{план}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где $K_{2\text{факт}}$ — количество скважин, фактически законченных текущим ремонтом, шт.;

$K_{2\text{план}}$ — количество скважин, планируемых текущим ремонтом, шт.

Непроизводительное время в общем времени капитального ремонта (с дополнительными работами):

$$\text{КПЭ}_5 = \left(\frac{T_{\text{пр1}}}{T_{\text{отр1}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $T_{\text{пр1}}$ — общие часы простоев при капитальном ремонте (бр/ч);

$T_{\text{отр1}}$ — общее количество часов, фактически отработанных при капитальном ремонте с учетом дополнительного плана (бр/ч).

Непроизводительное время в общем времени текущего ремонта (с дополнительными работами):

$$\text{КПЭ}_6 = \left(\frac{T_{\text{пр2}}}{T_{\text{отр2}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где $T_{\text{пр2}}$ — общие часы простоев при текущем ремонте (бр/ч);

$T_{\text{отр2}}$ — общее количество часов, фактически отработанных при текущем ремонте с учетом дополнительного плана (бр/ч).

Общая продолжительность капитального ремонта (с дополнительными работами):

$$\text{КПЭ}_7 = T_{\text{кр}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{кр}}$ — количество отработанных часов при капитальном ремонте с учетом дополнительного плана (бр/ч).

Общая продолжительность текущего ремонта (с дополнительными работами):

$$\text{КПЭ}_8 = T_{\text{тр}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{тр}}$ — количество отработанных часов при текущем ремонте с учетом дополнительного плана (бр/ч).

Средние затраты на 1 ч ремонтных работ хоз. способом:

$$\text{КПЭ}_9 = \frac{З_p}{Q}, \quad (9)$$

где $З_p$ — затраты на ремонт, выполняемый хоз. способом:

$$З_p = З_{\text{кр}} + З_{\text{тр}}, \quad (9.1)$$

Q — продолжительность ремонтов, бр/ч:

$$Q = (T_{\text{кр}} + T_{\text{тр}}). \quad (9.2)$$

Частота аварий и инцидентов на производстве:

$$\text{КПЭ}_{10} = \frac{(N_i + N_{i-1} + \dots + N_{i-9})}{10}, \quad (10)$$

где N_i — общее количество аварий и инцидентов, зарегистрированных в текущем (i) году, шт.;

N_{i-1} — общее количество аварий и инцидентов, зарегистрированных в предыдущем ($i-1$) году, шт.

Численность работников, прошедших обучение по программам дополнительного

профессионального образования, повышения квалификации, профессиональной переподготовки:

$$\text{КПЭ}_{11} = N_{\text{дпо}}, \quad (11)$$

где $N_{\text{дпо}}$ — численность работников, прошедших обучение, чел.

Выводы

Внедрение разработанных показателей эффективности должно способствовать объективной оценке производственно-хозяйственной деятельности филиалов УАВРиКРС. Установка плановых значений и своевременная их корректировка является прерогативой администрации Общества для четкого целеполагания и доведения целей до каждого филиала.

Возможность корректировок должна быть предусмотрена, так как в течение года показатели могут меняться в силу ряда объективных причин. В качестве актуального примера возможно обозначить санитарно-эпидемиологическую ситуацию в регионе деятельности как УАВРиКРС так и Администрации общества. Изменившаяся санитарно-эпидемиологическая ситуация в регионе может стать причиной отклонения ряда показателей и будет являться корректным объяснением невыполнения плана при формировании отчетной документации о производственно-хозяйственной деятельности. Форма представления информации в обязательном порядке должна содержать в себе поле для комментариев — причин отклонений от плановых значений и пояснений. Вместе с тем логичнее будет Администрации произвести корректировку значения планового показателя. В таком случае при рассмотрении отчета о производственно-хозяйственной деятельности УАВРиКРС фактические показатели будут объективно коррелироваться с плановыми, что даст возможность делать точные выводы о причинах выполнения или невыполнения плана [8].

Ключевые показатели в составе отчета о производственно-хозяйственной деятельности станут концентрированным источником информации об эффективности УАВРиКРС и основой для принятия корректных управленческих решений.

Список литературы

1. Буравцов И.А., Кунафина Р.Р., Бачурина Н.М. Сравнительная оценка экономической целесообразности регулирования сезонной неравномерности потребления газа за счет подземных хранилищ газа и добычи газа // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2015. № 3 (23). С. 84-87.
2. Хранители газа / ПАО «Газпром». URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/reports/2016/gas-keepers> (дата обращения: 27.07.2020).
3. О компании / ООО «Газпром ПХГ». URL: <https://ugs.gazprom.ru/about> (дата обращения: 27.07.2020).
4. Жамкова В.С. Методология и инструментарий оценки эффективности деятельности наукоёмких госкомпаний с использованием системы ключевых показателей эффективности // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института). Серия: Социально-экономические науки. 2018. № 5. С. 27-38.
5. Методические указания по применению ключевых показателей эффективности государственными корпорациями, государственными компаниями, государственными унитарными предприятиями, а также хозяйственными обществами, в уставном капитале которых доля участия Российской Федерации, субъекта Российской Федерации в совокупности превышает пятьдесят процентов. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70528718> (дата обращения: 27.07.2020).
6. Гупаленко Д.Д., Русинов В.М. Проблемы внедрения ключевых показателей эффективности в вертикально-интегрированных производственных корпорациях // Проблемы экономики, науки и образования в контексте реализации мультидисциплинарного подхода: матер. науч. конф. аспирантов СПбГЭУ, 19 апреля 2019 г. / под науч. ред. д-ра экон. наук, проф. Е.А. Горбашко; редкол.: Н.Г. Иванова и др. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2019. С. 50-53.
7. Трифонов Ю.В., Брыкалов С.М., Трифонов В.Ю. Интеграция систем планирования с системами управления рисками на крупных предприятиях // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2019. Т. 10. № 2. С. 122-132.

8. Головецкий Н.Я., Михелашвили Т.Р. Преимущества и проблемы внедрения в организации системы управления на основе ключевых показателей эффективности // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Том 2. № 2. С. 12.

References

1. Buravtsov I.A., Kunafina R.R., Bachurina N.M. Sravnitel'naya otsenka ekonomicheskoi tselesoobraznosti regulirovaniya sezonnoi neravnomernosti potrebleniya gaza za schet podzemnykh khranilishch gaza i dobychi gaza [Comparative Assessment of the Feasibility of Regulating the Seasonal Unevenness of Gas Consumption due to Underground Gas Storage and Gas Production]. *Nauchno-tehnicheskii sbornik «Vesti gazovoi nauki» — Scientific and Technical Digest «Gas Science News»*, 2015, No. 3 (23), pp. 84-87. [in Russian].
2. *Khraniteli gaza* [Gas Keepers]. ПАО «Газпром». URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/reports/2016/gas-keepers> (accessed 27.07.2020). [in Russian].
3. *O kompanii* [About Company]. ООО «Газпром ПХГ». URL: <https://ugs.gazprom.ru/about> (accessed 27.07.2020). [in Russian].
4. Zhamkova V.S. Metodologiya i instrumentarii otsenki effektivnosti deyatel'nosti naukoemkikh goskompanii s ispol'zovaniem sistemy klyuchevykh pokazatelei effektivnosti [Methodology and Tools for Assessing the Effectiveness of Science-Intensive State-Owned Companies Using a System of Key Performance Indicators]. *Vestnik Yuzhno-Rossiiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Novocherkasskogo politekhnicheskogo instituta). Seriya: Sotsial'no-ekonomicheskie nauki — Bulletin of the South Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute). Series: Socio-Economic Sciences*, 2018, No. 5, pp. 27-38. [in Russian].
5. *Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu klyuchevykh pokazatelei effektivnosti gosudarstvennymi korporatsiyami, gosudarstvennymi kompaniyami, gosudarstvennymi unitarnymi predpriyatiyami, a takzhe khozyaistvennymi obshchestvami, v ustavnom kapitale kotorykh dolya uchastiya Rossiiskoi Federatsii, sub"ekta Rossiiskoi Federatsii v sovokupnosti prevyshaet pyat'desyat protsentov* [Methodological Guidelines for the Application

of Key Performance Indicators by State Corporations, state-owned companies, State Unitary Enterprises, as well as Business Companies, in the Authorized Capital of Which the share of Participation of the Russian Federation, a Constituent Entity of the Russian Federation in Aggregate Exceeds Fifty Percent]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70528718> (accessed 27.07.2020). [in Russian].

6. Gupalenko D.D., Rusinov V.M. Problemy vnedreniya klyuchevykh pokazatelei effektivnosti v vertikal'no-integrirovannykh proizvodstvennykh korporatsiyakh [Problems of Key Performance Indicators Introducing in Vertically Integrated Industrial Corporations]. *Materialy nauchnoi konferentsii aspirantov SPbGEU «Problemy ekonomiki, nauki i obrazovaniya v kontekste realizatsii mul'tidistsiplinarnogo podkhoda», 19 aprelya 2019 g.; pod nauch. red. d-ra ekon. nauk, prof. E.A. Gorbashko; redkol.: N.G. Ivanova i dr.* [Materials of the Scientific Conference of Graduate Students of St. Petersburg State University of Economics «Problems of Economics, Science

and Education in the Context of the Implementation of a Multidisciplinary Approach», April 19, 2019; under scientific. ed. Dr. econ. Sciences, prof. E.A. Gorbashko; editorial board: N.G. Ivanova e.a.]. Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGEU, 2019, pp. 50-53. [in Russian].

7. Trifonov Yu.V., Brykalov S.M., Trifonov V.Yu. Integratsiya sistem planirovaniya s sistemami upravleniya riskami na krupnykh predpriyatiyakh [Integration of Planning Systems with Risk Management Systems on Large Enterprises]. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment — Strategic Decisions and Risk Management*, 2019, Vol. 10, No. 2, pp. 122-132. [in Russian].

8. Golovetskii N.Ya., Mikhelashvili T.R. Preimushchestva i problemy vnedreniya v organizatsii sistemy upravleniya na osnove klyuchevykh pokazatelei effektivnosti [Advantages and Problems of Implementation of Kpi-Based Management System in the Organization]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» — Internet-Journal «Naukovedenie»*, 2017, Vol. 2, No. 2, pp. 12. [in Russian].



Moiseev I. S.
Моисеев И. С.

бакалавр кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация



Zhilenkov A. A.
Жиленков А. А.

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой киберфизических систем, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация



Enivatov V. V.
Ениватов В. В.

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовых энергетических установок, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация



Zinchenko A. A.
Зинченко А. А.

аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

УДК 519.876.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-81-89

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ РЕШЕНИЕ МЕТОДАМИ ВАРИАЦИОННЫХ ИНТЕГРАТОРОВ ГРУППЫ ЛИ

Актуальность

Сегодня моделирование является наиболее эффективным и низкоч затратным способом изучения динамики механических систем. В статье рассматриваются особенности моделирования двух видов механических систем — голономных и неголономных систем. В связи с тем, что кинетические связи в неголономных системах приводят к их некоторым особенностям, которые отличают их от голономных систем, появляется необходимость поиска иных методов моделирования динамики неголономных систем. В статье рассматриваются два таких метода, а именно метод вариационного интегрирования и метод интеграторов группы Ли. Анализируются подходы к их синтезу и преимущества перед иными методами.

Методы исследования

Вариационные интеграторы — класс дискретизации механических систем, которые получены путем дискретизации принципа стационарного действия Гамильтона. Они применимы в статье как к обыкновенным дифференциальным уравнениям, так и к уравнениям в частных производных, а также к консервативным и вынужденным задачам. В отсутствие принуждения они сохраняют (мульти) симплектические структуры, импульсы, возникающие из симметрий, и энергию с точностью до ограниченной погрешности.

В статье авторы применили фундаментальную теорию дискретной вариационной механики для обыкновенных дифференциальных уравнений подобного рода и применили теорию, которая используется в качестве основы для построения вариационных интеграторов и анализа. Структура исследования используется в качестве отправной точки для разработки нового класса методов асинхронного шага по времени для механики твердого тела, известного как асинхронно-вариационный метод. AVI методы изменяют временные интервалы между различными элементами в сетке конечных элементов с полностью независимыми и независимыми временными шагами, что позволяет моделировать локально с максимальной скоростью, допускаемой ограничениями локальной устойчивости. Приведены численные примеры AVI, демонстрирующие превосходные свойства, которыми они обладают благодаря их вариационному происхождению.

Результаты

Особое внимание уделяется построению функции Лагранжа и роли вариационного принципа Гамильтона при выводе уравнений структуры баланса. Представлена связь между симметриями функции Лагранжа и существованием инвариантов динамики наряду. Освещен проблемный аспект моделирования — дискретный аналог вариационного принципа Гамильтона, который обеспечивает систематическую процедуру построения дискретных приближений к точной траектории механической системы как в конфигурационном, так и в фазовом пространствах. Объясняются аппроксимационные свойства и геометрические характеристики полученных дискретных траекторий.

Ключевые слова: моделирование динамики механических систем, голономные системы, неголономные системы, вариационные интеграторы, интегратор групп Ли, моделирование.

SELECTED PROBLEMS OF MODELING THE DYNAMICS OF MECHANICAL SYSTEMS AND THEIR SOLUTION BY THE METHODS OF THE LIE GROUP VARIATIONAL INTEGRATORS

Relevance

Modeling is currently the most effective and low-cost way to study the dynamics of mechanical systems. This article discusses the features of modeling two types of mechanical systems, namely holonomic and nonholonomic systems. Examples of relationships in these systems are also considered. Due to the fact that kinetic connections in non-holonomic systems lead to certain features that distinguish them from holonomic systems, it becomes necessary to search for other methods for modeling the dynamics of non-holonomic systems.

Research methods

This article discusses two such methods, namely the method of variational integration and the method of Lie group integrators, describes the principles of their work and their advantages over other methods. Variational integrators are a class of discretizations for mechanical systems which are derived by discretizing Hamilton's principle of stationary action. They are applicable to both ordinary and partial differential equations, and to both conservative and forced problems. In the absence of forcing they conserve (multi-) symplectic structures, momenta arising from symmetries, and energy up to a bounded error. In the article, the authors applied the fundamental theory of discrete variational mechanics to ordinary differential equations in detail of the genus and applied the theory that is used as a basis for constructing variational integrators and analysis. The research framework is used as a starting point for the development of a new class of asynchronous time step methods for rigid body mechanics, known as the asynchronous variational method. AVI

methods alter the time intervals between different elements in a finite element mesh with fully independent and independent time steps, which allows simulations locally at the fastest speed allowed by local stability constraints. Numerical examples of AVIs are provided, demonstrating the superior properties they possess due to their variational origin.

Results

Particular attention is paid to the construction of the Lagrange function and the role of Hamilton's variational principle in deriving the equations of the balance structure. The connection between the symmetries of the Lagrange function and the existence of dynamic invariants alongside is presented. The problematic aspect of modeling is highlighted — a discrete analogue of Hamilton's variational principle, which provides a systematic procedure for constructing discrete approximations to the exact trajectory of a mechanical system in both configuration and phase spaces. The approximation properties and geometric characteristics of the obtained discrete trajectories are explained.

Keywords: modeling the dynamics of mechanical systems, holonomic systems, nonholonomic systems, variational integrators, Lie group integrator.

Введение

В настоящий момент мы имеем два основных способа исследования динамики механической системы: моделирование и физический эксперимент.

Если имеется опытная модель механической системы, то на ней можно поставить ряд испытаний с целью определения её характеристик, однако для определения различных показателей системы при разных режимах работы может понадобиться большое количество экспериментов и большие затраты времени и средств, к примеру на оснастку площадок для экспериментов, регулировку измерительных приборов, исследование и обработку полученных решений и т.д. Также возникает проблема того, что при физических экспериментах невозможно исследование всех необходимых динамических показателей, либо эксперимент может быть опасен сам по себе (рисунок 1).

Моделирование — это эффективный инструмент, позволяющий проводить любое количество экспериментов и получать любые необходимые показатели динамической системы [1–3]. Он даёт точный анализ систем, при этом требуя минимальные затраты. Разберём особенности моделирования двух видов механических систем.

Рассмотрим механическую систему. Конфигурацию нашей механической системы опишем вектором координат $q \in Q$. Пространство конфигураций Q — это n -мерное гладкое многообразие. Для $q(t) \in Q$ обобщённая скорость — это вектор \dot{q} . Механическая система может быть ограни-

чена во многих случаях, например из-за своей конструкции или из-за того, как она движется и управляется. Ограничения могут быть двухсторонними и односторонними, зависеть от времени или нет. Мы же рассмотрим ограничения голономные и неголономные.

Голономные системы

Ограничения, которые могут быть заданы в виде

$$f_i(q) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k < n), \quad (1)$$

являются голономными связями.

Система же, которая имеет только голономные ограничения, имеет название голономной системы [3–5]. Смысл ограничений, описанных в (1), заключается в том, чтобы лимитировать конфигурации системы $(n-k)$ -мерным гладким многообразием Q .

Для моделирования таких систем используется подход, при котором сохраняются уравнения связи как таковые, и решается система дифференциальных-алгебраических уравнений.

Голономные ограничения зачастую вводятся механическим связями между различными телами системы.

Примером такой системы может являться математический маятник (рисунок 2).

В данном случае голономной связью является нить, длина которой изменяется по некоторому закону.

Задача исследования динамики голономной системы является более простой, чем неголономной, по причине того, что для её решения имеется возможность пользоваться множеством методов и теорем, а именно уравнение Лагранжа, уравнение Гамильтона и т.д.

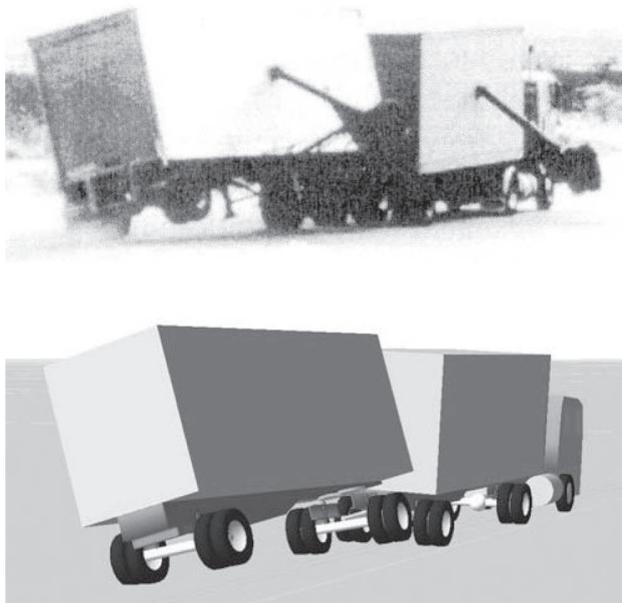


Рисунок 1. Проведение физических экспериментов (сверху), связанных с опасностью и требующих дополнительного оборудования в виде аутригера, и компьютерное моделирование (снизу)

Figure 1. Conducting physical experiments (top) associated with danger and requiring additional equipment in the form of an outrigger and computer simulation (bottom)

Проблемы моделирования динамики неголономных систем

Ограничения, выражения которых включают обобщённые координаты и скорости в виде

$$p_i(q)\dot{q} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k < n), \quad (2)$$

называются кинематическими связями. Они ограничивают обобщённые скорости, которые могут быть достигнуты при выбранных конфигурациях.

Естественно, что голономные связи также учитывают наличие кинематических связей в виде

$$\frac{\partial f_i}{\partial q} \dot{q} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (3)$$

Но не всегда верно обратное, так как может получиться, что кинематические связи невозможно проинтегрировать, то есть невозможно представить в форме (1). Тогда данные связи именуются неголономными. Наличие этих связей приводит к тому, что происходит ограничение подвижности совершенно иначе, чем в случае с голономными связями. Также заметим, что при наличии неголономных связей k в механической

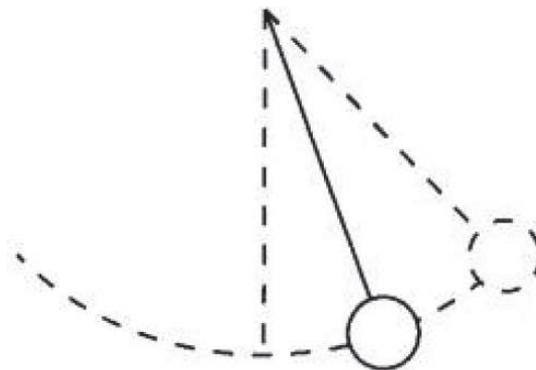


Рисунок 2. Математический маятник
Figure 2. Mathematical pendulum

системе с n обобщёнными координатами, хотя обобщённые скорости ограничены в каждой точке $(n-k)$ -мерным подпространством, доступность всего пространства конфигураций остаётся неизменной [5, 6].

Неголономные ограничения возникают при моделировании во многих областях, например в робототехнике (мобильные роботы, космические роботы-манипуляторы и т.д.) или, например, при создании модели транспортных средств (вертолёт, автомобиль, лодок, и т.д.).

Так как неголономные связи накладывают не только геометрические (голономные) ограничения, но и кинетические, то такие системы определены на многообразии

$$Q = M \times G,$$

где M — пространство форм;

G — групповой компонент.

Групповой компонент G описывает положение и ориентацию в пространстве моделируемого тела, как и в случае голономных связей, в то время как пространство форм M описывает внутренние переменные (например направление поворота колёс автомобиля).

Рассмотрим пример неголономной системы в виде катящегося диска (рисунок 3).

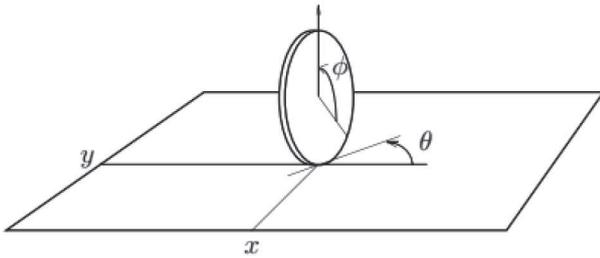


Рисунок 3. Катящийся диск
Figure 3. Rolling disc

Данный диск катится без скольжения по плоскости. Его конфигурация характеризуется такими переменными, как [7–9]:

- координаты (x, y) , которые указывают на точку контакта диска с поверхностью;
- угол θ , демонстрирующий направленность относительно оси x ;
- угол φ , который находится между вертикальной осью и выбранной радиальной осью на диске.

Из-за ограничения в виде условия отсутствия скольжения обобщённые скорости системы не могут принимать произвольное значение. В частности, имея радиус круга диска r , они должны удовлетворять ограничениям (4), тем самым указывая на необходимость, чтобы скорость центра диска находилась в средней плоскости диска:

$$\begin{aligned} \dot{x} - r \times \cos \theta \dot{\varphi} &= 0 \\ \dot{y} - r \times \sin \theta \dot{\varphi} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Мы не можем проинтегрировать данные кинематические условия, и, как итог, они не ограничивают возможные конфигурации диска. Чтобы удостовериться в этом, продемонстрируем два простых шага, которые всегда позволят нам перевести наш диск из конфигурации $(x_1, y_1, \theta_1, \varphi_1)$ в конфигурацию $(x_2, y_2, \theta_2, \varphi_2)$:

Первым шагом необходимо прокрутить диск, пока точка контакта с плоскостью из координат (x_1, y_1) не переместится в координаты (x_2, y_2) , которые находятся на выбранной кривой длиной (5)

$$r \times (\varphi_2 - \varphi_1 + 2k\pi), \quad (5)$$

где k — это любое число, целое и неотрицательное.

Вторым шагом мы переворачиваем диск вокруг вертикальной оси от угла θ_1 до угла θ_2 .

Возможность осуществления данного алгоритма свидетельствует о неголономности двух ограничений (4), накладываемых на передвижения диска.

Источники возникновения неголономных связей

В данном разделе для большего понимания проблемы неголономных ограничений рассмотрим возможные источники кинетических связей.

Выделим три разных вида источника неголономии, а именно: качение без проскальзывания, сохранение углового момента в многотельных системах, а также специальное управление у робототехнических устройств.

И для начала приведём характерные примеры для первого вида источников неголономии [9–11]:

- трение качения, возникающие между колёсами и плоскостью при движении колёсных роботов и некоторых категорий транспортных средств;
- ограничения при сложных манипуляциях роботизированной рукой, возникающие из-за скользящего контакта кончиков пальцев с предметами.

Второй вид, которому присущи неголономные связи, возникает в системах с множеством тел, которые не имеют фиксированной структуры. В таких системах сохранение углового момента привносит дифференциальную связь, которая не интегрируема. Как пример можно привести:

- роботы-манипуляторы в космических конструкциях;
- спутники с реактивными дисками (маховиками), которые используются для стабилизации траектории;
- прыгающие роботы в фазе полёта.

И третий вид, появляющийся при особой операции управления, применяемой в некоторых робототехнических структурах, может быть продемонстрирован на следующих примерах:

- подводные робототехнические системы, в которых ход вперёд разрешён только по указанному курсу;
- роботы-манипуляторы с одним или рядом пассивных суставов.

Отметим, что в данном случае неголономное поведение обусловлено доступной системой или избранной стратегией работы определённых элементов.

Так как иногда кинематические связи невозможно проинтегрировать, необходимо искать иные способы моделирования неголономных систем. Для этого можно использовать метод вариационного интегрирования, который полезен не только в неголономных системах, но также может быть эффективно использован при системе с голономными связями. Рассмотрим принцип его работы и преимущества.

Метод вариационного интегрирования

Обычно для моделирования используются вычислительные интеграторы, которые «продвигают» модель механической системы вперёд по времени. Использование данных интеграторов во многих случаях сводится к дискретизации дифференциальных уравнений, с помощью которых можно охарактеризовать траекторию передвижения механической системы. Это приводит к вычислению каждого следующего состояния во времени. Рассмотрим интеграторы, отличие которых в том, что они основаны на идее дискретизации геометрических вариационных принципов.

Идея вариационных интеграторов заключается в том, что схема временного шага должна выводиться из вариационного принципа, а не из результирующих дифференциальных уравнений. Главным среди вариационных принципов является принцип Гамильтона, идеей которого является, что путь q_i (с конечными точками q_{i0} и q_{i1}), пройденный механической системой, преобразует интеграл действия (6), то есть интеграл лагранжиана системы, равный разнице кинетической и потенциальной энергии системы.

$$\int_{t_0}^{t_1} \mathcal{L}(q, \dot{q}) dt. \quad (6)$$

Если говорить практически, то вариационные интеграторы, которые берут за основу принцип Гамильтона, сперва аппроксимируют интеграл по времени непрерывного лагранжиана квадратурой, функцией двух идущих подряд состояний q_k и q_{k+1} (соответствующих времени t_k и t_{k+1}) вида:

$$L(q_k, q_{k+1}) \approx \int_{t_k}^{t_{k+1}} \mathcal{L}(q(t), \dot{q}(t)) dt. \quad (7)$$

Используя данный «дискретный лагранжиан», можно сформулировать дискретный принцип для некоторой траектории $\{q_0, \dots, q_n\}$, определяемой последовательными положениями системы в моменты времени $t_k = kh$. Этот дискретный принцип требует, чтобы выполнялось тождество [4, 7, 9]:

$$\delta \sum_{k=0}^{N-1} L(q_k, q_{k+1}) = 0, \quad (8)$$

где вариации берутся относительно каждого положения q_k на траектории.

Следовательно, если мы используем P_i для обозначения частной производной по i -ой переменной, мы должны иметь (9) для каждого из трёх положений q_{k-1} , q_{k+1} , q_k системы:

$$P_2 L(q_{k-1}, q_k) + P_1 L(q_k, q_{k+1}) = 0. \quad (9)$$

Следовательно, получаем, что это уравнение лежит в основе структуры интегрирования, которые высчитывают q_{k+1} , применяя два предшествующих значения q_k и q_{k-1} .

Приведём пример. Возьмём непрерывный лагранжиан вида (10), определим дискретный лагранжиан (11) и воспользуемся обозначением (12).

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} - V(q), \quad (10)$$

где V — потенциальная функция;

$$L(q_k, q_{k+1}) = h \mathcal{L} \left(q_{k+\frac{1}{2}}, \frac{q_{k+1} - q_k}{h} \right), \quad (11)$$

$$q_{k+\frac{1}{2}} = \frac{q_k + q_{k+1}}{2}. \quad (12)$$

В результате уравнение будет иметь вид (13), что является дискретным аналогом закона Ньютона (14):

$$M \frac{q_{k+1} - 2q_k + q_{k-1}}{h^2} = -\frac{1}{2} (\nabla V(q_{k-\frac{1}{2}}) + \nabla V(q_{k+\frac{1}{2}})), \quad (13)$$

$$M \ddot{q} = -\nabla V(q). \quad (14)$$

Этот пример очень просто обобщается путём замены $q_{k+1/2}$ на (15) как квадратурной точки, которая используется для аппроксимации дискретного лагранжиана:

$$q_{k+\omega} = (1-\omega) \times q_k + \omega q_{k+1}. \quad (15)$$

Может показаться, что использование вариационных интеграторов мотивировано

только с математической точки зрения, но интеграторы, учитывающие вариационные свойства, показывают результаты лучше, улучшая числовые показатели и предотвращая многие практические проблемы.

В первую очередь, вариационные интеграторы достаточно точно сохраняют линейный и угловой моменты, гарантируя хорошее сохранение энергии в ходе экспоненциально продолжительного времени моделирования.

Во-вторых, интегралы любой точности могут быть получены обычной корректировкой квадратурных принципов.

В-третьих, вариационные интеграторы сохраняют в целостности симплектическую структуру системы, вследствие чего значительно улучшается обработка затуханий, которая практически не зависит от временного шага.

Вариационные интеграторы группы Ли

Выше мы уже указывали на то, что все классические интеграторы, включая также только что рассмотренные нами вариационные, в основе своей содержат идею продвижения численного решения вперёд по времени, при этом добавляя к его конфигурации некоторое значение смещения [9–11].

Тем не менее, некоторые системы имеют более сложные пространства конфигураций, к примеру абсолютно твёрдые тела, конфигурационное пространство которых представлено группой Ли $SE(3)$, именуемой евклидовой группой твёрдых движений. Представитель данной группы, как правило, описан в виде вектора и кодирует матрицу вращения, в то время как группа ($\in SO(3)$) используется для кодировки ориентации. Группа $SE(3)$, элементы $se(3)$ (которые являются бесконечно малыми элементами $SE(3)$, то есть могут быть представлены как моментальные винтовые движения) сопряжённой с ней алгебры Ли и экспоненциальное отображение могут быть продуктивно применены в моделировании.

Говоря условно, интеграторы групп Ли сохраняют инвариантность движения и групповую структуру для систем с конфигурационным пространством группы Ли G . Алгебра Ли g , которая связана с пространством G ,

целью своей имеет кодирование обобщённой скорости и ускорения (следовательно то же самое и для обобщённых импульсов и сил).

Наряду с тем, что группы Ли ассоциируются с гладкими многообразиями, связанные с ней алгебры предполагают более простые, в сравнении, линейные пространства. Это знание упрощает интегрирование скорости даже для криволинейного пространства конфигураций. Интеграторы группы Ли нередко выражают изменённую конфигурацию в виде отображения, которое демонстрирует изменение в группе в терминах элементов её в алгебре Ли. Данное отображение именуется групповым разностным отображением и обозначать мы его будем символом τ .

Первые попытки использования отображения для задач интеграции проводились с помощью широко известного экспоненциального отображения. С той поры было доказано, что с помощью удержания структуры Ли и инвариантов движения при дискретизации можно значительно улучшить численные методы, которые при этом сохраняют верную динамику (даже при длительном интегрировании) и демонстрируют повышенную точность.

Применим ранее использованное обозначение для конфигурационного многообразия $Q = M \times G$, где G — группа Ли (с алгеброй Ли g). В случае, например, динамики некоторого транспортного средства (например, траектория движения автомобиля, ограниченная текущим углом поворота передних колёс) $G = SE(3)$ представляет из себя группу движений твёрдых сочленённых тел, а M — пространство внутренних переменных этого же транспортного средства.

Отметим, что состояние транспортного средства в данном случае целиком и полностью определяется точкой $q \in Q$ и его скоростью $\dot{q} \in T_q Q$ ($T_q Q$ в данном случае является касательным пространством к Q в точке q). Сутью же интеграторов групп Ли является то, что необходимо получить уравнение на приведённом пространстве $TQ \times g$ с помощью уравнения движения из изначального состояния TQ . Получается это путём перевода TQ в начало координат и формулировкой его в алгебре g . Полученное данным

путём пространство линейно, поэтому можно использовать стандартные методы интегрирования.

Обратное преобразование к τ применяют для отображения кривых в алгебре обратно в группу. Для осуществления этого преобразования для любой группы Ли G обычно оперируют двумя стандартными типами групповых разностных отображений τ :

— Экспоненциальное отображение $\exp: \mathfrak{g} \rightarrow Q$, определяемое выражением $\exp(\xi) = \gamma(1)$, с $\gamma: R \rightarrow Q$ является интегральной кривой через тождество векторного поля, связанного с $\xi \in \mathfrak{g}$ (следовательно, с $\dot{\gamma}(0) = \xi$);

— Канонические координаты второго рода $cck: \mathfrak{g} \rightarrow Q$ $cck(\xi) = \exp(\xi^1 e_1) \times \exp(\xi^2 e_2) \times \dots \times \exp(\xi^n e_n)$, где $\{e_j\}$ — базис алгебры Ли.

Продемонстрируем ещё одно отображение τ , именуемое отображением Кэли, но сразу заметим, что оно справедливо не для каждого случая, а только для ряда матричных групп. Применяется оно для матричных групп, которые используют такие группы жёсткого движения, как $SO(3)$, $SE(2)$ и $SE(3)$:

$$\text{cay}: \mathfrak{g} \rightarrow G, \text{cay}(\xi) = \left(e - \frac{\xi}{2}\right)^{-1} \left(e + \frac{\xi}{2}\right). \quad (16)$$

Хотя данное отображение даёт только приближение к интегральной кривой, определённой с помощью \exp , было решено включить её, потому что она очень проста в исчислении, и, таким образом, приводит к более эффективной реализации.

Возможны и другие подходы, например с использованием ретракции и других безкоммутаторных методов. Однако мы ограничимся тремя вышеупомянутыми отображениями.

Список литературы

1. Ланцош К. Вариационные принципы механики. М.: Мир, 1965. 408 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 736 с.
3. Неймарк Ю.И., Фуфаев Н.А. Динамика неголомных систем. М.: Наука, 1967. 519 с.
4. Zhilenkov A.A. High Productivity Numerical Computations for Gas Dynamics Modelling Based on DFT and Approximation.

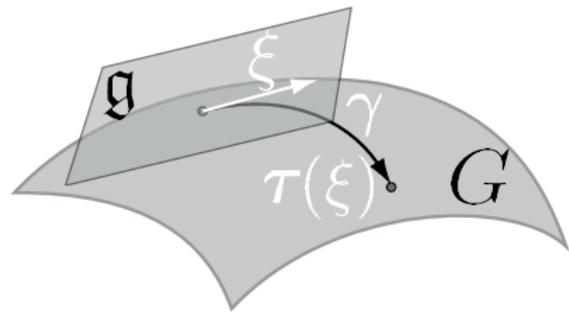


Рисунок 4. Пространство группы Ли G
Figure 4. Space of the Lie group G

Выводы

Нами рассмотрены особенности моделирования динамики движения двух классов механических систем: голономных и неголономных.

Учитывая особенности неголономных систем, было предложено рассмотреть способы, отличающиеся от методов, подразумевающих решения систем дифференциальных-алгебраических уравнений классическими интеграторами.

Рассматриваемые методы имеют название метода вариационного интегрирования и метода интегрирования групп Ли, которые в основе своей предполагают использование вариационных принципов. Они имеют ряд преимуществ перед другими методами, данные преимущества также были описаны.

Дальнейшая работа в рамках этой темы подразумевает более подробное рассмотрение метода вариационного интегрирования и метода групп Ли и дальнейшее построение моделей динамики движения механических систем с помощью полученных знаний.

2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018. 400-403. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317117.

5. Sokolov S.S., Zhilenkov A.A., Chernyi S.G., Nyrkov A.P., Mamunts D.G. Dynamics Models of Synchronized Piecewise Linear Discrete Chaotic Systems of High Order // Symmetry. 2019. Vol. 11. No. 2. P. 236.

6. Марсден Д.Э., Уэст М. Дискретная механика и вариационные интеграторы // Acta Numerica. 2001. С. 357-514.

7. Ivanov A.V., Zhilenkov A.A. (2018). The Use of IMU MEMS-Sensors for Designing of Motion Capture System for Control of Robotic Objects // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018. P. 890-893.

8. Бизяев И.А., Борисов А.В., Мамеев И.С. Динамика саней Чаплыгина на цилиндре // Нелинейная динамика. 2016. № 12 (4). С. 675-687.

9. Вынгра А.В., Комиссаров Д.Р., Черный С.Г. Физическое моделирование автоматизированной системы управления креном судна // Системы управления и обработки информации. 2020. № 3 (50). С. 40-49.

10. Chernyi S.G., Vyngra A.V., Erofeev P., Novak B.P. Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems // Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019. 2020. С. 2164-2171.

11. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Automatic Estimation Of Defects In Composite Structures as Disturbances Based on Machine Learning Classifiers Oriented Mathematical Models with Uncertainties // Journal of Information Technologies and Computing Systems. 2020. No. 3. P. 13-29.

References

1. Lantsosh K. *Variatsionnye printsipy mekhaniki* [Variational Principles of Mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1965. 408 p. [in Russian].

2. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: v 10 t.* [Theoretical Physics: in 10 vol.]. Moscow, Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. 736 p. [in Russian].

3. Neimark Yu.I., Fufaev N.A. *Dinamika negolomnykh system* [Dynamics of Non-Breaking Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 519 p. [in Russian].

4. Zhilenkov A.A. High Productivity Numerical Computations for Gas Dynamics Modelling Based on DFT and Approximation. *2018 IEEE Conference of Russian Young Re-*

searchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018, pp. 400-403. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317117.

5. Sokolov S.S., Zhilenkov A.A., Chernyi S.G., Nyrkov A.P., Mamunts D.G. Dynamics Models of Synchronized Piecewise Linear Discrete Chaotic Systems of High Order. *Symmetry*, 2019, Vol. 11, No. 2, pp. 236.

6. Marsden D.E., Uest M. Diskretnaya mekhanika i variatsionnye integratory [Discrete Mechanics and Variational Integrators]. *Acta Acta Numerica*, 2001, pp. 357-514. [in Russian].

7. Ivanov A.V., Zhilenkov A.A. The Use of IMU MEMS-Sensors for Designing of Motion Capture System for Control of Robotic Objects. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 890-893.

8. Bizyaev I.A., Borisov A.V., Mameev I.S. Dinamika sanei Chaplygina na tsilindre [Dynamics of Chaplygin Sleigh on a Cylinder]. *Nelineinaya dinamika — Nonlinear Dynamics*, 2016, No. 12 (4), pp. 675-687. [in Russian].

9. Vyngra A.V., Komissarov D.R., Chernyi S.G. Fizicheskoe modelirovanie avtomatizirovannoi sistemy upravleniya krenom sudna [Physical Simulation of Automated System of Vessel's List Control]. *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii — Control Systems and Information Processing*, 2020, No. 3 (50), pp. 40-49. [in Russian].

10. Chernyi S.G., Vyngra A.V., Erofeev P., Novak B.P. Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime System. *Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019*, 2020, pp. 2164-2171.

11. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Automatic Estimation of Defects in Composite Structures as Disturbances Based on Machine Learning Classifiers Oriented Mathematical Models with Uncertainties. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2020, No. 3, pp. 13-29.



Комиссаров Д. Р.

Komissarov D. R.

аспирант 2-го курса по направлению подготовки

13.06.01 «Электро- и теплотехника», инженер кафедры

«Электрооборудование судов и автоматизации производства»,

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской

технологический университет»,

г. Керчь, Российская Федерация

УДК 519.7

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-90-96

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПИСКА ВАКАНТНЫХ ДОЛЖНОСТЕЙ

Актуальность

Решение задач, на котором базируются сведения, накопленные специалистами в своей области рассматриваемой проблемы, осуществляется с помощью экспертных систем. Преимуществом является возможность в сложных обстоятельствах принимать целесообразное решение, в которых заведомо неизвестен алгоритм действий и который формируется из исходных данных в виде структурной цепочки рассуждений из накопленных сведений.

Цель работы

Целью работы является тестирование профессиональных, деловых и психологических качеств, способствующих развитию списка вакантных постов, на которые претендует кандидат с необходимыми накопленными знаниями в сфере компетентности.

Методы исследования

Автором был использован Пролог — логический программируемый язык, связывающий искусственный интеллект и компьютерную лингвистику для решения задач касательно взаимоотношений между объектами.

Результаты

В ходе работы была разработана система искусственного интеллекта. Применение данной системы искусственного интеллекта поможет в разнообразных отраслях народного хозяйства облегчить труд человека в выборе кандидата на отобранную должность и уменьшить число ошибок, совершаемых при принятии решений. Интеллектуальная система тестирует деловые и психологические качества и проверяет на компетентность кандидата на отобранную должность.

Ключевые слова: искусственный интеллект, экспертная система, функциональная модель, конъюнкция, дизъюнкция.

DESIGNING AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM FOR FORMING A LIST OF VACANCIES

Relevance

The solution of problems on which the information accumulated by specialists in their field of the problem under consideration is based is carried out using expert systems. The advantage is the ability to make an appropriate decision in difficult circumstances, in which the algorithm of actions is obviously unknown and which is formed from the initial data in the form of a structural chain of reasoning from the accumulated information. The purpose of the work is to test professional, business and psychological qualities that contribute to the development of the list of vacant positions that can be claimed by a candidate who has applied to the company's human resources department.

Aim of research

The aim of the work is to test professional, business and psychological qualities that contribute to the development of a list of vacant posts for which a candidate applies with the necessary accumulated knowledge in the field of competence.

Research methods

The author used Prolog, a logical programmable language that connects artificial intelligence and computational linguistics to solve problems regarding the relationship between objects.

Results

In the course of the work, an artificial intelligence system was developed. The use of this artificial intelligence system will help in various sectors of the national economy to facilitate the work of a person in choosing a candidate for a selected position and reduce the number of mistakes made when making decisions. The intellectual system tests business and psychological competence of the candidate for the selected position.

Keywords: artificial intelligence, expert system, functional model, conjunction disjunction.

Актуальность работы

Решение задач, на котором базируются сведения, накопленные специалистами в своей области рассматриваемой проблемы, осуществляется с помощью экспертных систем [1–6]. Преимуществом является возможность в сложных обстоятельствах принять целесообразное решение, в которых заведомо неизвестен алгоритм действий и который формируется из исходных данных в виде структурной цепочки рассуждений из накопленных сведений.

Целью работы является тестирование профессиональных, деловых и психологических качеств, способствующих развитию списка вакантных постов, на которые претендует кандидат с необходимыми накопленными знаниями в сфере компетентности.

Материалы исследования

Проектируя интеллектуальную систему, серьезное внимание было уделено знаниям, реализующим подход поиска решений, а именно какие конкретные данные нужны для определенной ситуации [7]. И неотъемлемой частью для нормальной работы интеллектуальной системы (ИС) является умение правильно распорядиться им. Для решения таких проблем нужно иметь много практики в планировании и управлении нужными вопросами для того, какой тест выполнить.

Использование разных методов и алгоритмов оказывает существенное влияние на параметры эффективной программы. Такие стратегии устанавливают поиск решений проблемы в некотором пространстве альтернатив. В разных режимах управления использовано большинство формализмов представления знаний.

Пролог — это логически программируемый язык, связывающий искусственный интеллект и компьютерную лингвистику для решения

задач касательно взаимоотношений между объектами и состоит из следующих этапов

1. Установление определенных списков фактов об объектах и связь между ними;
2. Нахождение некоторых правил об объектах и отношениях между ними;
3. Построение вопросов об объектах и их взаимодействиях.

Совокупность фактов образует в Прологе БД. Имея совокупность некоторых фактов, можно обращаться к Прологу с вопросами. В Прологе, как и в других языках, могут применяться переменные. В таком случае Пролог просматривает БД в поисках факта, сопоставимого с запросом, и выдает такие факты в том порядке, в котором они вводились [8].

Идентификация проблемной области

Назначение интеллектуальной системы решает вопросы в формировании списка вакантных должностей, на которые претендует кандидат с необходимыми накопленными знаниями в сфере компетентности.

При этом тестируются все необходимые качества, подтверждающие профессионализм кандидата в нужной сфере деятельности. По базе накопленных данных осуществляется проверка для отобранных должностей, назначается вакансия, которой в полной мере удовлетворяет кандидат. Структурный отчет параметров проблемной области представлен в таблице 1.

Концептуальная модель проблемной области

Концептуальная модель взятой области представляет множество классов данных отношений и операций. Классы объектов определяются некоторым набором параметров. Данные представлены в виде стандартных баз данных (database) языка Пролог. Графическое обозначение факторов зависи-

Таблица 1. Структурный отчет параметров проблемной области

Table 1. Structural report of the problem area parameters

№	Ожидаемые результаты	Подцели	Исходные данные (факторы)	
1	“GD”, “GB”, “Mg” cf100	Профессиональные качества – profk.	Образование – obr.	
2	“GB”, “Mg” cf80	Деловые качества – delk.	Опыт работы – oprs.	
3	“GB” cf40, “Mg” cf60	Психологические качества – psihk.	Стаж – stag.	
4	“Mg” cf80		Доп. образование – dopobr.	
5	“Mg” cf40		Опыт администр. работы – opadr.	
6			Карьерный рост – kar.	
7			Коммуникабельность – kom.	
8			Стрессоустойчивость – stress.	
№	Назначение	Сфера применения	Класс решаемых проблем	Цель
1	Автоматизация работы экспертов по принятию решений	Подбор кадров	Прогнозирование	Вакансии – VAK

мости отображается в виде структурной цепи и граф «И»-«ИЛИ», в которой иерархическим образом построены подчинение вершины, условие конъюнкции и дизъюнкции (рисунок 1).

Формализация базы знаний

Формулы дизъюнктивно связанных аргументов или конъюнктивно при объединении факторов уверенности используют операторы «+=», которые означают добавление значений, и операторы «-=» для их удаления:

Конъюнкция (A и B) : $\min(cfA, cfB)$ или $\frac{cfA \cdot cfB}{100}$.

Дизъюнкция (A или B): $\max(cfA, cfB)$ или $cfA + cfB - \frac{cfA \cdot cfB}{100}$.

Формула факторов уверенности имеет вид:
 $cfA \cdot \frac{100 - cfB}{100}$.

В таблице 2 представлен программный код факторов уверенности на Prolog. Первая и вторая страницы реализации ИС на Prolog приведены на рисунках 2 и 3.

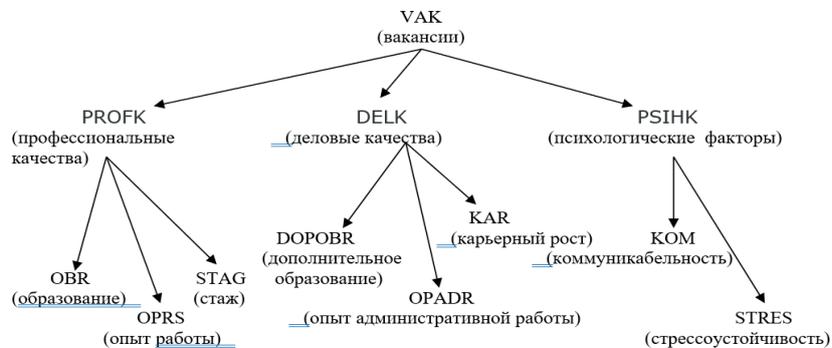


Рисунок 1. Графическое обозначение факторов зависимости

Figure 1. Graphic designation of dependency factors

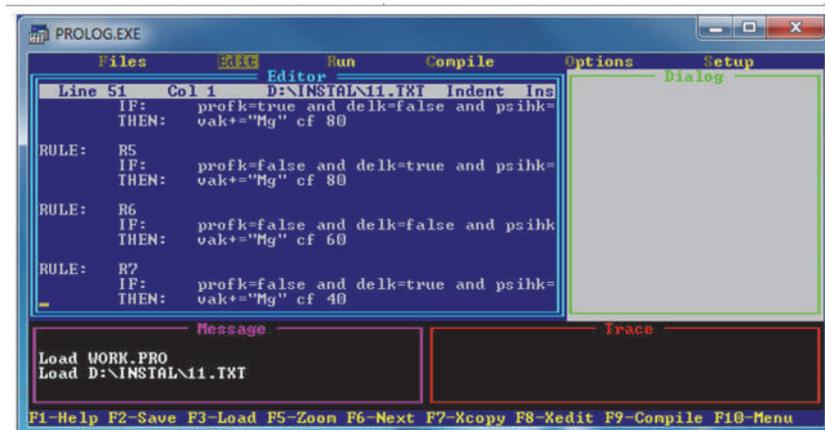


Рисунок 2. Первая страница реализации ИС на Prolog

Figure 2. The first page of the system implementation in Prolog

Таблица 2. Программный код факторов уверенности на Prolog

Table 2. Program code of confidence factors in Prolog

R1 IF: profk=true and delk=true and psihk=true THEN: vak+={"GD","GB","Mg"} cf 100	R14 IF: obr="ss" and oprs<2 and stag>=2 THEN: profk=true
R2 IF: profk=true and delk=true and psihk=false THEN: vak+={"GB" cf 80,"Mg"} cf 80	R15 IF: obr="ss" and stag<2 THEN: profk=true
R3 IF: profk=true and delk=false and psihk=true THEN: vak+={"GB" cf 40,"Mg"} cf 60	R16 IF: obr="ss" and oprs<2 and stag<2 THEN: profk=false
R4 IF: profk=true and delk=false and psihk=false THEN: vak+="Mg" cf 80	R17 IF: dopobr="+" and opadr="+" and kar="+" THEN: delk=true
R5 IF: profk=false and delk=true and psihk=true THEN: vak+="Mg" cf 80	R18 IF: dopobr="+" and opadr="+" and kar="-" THEN: delk=true
R6 IF: profk=false and delk=false and psihk=true THEN: vak+="Mg" cf 60	R19 IF: dopobr="+" and opadr="-" and kar="+" THEN: delk=true
R7 IF: profk=false and delk=true and psihk=false THEN: vak+="Mg" cf 40	R20 IF: dopobr="+" and opadr="-" and kar="-" THEN: delk=true
R8 IF: profk=false and delk=false and psihk=false THEN: vak+="Mg" cf 40	R21 IF: dopobr="-" and opadr="+" and kar="+" THEN: delk=true
R9 IF: obr="v" and oprs>=2 and stag>=2 THEN: profk=true	R22 IF: dopobr="-" and opadr="-" and kar="+" THEN: delk=true
R11 IF: obr="v" and oprs<2 and stag>=2 THEN: profk=true	R23 IF: dopobr="-" and opadr="+" and kar="-" THEN: delk=true
R12 IF: obr="v" and stag <2 THEN: profk=true	R24 IF: dopobr="-" and opadr="-" and kar="-" THEN: delk=false
R13 IF: obr="ss" and oprs>=2 and stag>=2 THEN: profk=true	

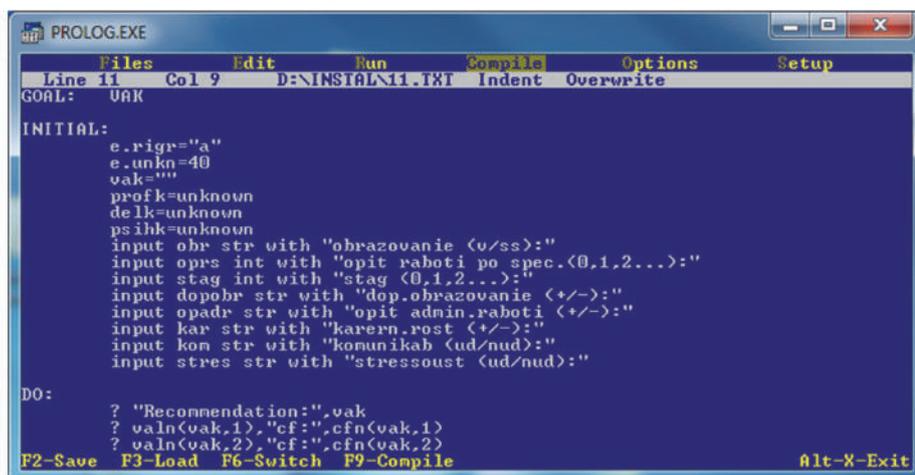


Рисунок 3. Вторая страница реализации ИС на Prolog

Figure 3. The second page of the system implementation in Prolog

Реализация интеллектуальной системы

Доработка кода программных механизмов представляет собой отображение структурной базы сведений в среде выбранного инструментального средства (таблица 3).

Тестирование интеллектуальной системы.

Тестирование оценивает ИС как группу критериев точности и полезности. На рисунке 4 видно правильное заключение ИС, адекватности сведений рассматриваемой области и соответствие методов решения.

Таблица 3. Код программных механизмов на Prolog**Table 3.** Code of program mechanisms in Prolog

GOAL: VAK	
INITIAL: e.rigr="a" e.unkn=40 vak="" profk=unknown delk=unknown psihk=unknown input obr str with "obrazovanie (v/ss):" input oprs int with "opit raboti po spec.(0,1,2...):" input stag int with "stag (0,1,2...):" input dopobr str with "dop.obrazovanie (+/-):" input opadr str with "opit admin.raboti (+/-):" input kar str with "karem.rost (+/-):" input kom str with "komunikab (ud/nud):" input stres str with "stressoust (ud/nud):"	DO: ? "Recommendation:",vak ? valn(vak,1),"cf:",cfn(vak,1) ? valn(vak,2),"cf:",cfn(vak,2) ? valn(vak,3),"cf:",cfn(vak,3)
RULE: R1 IF: profk=true and delk=true and psihk=true THEN: vak+="{GD","GB","Mg"}	RULE: R15 IF: obr="ss" and stag<2 THEN: profk=true
RULE: R2 IF: profk=true and delk=true and psihk=false THEN: vak+="{GB" cf 80,"Mg" cf 80}	RULE: R16 IF: obr="ss" and oprs<2 and stag<2 THEN: profk=false
RULE: R3 IF: profk=true and delk=false and psihk=true THEN: vak+="{GB" cf 40,"Mg" cf 60}	RULE: R17 IF: dopobr="+" and opadr="+" and kar="+" THEN: delk=true
RULE: R4 IF: profk=true and delk=false and psihk=false THEN: vak+="Mg" cf 80	RULE: R18 IF: dopobr="+" and opadr="+" and kar="-" THEN: delk=true
RULE: R5 IF: profk=false and delk=true and psihk=true THEN: vak+="Mg" cf 80	RULE: R19 IF: dopobr="+" and opadr="-" and kar="+" THEN: delk=true
RULE: R6 IF: profk=false and delk=false and psihk=true THEN: vak+="Mg" cf 60	RULE: R20 IF: dopobr="+" and opadr="-" and kar="-" THEN: delk=true
RULE: R7 IF: profk=false and delk=true and psihk=false THEN: vak+="Mg" cf 40	RULE: R21 IF: dopobr="-" and opadr="+" and kar="+" THEN: delk=true

RULE: R8 IF: profk=false and delk=false and psihk=false THEN: vak+="Mg" cf 40	RULE: R22 IF: dopobr="-" and opadr="-" and kar="+" THEN: delk=true
RULE: R9 IF: obr="v" and oprs>=2 and stag>=2 THEN: profk=true	RULE: R23 IF: dopobr="-" and opadr="+" and kar="-" THEN: delk=true
RULE: R11 IF: obr="v" and oprs<2 and stag>=2 THEN: profk=true	RULE: R24 IF: dopobr="-" and opadr="-" and kar="-" THEN: delk=false
RULE: R12 IF: obr="v" and stag <2 THEN: profk=true	RULE: R25 IF: kom="ud" and stres="ud" THEN: psihk=true
RULE: R13 IF: obr="ss" and oprs>=2 and stag>=2 THEN: profk=true	RULE: R26 IF: kom="ud" and stres="nud" THEN: psihk=true
RULE: R14 IF: obr="ss" and oprs<2 and stag>=2 THEN: profk=true	RULE: R27 IF: kom="nud" and stres="ud" THEN: psihk=true
VAR: VAK	
END:	

```

CONSULT VAKAN
obrazovanie (v/ss): v
opit raboti po spec.(0,1,2,...): 5.00
stag (0,1,2,...): 10.00
dop.obrazovanie (+/-): -
opit admin.raboti (+/-): -
karern.rost (+/-): -
komunikab (ud/nud): ud
stressoust (ud/nud): ud
Recommendation:Mg
Mgcf: 60.00
GBcf: 40.00
UNKNOWNcf: 0.00
Please press space bar to continue

```

Рисунок 4. Результаты тестирования

Figure 4. Test results

Выводы

Применение данной системы искусственного интеллекта поможет в разнообразных отраслях народного хозяйства облегчить труд человека в выборе кандидата на ото-

бранную должность и уменьшить число ошибок, совершаемых при принятии решений. ИС тестирует деловые и психологические качества и проверяет на компетентность кандидата на отобранную должность.

Список литературы

1. Искусственный интеллект: в 3 кн. Кн. 1. Системы общения и интеллектуальные системы: Справочник / Под ред. Э.В. Попова. М.: Радио и связь, 1990. 464 с.
2. Попов Э.В. Экспертные системы. М.: Наука, 1987. 283 с.
3. Хейес-Рот Ф., Уотерман Д., Ленат Д. Построение экспертных систем: пер. с англ. / Перевод Ю.И. Крюкова и др. М.: Мир, 1987. 438 с.
4. Уотерман Д. Руководство по экспертным системам. М.: Мир, 1989. 388 с.
5. Стефанюк В.Л. Некоторые аспекты теории экспертных систем // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1987. № 2. С. 85-91.
6. Форсайт Р. Экспертные системы. Принципы работы и примеры: пер. с англ. / Перевод С.И. Рудаковой; под ред. В.Л. Стефанюка. М.: Радио и связь, 1987. 220 с.
7. Пospelов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
8. Братко И. Программирование на языке Пролог для систем искусственного интеллекта. М.: Мир, 1990. 552 с.

References

1. *Iskusstvennyi intellekt: v 3 kn. Kn. 1. Sistemy obshcheniya i intellektual'nye sistemy: Spravochnik. Pod red. E.V. Popova* [Artificial

Intelligence: in 3 books. Book 1. The System of Communication and Intellectually: Manual. Ed. by E.V. Popov]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 464 p. [in Russian].

2. Popov E.V. *Ekspertnye sistemy* [Expert System]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 283 p. [in Russian].

3. Hayes-Roth F., Waterman D., Lenat D. *Postroenie ekspertnykh system* [Building Expert Systems]. Moscow, Mir Publ., 1987. 438 p. [in Russian].

4. Waterman D. *Rukovodstvo po ekspertnym sistemam* [Guide to Expert Systems]. Moscow, Mir Publ., 1989. 388 p. [in Russian].

5. Stefanyuk V.L. Nekotorye aspekty teorii ekspertnykh system [Some Aspects of the Theory of Expert Systems]. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika — News of Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics*, 1987, No. 2, pp. 85-91. [in Russian].

6. Forsyth R. *Ekspertnye sistemy. Printsipy raboty i primery* [Expert Systems. Principles of Work and Examples]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987. 220 p. [in Russian].

7. Pospelov D.A. *Situatsionnoe upravlenie: Teoriya i praktika* [Situational Management: Theory and Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 288 p. [in Russian].

8. Bratko I. *Programirovaniya na yazyke Prolog dlya sistem iskusstvennogo intellekta* [Programming in Prolog for Artificial Intelligence Systems]. Moscow, Mir Publ., 1990. 552 p. [in Russian].



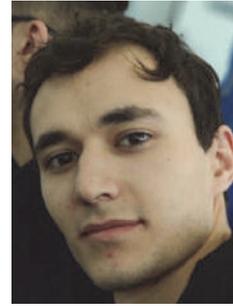
Муравьева Е. А.
Muraveva E. A.

доктор технических наук,
профессор,
заведующая кафедрой
«Автоматизированные
технологические
и информационные
системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
филиал,
г. Стерлитамак,
Российская Федерация



Габитов Р. Ф.
Gabitov R. F.

кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Автоматизированные
технологические
и информационные
системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
филиал,
г. Стерлитамак,
Российская Федерация



Имаев Р. Ф.
Imaev R. F.

студент кафедры
«Автоматизированные
технологические
и информационные
системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
филиал,
г. Стерлитамак,
Российская Федерация

УДК 004.896

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-97-112

СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ТРЕНДАМ

Актуальность

В данной статье описаны основные этапы построения нечеткого контроллера, идентифицирующего возмущения в системе автоматического управления по трендам на примере рассольного цикла, а именно подогрева очищенного рассола, идущего на электролиз. Этот метод может внедряться в системах управления по возмущению для формирования управляющих воздействий, а также для диагностических целей.

Цель

Исследовать синтез нечеткого контроллера для идентификации и количественной оценки возмущений по трендам.

Методы исследования

В статье предложен метод оценки возмущений по трендам. Проведено построение математической модели процессов, реализованной в среде MathCad. Реализована концептуальная модель нечеткого контроллера для определения возмущения. Разработаны продукционные правила «ЕСЛИ..., ТО...».

Результаты

В результате проведенных исследований на базе предложенного метода произведен синтез двух нечетких контроллеров, которые определяют количественно возмущения в цикле подогрева воды, а именно: отклонение температуры очищенного рассола, входящего в теплообменник, а также отклонение температуры воды в емкости от нормы. Разработанный проект имеет практическую значимость, так как информация о возмущениях, полученная как выходное значение с нечеткого контроллера может быть применена при диагностике и оценке состояния системы в любой момент времени, что, в свою очередь, может быть использовано для более плавного управления при подаче корректирующего сигнала

на контроллер, осуществляющий управление заслонками и насосами, а также для предотвращения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: нечеткость, возмущение, управление, тренд.

SYNTHESIS OF A FUZZY CONTROLLER FOR IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION OF DISTURBANCES BY TRENDS

Relevance

This article describes the main stages of constructing a fuzzy controller that identifies disturbances in the automatic control system by trends on the example of a brine cycle, namely, heating of purified water going to electrolysis. This method can be implemented in perturbation control systems for generating control actions, as well as for diagnostic purposes.

Aim of research

To investigate the synthesis of a fuzzy controller for identifying and quantifying perturbations based on trends.

Methods

The article proposes a method for estimating perturbations by trends. A mathematical model of the processes implemented in the MathCad environment is constructed. A conceptual model of a fuzzy controller for determining the perturbation is implemented. The production rules «IF..., THEN...» have been developed.

Results

As a result of the conducted research, on the basis of the proposed method, the synthesis of two fuzzy regulators was made, which quantify the disturbances in the water heating cycle, namely: the deviation of the temperature of the purified brine entering the heat exchanger, as well as the deviation of the water temperature in the tank from the norm. The developed project is of practical significance, since the information about disturbances obtained as an output value from a fuzzy controller can be used in the diagnosis and assessment of the system state at any time, which, in turn, can be used for smoother control when applying a correction signal to the controller that controls the dampers and pumps, as well as to prevent accidents.

Keywords: fuzziness, perturbation, control, trend.

Введение

Формирование систем управления по возмущению затрудняется сложностями количественной идентификации возмущений. В статье поставлена цель синтеза нечеткого контроллера для идентификации и количественной оценки возмущений по трендам. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи: составление математической модели процессов, протекающих в цикле подогрева рассола на электролиз; проведение синтеза нечеткого контроллера для идентификации и количественной оценки возмущений; разработка нечетких контроллеров в среде Matlab. В статье предложен метод оценки возмущений по трендам. Для этого предлагается разработка нечеткого контроллера (НК) на основе экспертной информации. Идентификация возмущений происходит непрерывно, тем самым будет обеспечиваться постоянность управляющего воздействия на объект управления (ОУ).

Работы, в которых представлены системы управления [1–5] по возмущениям, не используют принципов нечеткой логики для их идентификации, их количественное определение не всегда точно. Заметим, что алгоритм синтеза, изложенный в работах [6–8], позволяет формировать выходные значения НК с требуемой статической характеристикой и минимальной погрешностью, тем самым позволяет строго оценивать возмущающие воздействия на систему.

Описание объекта управления

Рассматриваемый участок (рисунок 1), расположенный в цикле подготовки рассола, находящемся на производстве АО «БСК» в цехе № 4, предназначен для подогрева готового и очищенного рассола NaCl (хлорида натрия), идущего на электролиз. Участок включает в себя два кожухотрубчатых теплообменника (поз. Е-516 и Е-506), центробежный насос (поз. Р-551) и емкость с оборотной водой (поз. ТК-551).

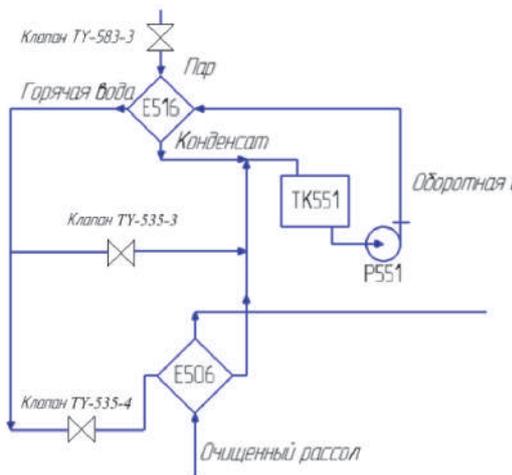


Рисунок 1. Технологическая схема компрессорной установки

Figure 1. Technological scheme of the compressor unit

Расход пара на подогрев воды в теплообменник поз. Е-516 поддерживается регулирующим клапаном поз. ТУ-583-3. Также в схеме присутствуют еще два аналогичных клапана: поз. ТУ-535-3 (для регулирования расхода подогретой воды через байпас в емкость с оборотной водой поз. ТК-551) и поз. ТУ-535-4 (для регулирования расхода подогретой воды в теплообменник поз. Е-506).

Математическая модель процессов, протекающих в цикле подогрева рассола на электролиз

Рассмотрим следующие основные процессы:

Подогрев воды в теплообменнике поз. Е-516, $[40\div 100]^\circ\text{C}$;

Изменение температуры в емкости поз. ТК-551 в результате цикличности процесса, $[40\div 100]^\circ\text{C}$;

Подогрев рассола в теплообменнике поз. Е-506, $[40\div 100]^\circ\text{C}$ (теоретическое значение), $[70\div 85]^\circ\text{C}$ (поддерживаемое оптимальное значение).

Протекание и характер этих процессов зависит от:

Расхода пара в теплообменник поз. Е-516 $[0\div 7500] \text{ м}^3/\text{ч}$;

Расхода горячей воды через байпас $[0\div 60] \text{ м}^3/\text{ч}$;

Расхода горячей воды в теплообменник поз.Е-506 $[0\div 60] \text{ м}^3/\text{ч}$.

Моделирование будем проводить в Mathcad — система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования, ориентированная на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением, отличается лёгкостью использования и применения для коллективной работы.

Зададим входные параметры и пропишем константы с пояснениями (рисунки 2, 3). Значение констант было найдено в справочных данных [9–12].

Представленные на рисунках 3, 5, 7 модели получены при решении уравнений теплового баланса (переменные, используемые при построении модели, взяты из рисунка 2).

Степень открытия заслонки, %	$\alpha 1 := 0.2$
Расход воды на теплообменник Е-516, создаваемый насосом Р-506, $\text{м}^3/\text{ч}$	$F_{\text{воды}} := 60$
Плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{пара}} := 1$
Расход пара на теплообменник Е-516, $\text{м}^3/\text{ч}$	$F_{\text{пара}} := 7500$
Температура в емкости ТК-551 при пуске, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{TK551}_0} := 40$
Теплоемкость пара, $\text{кДж}/^\circ\text{C}$	$C_{\text{пара}} := 2100$
Температура пара, идущей в теплообменник Е-516, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{пар}} := 115$
Расход, воды через байпас, $\text{м}^3/\text{ч}$	$F_{\text{байп}} := 20$
Расход, воды на теплообменник Е-506, $\text{м}^3/\text{ч}$	$F_{\text{воды2}} := 40$
Температура конденсации воды, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{конд}} := 100$
Удельная теплота конденсации пара, $\text{Дж}/\text{кг}$	$q_{\text{конд}} := 2256000$
Теплоемкость воды, $\text{кДж}/^\circ\text{C}$	$C_{\text{воды}} := 4200$
Плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{воды}} := 1000$
Объем воды емкости ТК-551, м^3	$V := 12$
Теплоемкость очищенного рассола, $\text{кДж}/^\circ\text{C}$	$C_{\text{рассол}} := 2700$
Плотность очищенного рассола, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{рассол}} := 1250$
Расход, очищенного рассола в теплообменник Е-506, $\text{м}^3/\text{ч}$	$F_{\text{рассол}} := 10$
Температура воды на вход в теплообменник поз. Е-506 при пуске, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{в}_0} := 53.75$
Температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 при пуске, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{н}_0} := 49$
температура в емкости ТК-551, обозначенная в подпрограмме цикла	Z

Рисунок 2. Начальные значения и константы для моделирования процессов в цикле подогрева очищенного рассола

Figure 2. Initial values and constants for modeling processes in the heating cycle of purified brine

Математическая модель процессов, реализованная в среде MathCad, происходящих в теплообменнике поз. Е-516, приведена на рисунке 3.

Модель, представленная на рисунке 3, получена в результате решения следующего уравнения теплового баланса:

$$\alpha_1 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{пара}} (C_{\text{пара}} (t_{\text{пара}} - t_{\text{конд}}) + q_{\text{конд}}) + \frac{F_{\text{пара}} \cdot \alpha_1}{1000} \cdot C_{\text{воды}} \cdot (t_{\text{конд}} - tv_i) = C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} (tv_i - t_{\text{вхводы}}), \quad (1)$$

где tv_i — конечная температура воды, выходящей из теплообменника, которую необходимо найти; число 1000 в формуле (1) показывает, что после того, как пар сконденсировался в теплообменнике, его объем уменьшился в 1000 раз. Формула (1) показывает, как происходит взаимодействие потоков

воды из емкости поз. ТК-551 и обратного пара при температуре 115 °С.

Математическая модель процессов, происходящих в емкости поз. ТК-551, приведена на рисунке 5.

Модель, представленная на рисунке 5, получена в результате решения следующего уравнения теплового баланса:

$$C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot \frac{F_{\text{пара}}}{1000} \cdot t \cdot (t_{\text{конд}} - tv_{hv_i}) + V \cdot (t_{\text{вхводы}} - tv_{hv_i}) + F_{\text{байп}} \cdot t \cdot (tv_i - tv_{hv_i}) + F_{\text{воды2}} \cdot t \cdot (tr_i - tv_{hv_i}) = 0, \quad (2)$$

где tv_i — температура воды, описанная моделью на рисунке 3; tr_i — температура воды (рассола), описанная моделью на рисунке 6; tv_{hv_i} — конечная температура воды, которую необходимо найти; t — время в минутах. Число 1000 в формуле (2) показывает, что

$$tv_i \leftarrow \frac{\alpha_1 \cdot \rho_{\text{пара}} \cdot F_{\text{пара}} \cdot [C_{\text{пара}} \cdot (t_{\text{пара}} - t_{\text{конд}}) + q_{\text{конд}}] + \frac{F_{\text{пара}} \cdot \alpha_1 \cdot t_{\text{конд}} \cdot (C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}})}{1000} + C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} \cdot z}{\frac{F_{\text{пара}} \cdot \alpha_1 \cdot (C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}})}{1000} + C_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}}}$$

Рисунок 3. Математическая модель процессов, происходящих в теплообменнике поз. Е-516
Figure 3. Mathematical model of the processes occurring in the heat exchanger pos. E-516

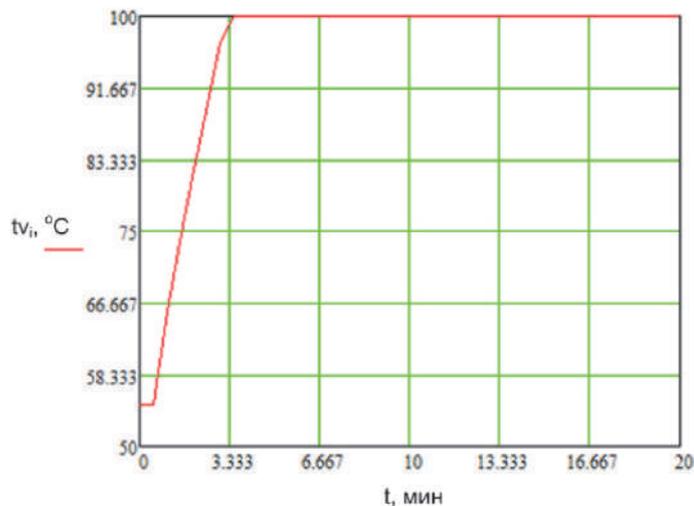


Рисунок 4. График (tv_i), иллюстрирующий изменение температуры воды в теплообменнике поз. Е-516 от времени (t, мин)

Figure 4. Graph (tv_i) illustrating the change in the water temperature in the heat exchanger pos. E-516 from time (t, min)

$$tv_{hv_i} \leftarrow \frac{F_{\text{пара}} \cdot \tau \cdot \frac{tv_{l_i}}{1000} + V \cdot tv_{\text{входы}} + F_{\text{байп}} \cdot \tau \cdot tv_{l_i} + F_{\text{воды2}} \cdot \tau \cdot tr_i}{F_{\text{пара}} \cdot \tau \cdot \frac{1}{1000} + V + F_{\text{байп}} \cdot \tau + F_{\text{воды2}} \cdot \tau}$$

Рисунок 5. Математическая модель процессов, происходящих в емкости ТК-551
Figure 5. Mathematical model of the processes occurring in the tank ТК-551

после того, как пар сконденсировался в теплообменнике, его объем уменьшился в 1000 раз. Формула (2) показывает, как происходит взаимодействие потоков воды из теплообменника поз. Е516, проходящего через байпас ТУ-535-3, и остывшей воды из теплообменника поз. Е506.

Математическая модель процессов, происходящих в теплообменнике поз. Е-506, будет выглядеть следующим образом (рисунок 7).

Модель, представленная на рисунке 7, получена в результате решения следующего уравнения теплового баланса:

$$C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{рассол}} \cdot \rho_{\text{рассол}} (t_{\text{вхрассол}} - tr_i) - C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды2}} \cdot \rho_{\text{воды}} (tv1_i - tr_i) \cdot \alpha_2 = 0, \quad (3)$$

где $tv1_i$ — температура воды, описанная моделью на рисунке 3 (tv_i), tr_i — конечная температура воды, которую необходимо найти. Формула (3) показывает, как происходит взаимодействие потоков воды из теплообменника поз. Е516 и очищенного холодного рассола.

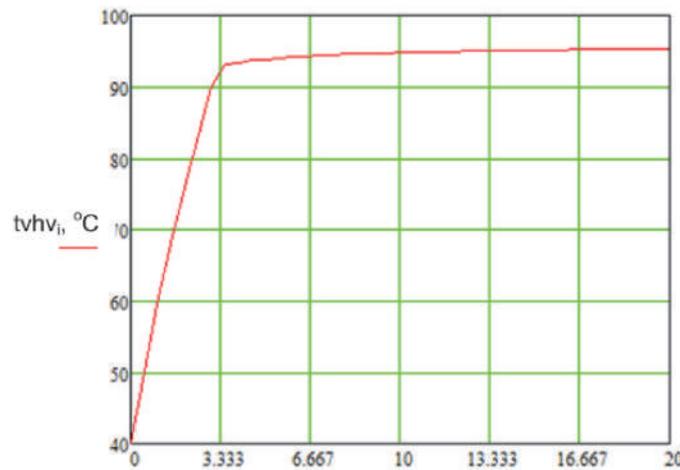


Рисунок 6. График ($tvhv_i$), иллюстрирующий изменение температуры воды в емкости ТК-551 от времени (t , мин)

Figure 6. Graph ($tvhv_i$), illustrating the change in water temperature in the tank TK-551 from time (t , min)

$$tr_i \leftarrow \frac{C_{\text{рассол}} \cdot F_{\text{рассол}} \cdot \rho_{\text{рассол}} \cdot t_{\text{вхрассол}} + C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot tv1_i}{C_{\text{рассол}} \cdot F_{\text{рассол}} \cdot \rho_{\text{рассол}} + C_{\text{воды}} \cdot F_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}}}$$

Рисунок 7. Математическая модель процессов, происходящих в теплообменнике Е-506

Figure 7. Mathematical model of the processes occurring in the heat exchanger E-506

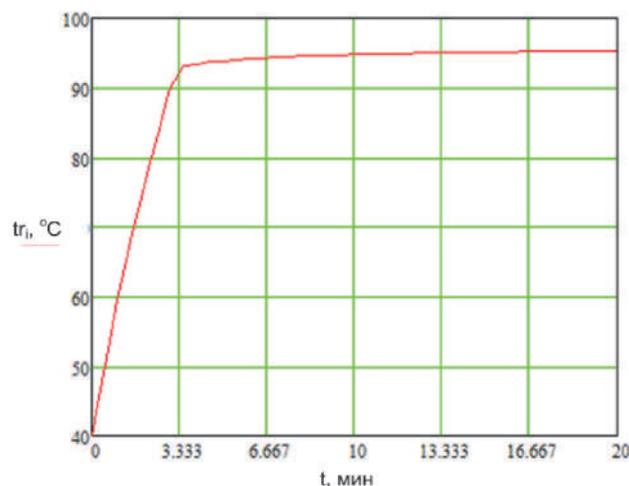


Рисунок 8. График (tr_i), иллюстрирующий изменение температуры воды в теплообменнике поз. Е-506 от времени (t , мин)

Figure 8. Graph (tr_i) illustrating the change in the water temperature in the heat exchanger pos. E-506 from time (t , min)

Синтез нечеткого контроллера для идентификации и количественной оценки возмущений

Прежде чем начать синтез нечетких контроллеров (НК), необходимо разработать их концептуальные модели, отображающие связь входов и выходов. Концептуальная модель отображает влияние входных сигналов (температуры рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 (рисунки 9, 10) и тренд отклонений, представляющий разность модели температуры рассола на выходе из теплообменника (рисунки 9, 10) и той же модели без возмущений (рисунок 11)) на

результат работы нечеткого контроллера — значения его выхода [13–17]. Указываются только те входы НК, которые оказывают влияние на его выход. Для удобства определения возмущений будем пользоваться следующим допущением: определяя одно из двух возможных возмущений, опускаем второе возмущение (условно считаем, что его нет).

В нашем случае нечеткий контроллер будет определять количественно возмущения в цикле подогрева воды, а именно: отклонение температуры очищенного рассола, входящего в теплообменник поз. Е-506 (норма — 40 °С), отклонение температуры

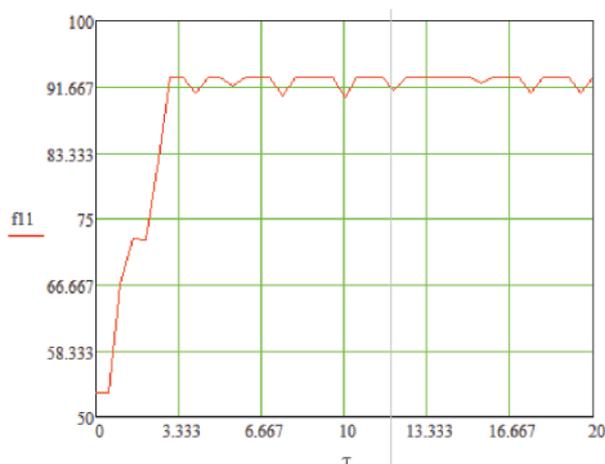


Рисунок 9. Температура рассола на выходе из теплообменника Е-506 (f11, °С) при условно постоянной температуре входящего рассола от времени (τ, мин)

Figure 9. Brine temperature at the outlet of the heat exchanger E-506 (f11, °С) at a conditionally constant temperature of the incoming brine from time (τ, min)

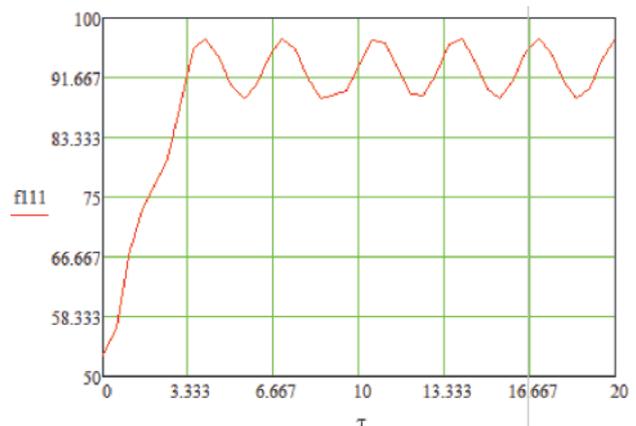


Рисунок 10. Температура рассола на выходе из теплообменника (f111, °С) Е-506 при отсутствии возмущений параметра температуры воды в емкости поз. ТК-551 от времени (τ, мин)

Figure 10. The brine temperature at the outlet of the heat exchanger (f111, °С) E-506 in the absence of disturbances of the water temperature parameter in the tank pos. ТК-551 from time (τ, min)

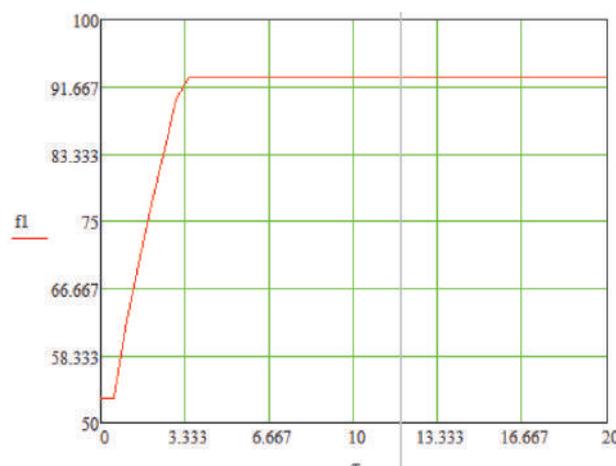


Рисунок 11. Температура рассола на выходе из теплообменника Е-506 (f1, °С) без возмущений от времени (τ, мин)

Figure 11. Brine temperature at the outlet of the heat exchanger E-506 (f1, °С) without time disturbances (τ, min)

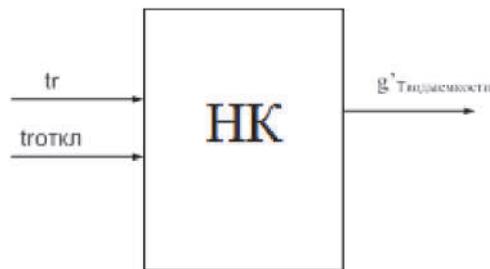
воды в емкости поз. ТК-551 (рисунок 6) от нормы.

На вход нечеткого контроллера подается модель объекта управления (температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506, описанная на рисунке 7) с учетом возмущений (рисунки 9, 10), а также тренд отклонений, представляющий собой разность между моделью объекта с учетом возмущений (рисунки 9, 10) и моделью объекта без учета возмущений (рисунок 11), выраженной в градусах Цельсия. Выходными значениями будет численный массив, содержащий данные о возмущениях в каждый момент времени (степень отклонения и знак).

На рисунках 12, 13 представлены концептуальные модели нечеткого контроллера для идентификации и количественной оценки возмущений параметров температуры воды в емкости поз. ТК-551 и температуры рассола на входе [18–20].

На вход первого нечеткого контроллера (рисунок 12) подаются два тренда: тренд температуры рассола на выходе из теплообменника при условно постоянной температуре входящего рассола (рисунок 9) и тренд отклонений, представляющий собой разность параметров (температуры рассола) тренда с возмущением (рисунок 9) и тренда температуры рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 без возмущений (рисунок 11).

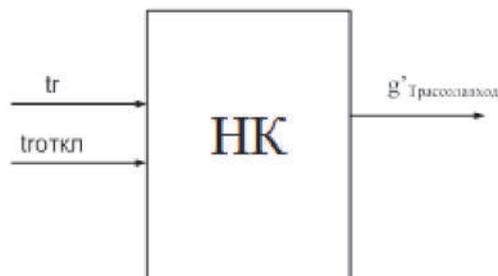
На вход второго нечеткого контроллера (рисунок 13) подаются два тренда: тренд температуры рассола на выходе из теплообменника при отсутствии возмущений параметра температуры воды в емкости поз. ТК-551 (рисунок 10) и тренд отклонений, представляющий собой разность параметров (температуры рассола) тренда с возмущением (рисунок 10) и тренда температуры рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 без возмущений (рисунок 11).



tr — температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506;
 tr — тренд отклонений; $g'_{Тводьемкости}$ — возмущение (степень отклонения температуры воды в емкости ТК-551 от нормы)

Рисунок 12. Концептуальная модель нечеткого контроллера для определения возмущения (температура воды в емкости в поз. ТК-551)

Figure 12. Conceptual model of a fuzzy controller for determining the disturbance (water temperature in the tank in pos. ТК-551)



tr — температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506;
 tr — тренд отклонений; $g'_{Трассолавход}$ — возмущение (степень отклонения температуры очищенного рассола на вход в теплообменник поз. Е-506)

Рисунок 13. Концептуальная модель нечеткого контроллера для определения возмущения (температура рассола на входе)

Figure 13. Conceptual model of a fuzzy controller for determining perturbation (brine inlet temperature)

По математической модели составляется таблица опорных точек, через которые должна проходить статическая характеристика НК (таблица 1).

Заголовки таблицы представляют собой совокупность опорных точек для входных переменных НК.

Как видно из таблицы 1, большинство значений возмущений не совпадает с центрами тяжести термов (рисунки 14–19). Поэтому в каждом правиле выходная переменная соответствует двум термам с разной степенью принадлежности. Иными словами, будем использовать продукционные правила вида:

$$\text{Если } \langle tr_{откл} \rangle \text{ И } \langle tr \rangle, \text{ тогда } g'_{\text{Тводьемкости}} = g_i$$

$$\text{и } g'_{\text{Тводьемкости}} = g_{j'}^{C_j}$$

где C_i, C_k — степени принадлежности переменной к термам $g'_{\text{Тводьемкости}}$;

$tr_{откл}$ — тренд отклонений, равный разности модели объекта с возмущениями (рисунки 9, 10) и без (рисунок 11).

Для описания входных лингвистических переменных «температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 при условно постоянной температуре рассола, входящего в теплообменник поз. Е-506» (Tr), «тренд отклонений при условно постоянной температуре рассола, входящего в теплообменник поз. Е-506» ($Tr_{откл}$), «температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 при отсутствии возмущений значения температуры в емкости поз. ТК-551» (Tr), «тренд отклонений при отсутствии возмущений значения температуры в емкости поз. ТК-551» ($Tr_{откл}$) будем использовать по пять термов (рисунки 14–17).

Таблица 1. Опорные точки возмущений для синтеза НК ($g'_{\text{Трассолавход}}$)

Table 1. Reference points of perturbations for the synthesis of FC ($g'_{\text{trassolavhod}}$)

	$Tr_1(40)$	$Tr_2(55)$	$Tr_3(70)$	$Tr_4(85)$	$Tr_5(100)$
$T_{готкл1(-3)}$	-3,17	-3,54	-4,11	-4,35	-4,54
$T_{готкл2(-1,5)}$	-1,37	-1,72	-2,14	-2,69	-3,11
$T_{готкл3(0)}$	0	0	0	0	0
$T_{готкл4(1,5)}$	1,34	1,60	2,03	2,51	3,34
$T_{готкл5(3)}$	2,94	3,21	3,79	4,12	4,39

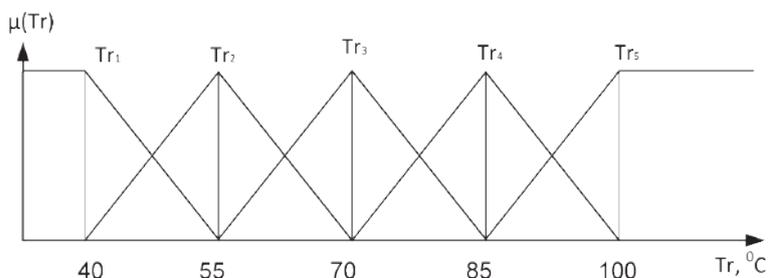


Рисунок 14. Лингвистическая переменная «температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 при условно постоянной температуре рассола, входящего в теплообменник поз. Е-506»

Figure 14. Linguistic variable «brine temperature at the outlet of the heat exchanger pos. E-506 at a conditionally constant temperature of the brine entering the heat exchanger pos. E-506»

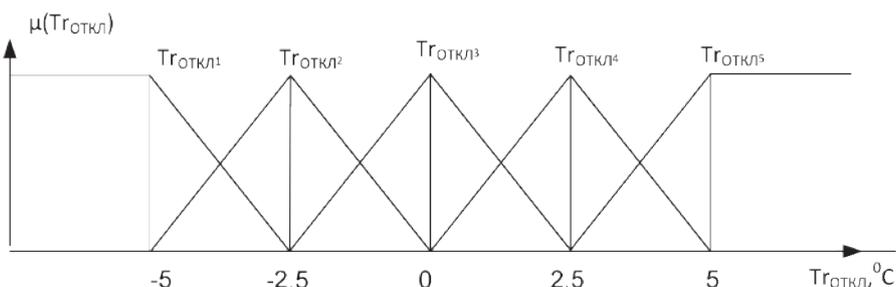


Рисунок 15. Лингвистическая переменная «тренд отклонений при условно постоянной температуре рассола, входящего в теплообменник поз. Е-506»

Figure 15. Linguistic variable «trend of deviations at a conditionally constant temperature of the brine entering the heat exchanger pos. E-506»

Для описания выходных лингвистических переменных «степень отклонения температуры очищенного рассола на вход в теплообменник поз. Е-506» (твodyемк) и «степень отклонения температуры воды в емкости ТК-551 от нормы» (трассолвх) будем использовать пять термов, представленных на рисунках 18, 19. Крайние термы имеют сим-

метричную треугольную форму [21–25]. При любом значении функции принадлежности выходной переменной крайним термам их центр тяжести не будет смещаться. Это позволяет задать минимальное и максимальное значения выходной функции. Данные переменные имеют диапазон изменения: $[-4,6;4,6]$ °С.

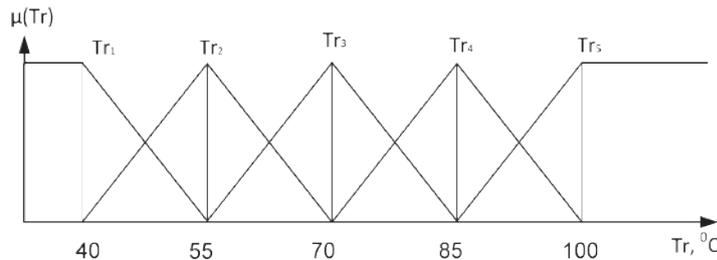


Рисунок 16. Лингвистическая переменная «температура рассола на выходе из теплообменника поз. Е-506 при отсутствии возмущений значения температуры в емкости поз. ТК-551»

Figure 16. Linguistic variable «brine temperature at the outlet of the heat exchanger pos. E-506 in the absence of disturbances of the temperature value in the tank pos. TK-551»

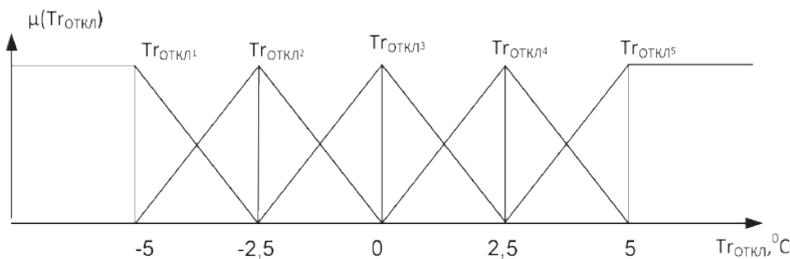


Рисунок 17. Лингвистическая переменная «тренд отклонений при отсутствии возмущений значения температуры в емкости поз. ТК-551»

Figure 17. Linguistic variable «trend of deviations in the absence of perturbations of the temperature value in the container pos. TK-551»

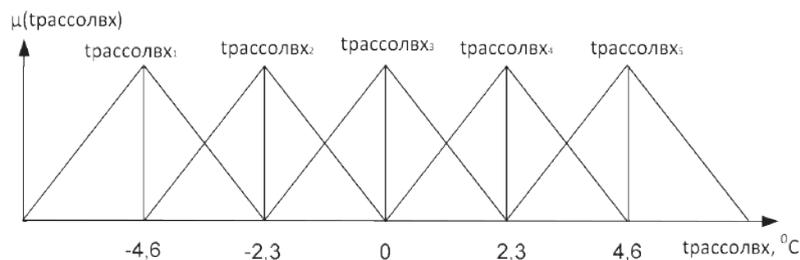


Рисунок 18. Лингвистическая переменная «степень отклонения температуры очищенного рассола на вход в теплообменник поз. Е-506»

Figure 18. Linguistic variable «the degree of deviation of the temperature of the purified brine at the entrance to the heat exchanger pos. E-506»

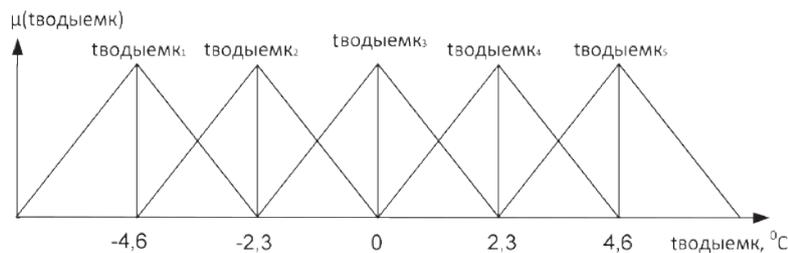


Рисунок 19. Лингвистическая переменная «степень отклонения температуры воды в емкости ТК-551 от нормы»

Figure 19. Linguistic variable «the degree of deviation of the water temperature in the tank TC-551 from the norm»

Продемонстрируем, как находятся функции принадлежности для входных переменных «температура рассола» (рисунок 14) и тренд отклонений (рисунок 15) при значениях входных параметров 60 °С и 3 °С соответственно.

Как видно из рисунков 20 и 21, получили следующие значения:

$$Tr = 60^{\circ}C, \mu(Tr) = (Tr_1 + Tr_2 + Tr_3 + Tr_4 + Tr_5) = (0,0,6,0,4,0,0).$$

$$Tr_{откл} = 3^{\circ}C, \mu(Tr_{откл}) = (Tr_{откл1}, Tr_{откл2}, Tr_{откл3}, Tr_{откл4}, Tr_{откл5}) = (0,0,0,0,7,0,3).$$

Для определения результатов агрегирования найдем минимальное значение степени истинности подусловий для каждого из условий.

По результатам фаззификации можно сделать вывод, что сработают правила, antecedent которых содержит в себе следующие высказывания:

Tr_2 ИЛИ Tr_3 ИЛИ $Tr_{откл4}$ ИЛИ $Tr_{откл5}$.

Всего 4 сработавших правила. Для описанного в проекте алгоритма необходимо найти степени истинности всех правил. Результат агрегирования представим в виде матрицы вида:

$$Z = \begin{pmatrix} 0,3 \\ K \\ 0,4 \\ 0,6 \\ K \\ 0,3 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

состоящей из 25 элементов, 21 из которых будут нулевыми для нашего случая, ненулевыми будут только 4 элемента: $z = (z_1, z_2, z_3, z_4) = (0.3, 0.4, 0.3, 0.6)$

Продемонстрируем, как реализуется этап агрегирования на примере правил, antecedent которых содержит в себе высказывание Tr_2 И $Tr_{откл4}$ (рисунок 22).

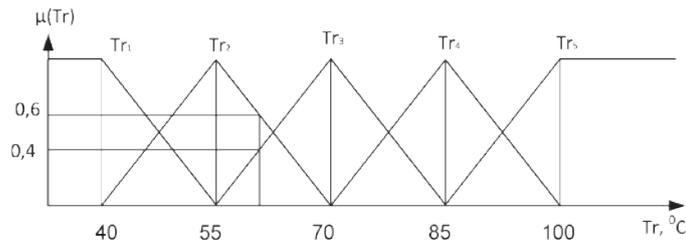


Рисунок 20. Нахождение функции принадлежности переменной «температура рассола на выходе из теплообменника поз. E-506 при условно постоянной температуре рассола, входящего в теплообменник поз. E-506»

Figure 20. Finding the function of belonging to the variable «brine temperature at the outlet of the heat exchanger pos. E-506 at a conditionally constant temperature of the brine entering the heat exchanger pos. E-506»

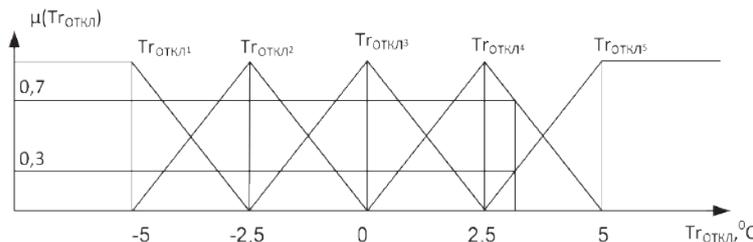


Рисунок 21. Нахождение функции принадлежности переменной «тренд отклонений при условно постоянной температуре рассола, входящего в теплообменник поз. E-506»

Figure 21. Finding the function of belonging to the variable «trend of deviations at a conditionally constant temperature of the brine entering the heat exchanger pos. E-506»

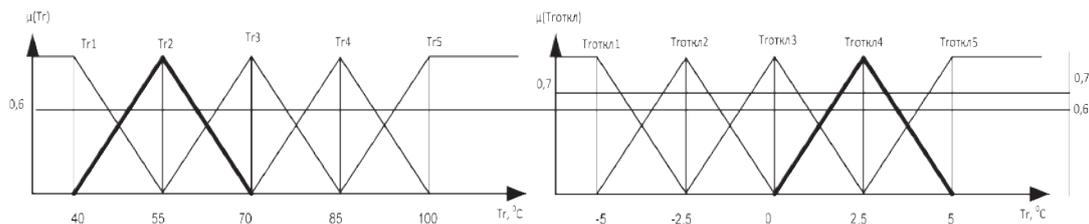


Рисунок 22. Реализация этапа агрегирования
Figure 22. Implementation of the aggregation stage

Как видно из рисунка 22, минимальная степень истинности будет составлять 0,6.

Рассмотрим правило вида ЕСЛИ и $T = T_{\text{готкл3}}$ и $T_r = T_{r5}$. В данном правиле реализовано два значения выходной переменной $t_{\text{рассолвх2}}$ и $t_{\text{рассолвх3}}$, причем $t_{\text{рассолвх2}} = -2,3$ и $t_{\text{рассолвх3}} = 0$ (значения $t_{\text{рассолвх2}}$ и $t_{\text{рассолвх3}}$ взяты из описания лингвистической переменной $t_{\text{рассолвх}}$ (рисунок 19).

Значение центра тяжести g_{Σ} равно $-1,15$:

$$g_{\Sigma} = \frac{2.3 + 0}{-2} = -1.15.$$

Желаемое значение выходной переменной нечеткого контроллера, взятое из таблицы 1 ($T_{\text{готкл}} = T_{\text{готкл3}}$ и $T_r = T_{r5}$), равно $-1,37$ ($t_{\text{рассолвх}} = -1,37$).

Так как $g_{\text{ж}} = -1,37 < g_{\Sigma} = -1,15$, то g_2 — базовый консеквент, g_3 — дополнительный кон-

секвент. Значит, $g_6 = g_2 = -2,3$ (g_6 — базовый консеквент).

Приведенное значение выходной величины будет равно 0,9:

$$g^* = 1 - \frac{-1.37 + 1.15}{-2.3 + 1.15} = 1 - 0.1 = 0.9.$$

Степень истинности дополнительного консеквента определяется из графика зависимости от относительного значения выходной величины. По графику, представленному на рисунке 23, степень истинности дополнительного консеквента равна 0,6 ($c = 0,6$).

Тогда справедливо утверждать, что ЕСЛИ $T = T_{\text{готкл3}}$ и $T_r = T_{r3}$, ТО $t_{\text{рассолвх}} = t_{\text{рассолвх2}}$ и $t_{\text{рассолвх}} = t_{\text{рассолвх3}}^{0,6}$.

В таблице 2 представлены 25 продукционных правил, описывающих влияние возмущений для первого контроллера.

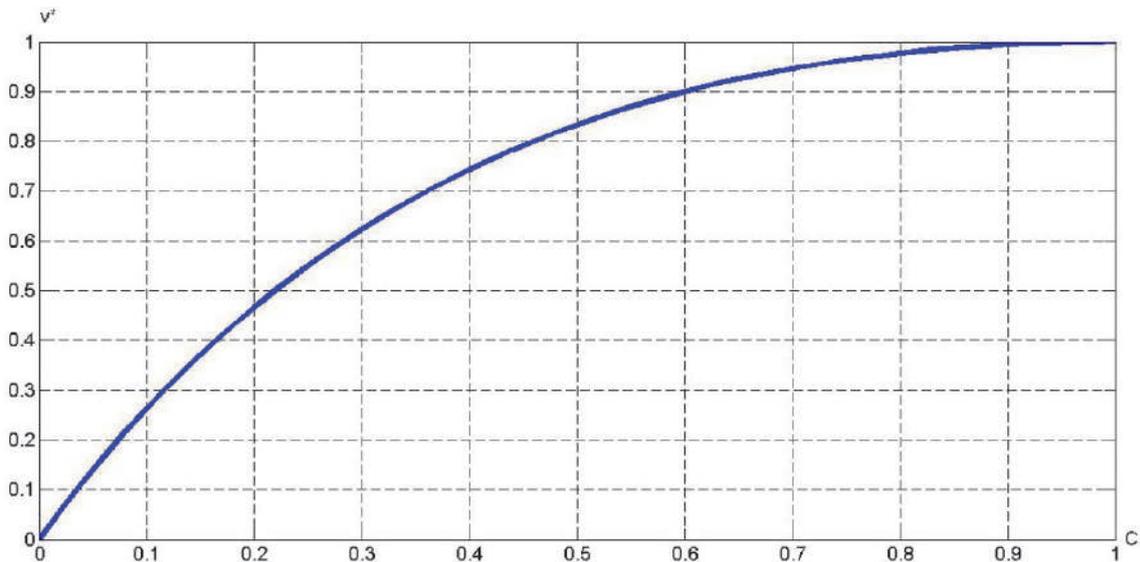


Рисунок 23. Зависимость степени истинности дополнительного консеквента от относительного значения выходной величины

Figure 23. The dependence of the degree of truth of the additional consequent on the relative value of the output value

Таблица 2. Продукционные правила для синтеза НК ($g'_{\text{Трассолвход}}$)

Table 2. Production rules for the synthesis of FC ($g'_{\text{trassolavhod}}$)

	$T_{r1(40)}$	$T_{r2(55)}$	$T_{r3(70)}$	$T_{r4(85)}$	$T_{r5(100)}$
$T_{\text{готкл1}(-3)}$	V_1 $V_2^{0.002}$	V_1 $V_2^{0.003}$	V_1 $V_2^{0.01}$	V_1 $V_2^{0.001}$	V_1 $V_2^{0.001}$
$T_{\text{готкл2}(-1,5)}$	V_1 $V_2^{0.15}$	V_1 $V_2^{0.04}$	V_1 $V_2^{0.002}$	$V_1^{0.1}$ V_2	$V_2^{0.11}$ V_3
$T_{\text{готкл3}(0)}$	$V_2^{0.001}$ V_3	$V_2^{0.062}$ V_3	$V_2^{0.01}$ V_3	$V_2^{0.1}$ V_3	$V_2^{0.2}$ V_3
$T_{\text{готкл4}(1,5)}$	$V_2^{0.0001}$ V_3	V_2 $V_3^{0.0032}$	V_2 $V_3^{0.00003}$	V_2 $V_3^{0.004}$	V_2 $V_3^{0.081}$
$T_{\text{готкл5}(3)}$	V_2 $V_3^{0.091}$	V_2 $V_3^{0.035}$	V_2 V_3^1	V_2 $V_3^{0.96}$	V_2 $V_3^{0.007}$

Если $t_{\text{рассолвх}_i}$ — базовый консеквент, то степень истинности термина $t_{\text{рассолвх}_i}$ равна единице, если $t_{\text{рассолвх}_i}$ — дополнительный консеквент, то степень истинности термина $t_{\text{рассолвх}_i}$ равна значению «с».

Используя таблицу 2, построим матрицу В:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & \Lambda & \Lambda & 0 \\ 0,35 & \Lambda & \Lambda & 0 \\ 0 & \Lambda & \Lambda & 0 \\ 0 & \Lambda & \Lambda & 1 \\ 0 & \Lambda & \Lambda & 0,89 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица содержит в себе 25 столбцов для каждого правила и 5 строк для каждого термина выходного параметра.

Завершающим этапом активизации является вычисление отношения произведения матрицы В (формула (5)) и вектора z (формула (4)) на сумму значений вектора z для каждого правила.

$$\mu(g) = \frac{B \cdot z}{\text{sum}(z)}.$$

Рассмотрим этап активизации на примере с использованием данных, полученных в формулах (4), (5):

$$\text{sum}(z) = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = 1,6.$$

Таким образом, получим:

$$\mu(g) = \frac{\begin{pmatrix} 1 & \Lambda & \Lambda & 0 \\ 0,35 & \Lambda & \Lambda & 0 \\ 0 & \Lambda & \Lambda & 0 \\ 0 & \Lambda & \Lambda & 1 \\ 0 & \Lambda & \Lambda & 0,89 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,3 \\ K \\ 0,4 \\ 0,6 \\ K \\ 0,3 \end{pmatrix}}{1,6} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,3746 \\ 0,4432 \end{pmatrix}.$$

В итоге получим область, образованную терминами $t_{\text{рассолвх}_4}$, $t_{\text{рассолвх}_5}$ и горизонтальными линиями, соответствующими значениям $\mu(\text{рассолвх})$ 0,3746 и 0,4432.

Для того чтобы получить количественные значения для каждой выходной переменной, необходимо произвести дефазификацию, воспользовавшись формулой:

$$g' = \frac{\int_{g_{\min}}^{g_{\max}} g \cdot \mu(g) dg}{\int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \mu(g) dg},$$

где g' — возмущение (трассолвх);

g_{\max} — максимальное значение возмущения в диапазоне сработавшего термина;

g_{\min} — минимальное значение возмущения в диапазоне сработавшего термина.

Для описанных выше примеров (рисунок 24) найдем:

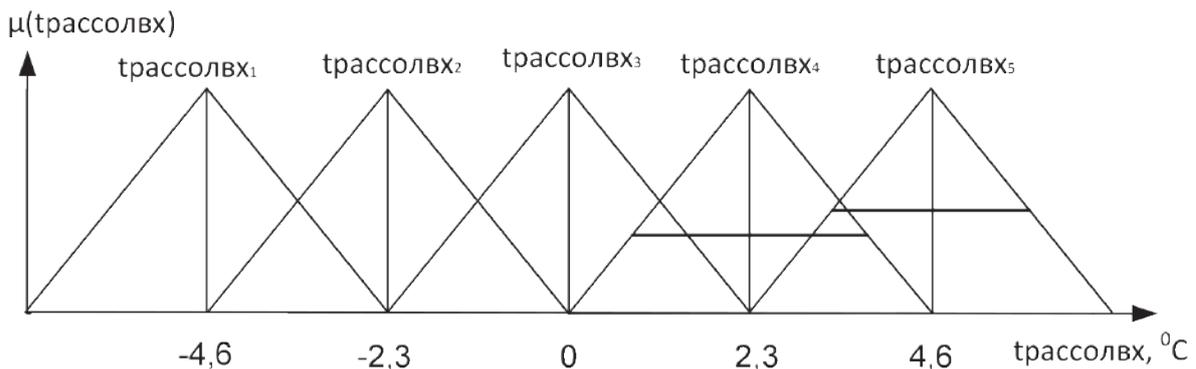


Рисунок 24. Результаты активизации

Figure 24. Activation results

Таблица 3. Опорные точки для синтеза НК (g' Тводьемкости)

Table 3. Reference points for the synthesis of FC (g' twater capacity)

	$T_{r1(40)}$	$T_{r2(55)}$	$T_{r3(70)}$	$T_{r4(85)}$	$T_{r5(100)}$
$T_{\text{готкл}1(-3)}$	-3,27	-3,34	-3,67	-3,95	-4,24
$T_{\text{готкл}2(-1,5)}$	-1,13	-1,45	-1,86	-2,14	-2,62
$T_{\text{готкл}3(0)}$	-0,43	0,56	0,78	-0,37	0,49
$T_{\text{готкл}4(1,5)}$	1,19	1,36	1,79	2,14	2,57
$T_{\text{готкл}5(3)}$	2,76	3,03	3,41	3,83	4,04

$$g'(T_{\text{рассолавод}}) = \frac{\int_{g_{\min}}^{g_{\max}} g \cdot \mu(g) dg}{\int_{g_{\min}}^{g_{\max}} \mu(g) dg} =$$

$$= \frac{\int_{2,3-\mu_4(g)-4,6}^{2,3+\mu_4(g)-4,6} g \cdot \mu_4(g) dg + \int_{4,6-\mu_5(g)-4,6}^{4,6+\mu_5(g)-4,6} g \cdot \mu_5(g) dg}{\int_{2,3-\mu_4(g)-4,6}^{2,3+\mu_4(g)-4,6} \mu_4(g) dg + \int_{4,6-\mu_5(g)-4,6}^{4,6+\mu_5(g)-4,6} \mu_5(g) dg} = 2,913^{\circ}C.$$

Опорные точки возмущений для синтеза НК, полученные с помощью математической

модели изменения температуры рассола на выходе (рисунок 9), представлены в таблице 3.

Активизация для $g'_{\text{Трассолавод}}$ была описана ранее (формула (6)). В данном случае будем использовать тот же алгоритм.

В таблице 4 представлены 25 продукционных правил, описывающих влияние возмущения параметра температуры рассола на вход в теплообменник поз. Е-506, для работы контроллера, определяющего эти возмущения:

Таблица 4. Продукционные правила для синтеза НК ($g'_{\text{Тводьемкости}}$)
Table 4. Production rules for the synthesis of FC ($g'_{\text{twater capacity}}$)

	$T_{r1(40)}$	$T_{r2(55)}$	$T_{r3(70)}$	$T_{r4(85)}$	$T_{r5(100)}$
$T_{г \text{откл}1(-3)}$	V_1 $V_2^{0,001}$	V_1 $V_2^{0,18}$	V_1 $V_2^{0,28}$	V_1 $V_2^{0,34}$	V_1 $V_2^{0,42}$
$T_{г \text{откл}2(-1,5)}$	V_1 $V_2^{0,7}$	V_1 $V_2^{0,74}$	V_1 $V_2^{0,9}$	$V_1^{0,92}$ V_2	$V_2^{0,76}$ V_3
$T_{г \text{откл}3(0)}$	$V_2^{0,66}$ V_3	$V_2^{0,25}$ V_3	$V_2^{0,54}$ V_3	$V_2^{0,12}$ V_3	$V_2^{0,56}$ V_3
$T_{г \text{откл}4(1,5)}$	$V_2^{0,56}$ V_3	$V_2^{0,56}$ V_3	V_2 $V_3^{0,21}$	V_2 $V_3^{0,38}$	V_2 $V_3^{0,68}$
$T_{г \text{откл}5(3)}$	V_2 $V_3^{0,88}$	V_2 $V_3^{0,98}$	$V_2^{0,8}$ V_3	$V_2^{0,5}$ V_3	$V_2^{0,57}$ V_3

Разработка нечетких регуляторов в среде Matlab

Следующим этапом после составления базы правил является их реализация в составе нечетких контроллеров.

Для проектирования контроллера с использованием нечеткой логики в среде Matlab используем команду fuzzy. Произведем проектирование нечеткого контроллера НК2. Зададим число входных параметров равным 4-м, выходных — 3-м. Далее обозначаем для каждого входного и выходного параметра диапазоны измерения. В соответствии с диапазонами задаем термы для входных параметров. Задание термов для выходных параметров составляется аналогичным образом.

Список используемых источников

1. Динеев В.Г., Ефимов А.А., Мухин А.В. Оптимизация параметров системы управления с адаптивным контуром управления по возмущению // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD>2007: тез. докл. Первой междунар. конф. 2007. С. 213-214.
2. Александров В.М. Последовательный синтез оптимального по быстрдействию

Данным методом проектируются нечеткие контроллеры НК1, НК3 и НК4.

Выводы

Таким образом, произвели синтез нечеткого контроллера для идентификации и количественной оценки возмущений по трендам. Информация о возмущениях, полученная как выходное значение с нечеткого контроллера, поможет при диагностике и оценке состояния системы в любой момент времени, что, в свою очередь, может быть использовано для более плавного управления при подаче корректирующего сигнала на контроллер, осуществляющий управление заслонками и насосами, а также для предотвращения аварийных ситуаций.

- управления линейными системами с возмущениями // Сибирский журнал вычислительной математики. 2008. Т. 11. № 3. С. 251-270.
3. Кипер Р.А. Свойства веществ: справочник. 2009. 387 с.
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и Fuzzy TECH. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
5. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и

практика: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.

6. Муравьева Е.А., Усанин О.А., Кубряк А.И. Концепция определения возмущений по трендам с применением нечеткого регулятора // *Современные технологии в образовании и промышленности: от теории к практике: сб. матер. Внутривуз. науч.-практ. конф.* 2017. С. 106-108.

7. Муравьева Е.А., Усанин О.А., Кубряк А.И. Применение нечеткого регулятора с двойной базой правил для управления технологическими параметрами // *Современные технологии в образовании и промышленности: от теории к практике: сб. матер. Внутривуз. науч.-практ. конф.* 2017. С. 112-115.

8. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Маннанов И.А. Критерии качества автоматизированной системы управления на базе нечеткого регулятора // *Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве: сб. матер. II Междунар. науч.-техн. конф.* 2017. С. 153-155.

9. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Григорьев Е.С. Система управления давлением в испарителе фреона по математической модели аппарата // *Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве: сб. матер. II Междунар. науч.-техн. конф.* 2017. С. 157-159.

10. Solovyov K.A., Muravyova E.A. Synthesis Methods for Fuzzy Controller with Double Base of Rules // *CSIT'2016. Proceedings of the 18th International Workshop on Computer Science and Information Technologies.* 2016. С. 83-88.

11. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Параметрическая идентификация систем управления с обратной связью на основе нейросетевого моделирования процессов их функционирования // *Инженерный вестник Дона.* 2018. № 2. С. 383-399.

12. Пигасова Н.И., Шумихин А.Г., Стафейчук Б.Г., Смирнов О.А. Оценка стохастических свойств эквивалентных возмущающих воздействий в системе регулирования мощности прямоточного котла блочной ТЭС // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления.* 2019. № 19. С. 102-110.

13. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Параметрическая идентификация управляемого объекта в режиме его эксплуатации с применением технологии нейронных сетей // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.* 2016. № 31. С. 106-120.

14. Шумихин А.Г., Александрова А.С., Мустафин А.И. Параметрическая идентификация технологического объекта в режиме его эксплуатации с применением технологий нейронных сетей. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.* 2018. № 26. С. 29-41.

15. Hu Y., Yang Y., Li S., Zhou Y. Fuzzy Controller Design of Micro-unmanned Helicopter Relying on Improved Genetic Optimization Algorithm // *Aerospace Science and Technology.* March 2020. Vol. 98. No. 105685.

16. Liang H., Zou J., Zuo K., Khan M. An Improved Genetic Algorithm Optimization Fuzzy Controller Applied to the Wellhead Back Pressure Control System // *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2020. Vol. 142. No. 106708.

17. Talbi N. Design of Fuzzy Controller Rule Base Using Bat Algorithm // *Energy Procedia.* April 2019. Vol. 162, pp. 241-250.

18. Lamamra K., Batat F., Mokhtari F. A New Technique with Improved Control Quality of Nonlinear Systems Using an Optimized Fuzzy Logic Controller // *Expert Systems with Applications.* May 2020. Vol. 145, 1. No. 113148.

19. Alsafadi L.A., Chulin N.A., Mironova I.V. Synthesis of Fuzzy Controller Based on Simple PID Controller // *Procedia Computer Science.* 2019. Vol. 150. P. 28-38.

20. Sreedharan D., Paul V., Thottungal R. Mathematical Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell and Fuzzy-Based Intelligent Controllers for Performance Enhancement // *Computers & Electrical Engineering.* July 2019. Vol. 77. P. 354-365.

21. Farajdadian S.M., Hassan Hosseini. Design of an Optimal Fuzzy Controller to Obtain Maximum Power in Solar Power Generation System // *Solar Energy.* April 2019. Vol. 182. P. 161-178.

22. Jain M., Madeira A., Martins Manuel A. A Fuzzy Modal Logic for Fuzzy Transition Systems // *Electronic Notes in Theoretical Computer Science.* 2020. Vol. 3481. P. 85-103.

23. Lu Y. Adaptive-Fuzzy Control Compensation Design for Direct Adaptive Fuzzy Control // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. Vol. 26. Issue 6.

24. Hesamian G., Akbari M.G., Yaghoobpoor R. Quality Control Process Based on Fuzzy Random Variables // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2019. Vol. 27. Issue 4.

25. Shi Q., Lam H., Xuan C., Chen M. Adaptive Neuro-Fuzzy PID Controller Based on Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm // Neurocomputing, Corrected Proof, Available. 8 April 2020.

References

1. Dineev V.G., Efimov A.A., Mukhin A.V. Optimizatsiya parametrov sistemy upravleniya s adaptivnym konturom upravleniya po vozmushcheniyu [Optimization of the Parameters of a Control System with an Adaptive Control Loop by Disturbance]. *Tezisy dokladov Pervoi mezhdunarodnoi konferentsii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLSD'2007»* [Abstracts of the First International Conference «Management of the Development of Large-Scale Systems MLSD'2007»]. 2007, pp. 213-214. [in Russian].

2. Aleksandrov V.M. Posledovatel'nyi sintez optimal'nogo po bystrodeistviyu upravleniya lineinymi sistemami s vozmushcheniyami [Sequential Synthesis of Time-Optimal Control for Linear Systems with Perturbations]. *Sibirskii zhurnal vychislitel'noi matematiki — Siberian Journal of Computational Mathematics*, 2008, Vol. 11, No. 3, pp. 251-270. [in Russian].

3. Kiper R.A. *Svoistva veshchestv: spravochnik* [Properties of Substances: Reference Book]. 2009. 387 p. [in Russian].

4. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i Fuzzy TECH* [Fuzzy Modeling in MATLAB and Fuzzy TECH]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg, 2005. 736 p. [in Russian].

5. Vasil'ev V.I., Il'yasov B.G. *Intellektual'nye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika: ucheb. posobie* [Intelligent Control Systems. Theory and Practice: Textbook]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 392 p. [in Russian].

6. Murav'eva E.A., Usanin O.A., Kubryak A.I. Kontseptsiya opredeleniya vozmushchenii po trendam s primeneniem nechetkogo

regulyatora [The Concept of Determining Disturbances by Trends Using a Fuzzy Regulator]. *Sbornik materialov Vnutrivuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye tekhnologii v obrazovanii i promyshlennosti: ot teorii k praktike»* [Collection of Materials of the Intra-University Scientific and Practical Conference «Modern Technologies in Education and Industry: from Theory to Practice»]. 2017, pp. 106-108. [in Russian].

7. Murav'eva E.A., Usanin O.A., Kubryak A.I. Primenenie nechetkogo regulyatora s dvoynoi bazoi pravil dlya upravleniya tekhnologicheskimi parametrami [Application of a Fuzzy Controller with a Double Base of Rules for Controlling Technological Parameters]. *Sbornik materialov Vnutrivuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye tekhnologii v obrazovanii i promyshlennosti: ot teorii k praktike»* [Collection of Materials of the Intra-University Scientific and Practical Conference «Modern Technologies in Education and Industry: from Theory to Practice»]. 2017, pp. 112-115. [in Russian].

8. Murav'eva E.A., Solov'ev K.A., Mananov I.A. Kriterii kachestva avtomatizirovannoi sistemy upravleniya na baze nechetkogo regulyatora [Quality Criteria for an Automated Control System Based on a Fuzzy Controller]. *Sbornik materialov II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Avtomatizatsiya, energo- i resursosberezhenie v promyshlennom proizvodstve»* [Collection of Materials of the II International Scientific and Technical Conference «Automation, Energy and Resource Saving in Industrial Production»]. 2017, pp. 153-155. [in Russian].

9. Murav'eva E.A., Solov'ev K.A., Grigor'ev E.S. Sistema upravleniya davleniem v isparitele freona po matematicheskoi modeli apparata [Pressure Control System in the Freon Evaporator According to the Mathematical Model of the Apparatus]. *Sbornik materialov II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Avtomatizatsiya, energo- i resursosberezhenie v promyshlennom proizvodstve»*. [Collection of Materials of the II International Scientific and Technical Conference «Automation, Energy and Resource Saving in Industrial Production»]. 2017, pp. 157-159. [in Russian].

10. Solovyov K.A., Muravyova E.A. Synthesis Methods for Fuzzy Controller with

Double Base of Rules. *CSIT'2016. Proceedings of the 18th International Workshop on Computer Science and Information Technologies*, 2016, pp. 83-88.

11. Shumikhin A.G., Boyarshinova A.S. Parametricheskaya identifikatsiya sistem upravleniya s obratnoi svyaz'yu na osnove neirosetevogo modelirovaniya protsessov ikh funktsionirovaniya [Parametric Identification of Control Systems with Feedback on the Basis of Neural Network Modeling of the Processes of Their Functioning]. *Inzhenernyi vestnik Dona — Engineering Bulletin of Don*, 2018, No. 2, pp. 383-399. [in Russian].

12. Pigasova N.I., Shumikhin A.G., Stafeychuk B.G., Smirnov O.A. Otsenka stokhasticheskikh svoystv ekvivalentnykh vozmushchayushchikh vozdeystviy v sisteme regulirovaniya moshchnosti pryamotochnogo kotla blochnoi TES [Estimation of Stochastic Properties of Equivalent Disturbing Influences in the Power Control System of a Direct-Flow Boiler of a Block TPP]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya — Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems*, 2019, No. 19, pp. 102-110. [in Russian].

13. Shumikhin A.G., Boyarshinova A.S. Parametricheskaya identifikatsiya upravlyemogo ob'ekta v rezhime ego ekspluatatsii s primeneniem tekhnologii neironnykh setei [Parametric Identification of a Controlled Object in Its Operation Mode Using Neural Network Technology]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*, 2016, No. 31, pp. 106-120. [in Russian].

14. Shumikhin A.G., Aleksandrova A.S., Mustafin A.I. Parametricheskaya identifikatsiya tekhnologicheskogo ob'ekta v rezhime ego ekspluatatsii s primeneniem tekhnologii neironnykh setei [Parametric Identification of a Technological Object in Its Operational Mode Using Neural Network Technology]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*, 2018, No. 26, pp. 29-41. [in Russian].

15. Hu Y., Yang Y., Li S., Zhou Y. Fuzzy Controller Design of Micro-unmanned Helicopter Relying on Improved Genetic Optimization Algorithm. *Aerospace Science and Technology*, March 2020, Vol. 98, No. 105685.

16. Liang H., Zou J., Zuo K., Khan M. An Improved Genetic Algorithm Optimization Fuzzy Controller Applied to the Wellhead Back Pressure Control System. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, Vol. 142, No. 106708.

17. Talbi N. Design of Fuzzy Controller Rule Base Using Bat Algorithm. *Energy Procedia*, April 2019, Vol. 162, pp. 241-250.

18. Lamamra K., Batat F., Mokhtari F. A New Technique with Improved Control Quality of Nonlinear Systems Using an Optimized Fuzzy Logic Controller. *Expert Systems with Applications*, May 2020, Vol. 145, 1, No. 113148.

19. Alsafadi L.A., Chulin N.A., Mironova I.V. Synthesis of Fuzzy Controller Based on Simple PID Controller. *Procedia Computer Science*, 2019, Vol. 150, pp. 28-38.

20. Sreedharan D., Paul V., Thottungal R. Mathematical Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell and Fuzzy-Based Intelligent Controllers for Performance Enhancement. *Computers & Electrical Engineering*, July 2019, Vol. 77, pp. 354-365.

21. Farajdadian S.M., Hassan Hosseini. Design of an Optimal Fuzzy Controller to Obtain Maximum Power in Solar Power Generation System. *Solar Energy*, April 2019, Vol. 182, pp. 161-178.

22. Jain M., Madeira A., Martins Manuel A. A Fuzzy Modal Logic for Fuzzy Transition Systems. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2020, Vol. 3481, pp. 85-103.

23. Lu Y. Adaptive-Fuzzy Control Compensation Design for Direct Adaptive Fuzzy Control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, Vol. 26, Issue 6.

24. Hesamian G., Akbari M.G., Yaghoobpoor R. Quality Control Process Based on Fuzzy Random Variables. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, Vol. 27, Issue 4.

25. Shi Q., Lam H., Xuan C., Chen M. Adaptive Neuro-Fuzzy PID Controller Based on Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm. *Neurocomputing, Corrected Proof, Available*. 8 April 2020.



Нуйкин Д. А.
Nuykin D. A.

*магистрант кафедры
«Автоматизированные технологические и
информационные системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация*



Кулакова Е. С.
Kulakova E. S.

*кандидат технических наук, ассистент
кафедры «Автоматизированные
технологические и информационные
системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация*

УДК 621

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-113-119

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Актуальность

Современные системы управления производственными процессами в плане оперативной обработки информации имеют повышенные требования в области организации высоконадежных вычислений. Актуальность данного фактора выражается в том, что современные телекоммуникационные, вычислительные, управленческие и другие системы не должны приостанавливать свою работу ввиду причин, вызванных неисправностью производственных систем управления. Подобные приостановки в работе могут вызвать задержку выхода продукции, неисправность оборудования, потерю прибыли и др. Именно поэтому вопрос обеспечения надежности отказоустойчивости автоматизированной системы управления является наиболее актуальным и перспективным на сегодняшний день.

В современном мире интенсивными темпами развиваются технические системы, одними из которых являются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Применение подобных систем представляет возможность увеличить производительность и эффективность технологических процессов в колоссальных масштабах. Необходимо отметить, что показатель эффективности АСУ ТП напрямую зависит от параметров и показателей системы в целом.

Одним из основных факторов, колоссально влияющих на данные системы управления, является надежность. Надежность — это показатель, который включает в себя определенное количество параметров. На сегодняшний день существует целый набор принципов обеспечения надежности. Одним из традиционных подходов к анализу надежности является анализ надежности на основе анализа безотказности системы. Стоит отметить, что на практике надежность автоматизированных систем управления определяется и иными показателями, к примеру безопасностью. Неосознанно надёжность объекта приравнивают к недопустимости отказов в работе автоматизированных систем. Данное значение надёжности в ограниченном смысле можно рассматривать как свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение определенного времени или определенной наработки. Можно также увидеть, что надёжность объекта состоит в отсутствии внезапных нежелательных изменений его качества во время эксплуатации, хранения. Надёжность непосредственно соприкасается с разнообразными сторонами процесса эксплуатации.

Надёжность в общепринятом понимании – комплексное свойство, которое обусловлено типом объекта, свойствами его эксплуатации, и также имеют в своем составе следующие свойства: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость и различные сочетания этих свойств.

Актуальной на сегодняшний день задачей является разработка безопасных и в то же время безотказных систем, что достигается исключительно посредством использования и внедрения современных стандартов и технологий безопасности и надежности систем.

Цель исследования

Основной целью данной статьи является определение методов эффективности работы различных моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления в технологической области.

Методы исследования

Для достижения данной цели в работе рассмотрено определение функции, а также назначение моделей надежности в целом. Поставлены задачи для достижения надежности автоматизированных систем управления. Описаны мероприятия, проводимые с целью установления текущих значений параметров надежности систем.

Результаты

Приведена классификация моделей надежности и выявлены основные преимущества отдельно взятых моделей, реализуемых на различных программных платформах.

Ключевые слова: модель, надежность, отказоустойчивость, автоматизация, система, оборудование, управление, вычисление, неисправность, оценка.

THE EFFICIENCY OF THE RELIABILITY MODELS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM

Relevance

Modern production process management systems in terms of operational information processing have increased requirements in the field of organizing highly reliable computing. The relevance of this factor is expressed in the fact that modern telecommunications, computing, management and other systems should not suspend their work due to the reasons caused by the malfunction of production control systems. Such work stoppages can cause delayed output of products, equipment malfunction, loss of profit, etc. That is why the issue of ensuring the reliability of fault tolerance of an automated control system is the most relevant and promising today.

One of the rapidly developing technical systems in the modern world are automated process control systems. The use of such systems makes it possible to increase the productivity and intensity of technical processes on a huge scale. It should be noted that the efficiency indicator of the process control system directly depends on the parameters and indicators of the system as a whole.

One of the main factors that significantly affect these control systems is reliability. Reliability is an indicator that includes a certain number of parameters. There is a whole set of reliability principles today. One of the traditional approaches to reliability analysis is reliability analysis based on system reliability analysis. In practice, the reliability of automated control systems is determined by other indicators such as safety. Unconsciously, the reliability of an object is equated with the inadmissibility of failures in the operation of automated systems. This value of reliability in a limited sense can be considered as the property of an object to maintain an operable state for a certain time or a certain operating time. You can also see that the reliability of an object consists in the absence of sudden unacceptable changes in its quality during operation, storage. Reliability comes into direct contact with various aspects of the operation process. Reliability in the conventional sense is a complex property that is determined by the type of object, the properties of its operation, and also includes the following properties: reliability, durability, maintainability, preservation and various combinations of these properties.

The urgent task today is the development of safe and at the same time trouble-free systems, which is achieved exclusively through the use and implementation of modern standards and technologies for the safety and reliability of systems.

Aim of research

The main aim of this article is to determine the methods of efficiency of various models of reliability of a fault-tolerant automated control system in the technological field.

Research methods

To achieve this aim, the paper considers the definition of the function, as well as the purpose of reliability models in general. The tasks for achieving the reliability of automated control systems are set. The measures taken to establish the current values of the system reliability parameters are described.

Results

The classification of reliability models is given and the main advantages of individual models implemented on various software platforms are identified.

Keywords: model, reliability, fault tolerance, automation, system, equipment, control, calculation, fault, evaluation.

Оценка надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления технологическими процессами

Оценка надежности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) осуществляется на начальных этапах проектирования с целью расчета требуемого уровня защищенности, производительности и погрешности готовой системы. Структурная сложность, многофункциональность, более строгие условия эксплуатации и высокая надежность проектируемых автоматизированных систем управления определяются необходимостью оценки надежности системы. Качество готовой автоматизированной системы зависит от безопасности, производительности и эффективности всего объекта управления [1]. Надежность системы автоматического управления определяется требованиями ГОСТ 24.701-86. В качестве показателей надежности системы стандарт выделяет: надежность

выполнения функций и риск возникновения аварий [2].

Проектная оценка проводится с целью определения основных конструктивных решений, способных обеспечить необходимый уровень надежности, безотказности и ремонтпригодности системы. Необходимо отметить, что оценка надежности проводится и для вновь создаваемых систем, и для модернизируемых АСУ ТП. Основная задача оценки надежности заключается в получении уровня надежности и безопасности для увеличения качества и эффективности предлагаемых систем управления. В результате сбора и обработки исходных данных о надежности системы, аппаратно-программных средств разрабатываются мероприятия по повышению надежности [3].

Мероприятия по оценке надежности включают следующие факторы, указанные на рисунке 1.

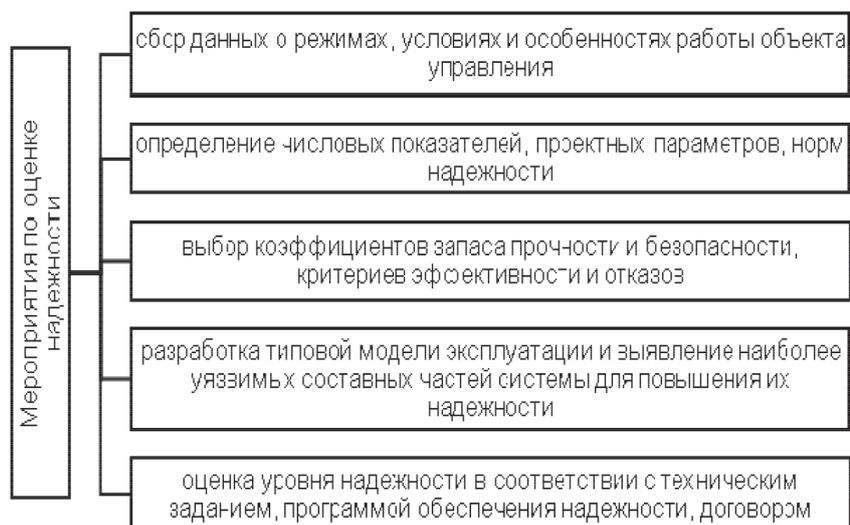


Рисунок 1. Мероприятия по оценке надежности

Figure 1. Reliability assessment activities

Уровень надежности оценивается по отдельным подсистемам, особенностям и схемам управления; по авариям и аварийным ситуациям, а также по всей конструкции автоматизированной системы управления. Целью оценки проекта является определение уровня безопасности технологических процессов, непрерывной работы устройства, системы автоматического управления в целом и ее составных частей. На основе этой информации разрабатываются рекомендации и мероприятия по повышению надежности и безопасности работы автоматизированной системы управления [4].

Для каждого подразделения предприятия существует два основных требования – это уменьшение затрат и поддержание непрерывности процесса. Самыми значительными производственными требованиями являются отказоустойчивость и снижение влияния человеческого фактора.

В связи с этим при разработке мероприятий по обеспечению надежности автоматизированных систем исполнитель решений сталкивается с рядом изначально противоречивых задач, указанных на рисунке 2.

Невозможно получить правильное решение всех четырех задач. Практически всегда процесс проектирования информационных систем носит компромиссный характер и проходит в наиболее актуальных направлениях по ходу решения задач, в порядке, описанном выше [5].

Испытание надежности автоматизированной производственной системы

Требуется знать, что производство работ по испытанию автоматизированной производственной системы неизбежно растянуто по времени и включают в себя мероприятия, указанные на рисунке 3.

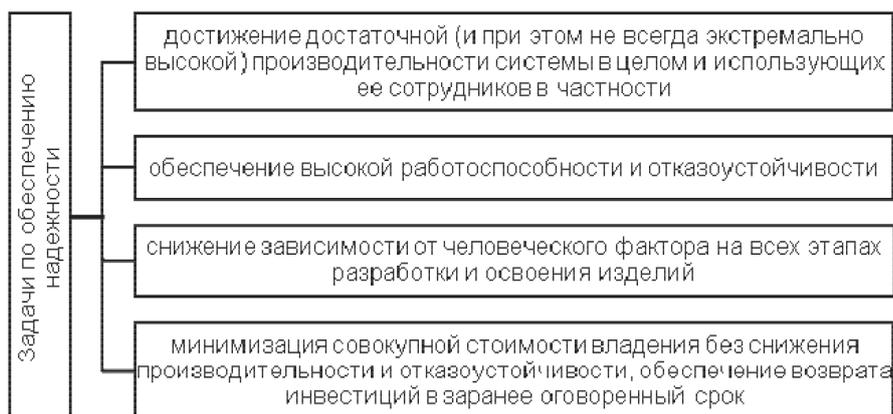


Рисунок 2. Задачи по обеспечению надежности

Figure 2. Reliability objectives

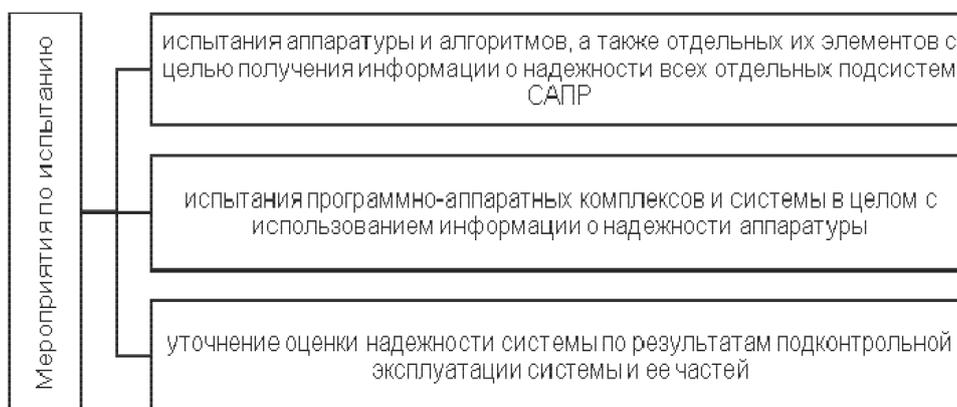


Рисунок 3. Мероприятия по испытанию автоматизированной производственной системы

Figure 3. Activities for testing an automated production system

Примем во внимание, что лучшим рациональным решением задачи оценки надежности проектируемой системы в целом является расчетно-экспериментальный метод. Данный метод представляет собой сочетание натуральных испытаний и расчетов, а также дальнейшее подтверждение полученных оценок с использованием ограниченного числа тестов. При использовании расчетно-экспериментального метода необходимо учитывать, что для каждой крупной системы требуется разработка собственной методики испытаний, отражающей ее функции. Тестирование элементов, входящих в состав большой системы, следует рассматривать как предварительный этап тестирования всей системы [6].

Для уменьшения временных и финансовых затрат по планируемым испытаниям применяются специальные приемы, указанные на рисунке 4.

Конечный перечень работ по испытаниям надежности системы будет иметь совокупность взаимосвязанных испытаний, сопутствующих процессу устройства системы от стадии проектирования до введения в эксплуатацию. Требуется обратить внимание на то, что не допускается применение принципов организации испытаний надежности одного технологического производства при формировании испытаний других сложных программно-технических комплексов. Задачей ведения тестирования является мониторинг надежности проектируемой системы при ее развертывании [7].

Изучение работы моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы

Используемый термин «модель надежности программного обеспечения» относится к

математической модели. Данная модель создана для оценивания зависимости надежности программного продукта относительно нескольких определенных параметров. Довольно часто значения данных параметров являются известными или же могут быть получены в результате наблюдения и экспериментального исследования процесса работы программного обеспечения.

На рисунке 5 приведена классификация моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления технологическим процессом. Указанные модели надежности программных продуктов классифицируются на аналитические и эмпирические.

Аналитические модели делятся на две группы: динамические и статические модели. В динамических моделях поведение (возникновение отказов) оценивается с течением времени. В статических моделях возникновение нарушений связано не со временем, а только с зависимостью числа ошибок от числа тестовых пробегов (по области ошибок) или зависимостью числа ошибок от характеристик входных данных (по области данных).

Эмпирические модели основываются на анализе структурных особенностей программного продукта. Данные модели анализируют зависимость показателей надежности относительно количества межмодульных связей, количества циклов, отношения количества прямолинейных участков и другое. Аналитические модели предоставляют возможность к расчету количественных показателей надежности посредством данных о поведении программы в результате тестирования [8, 9].

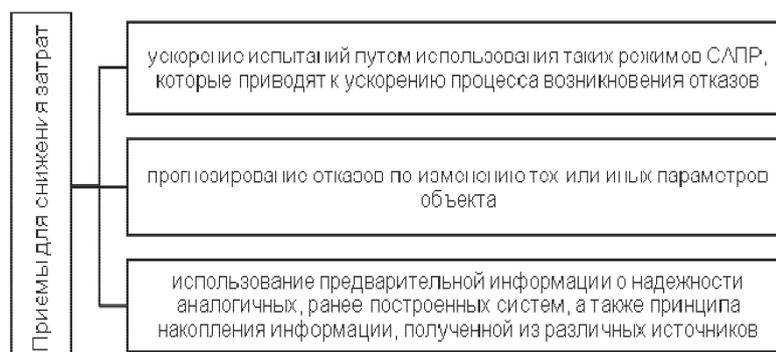


Рисунок 4. Приемы для снижения временных и финансовых затрат на испытания
Figure 4. Methods to reduce the time and cost of testing

Для возможности применения динамических моделей требуется наличие данных о возникновении отказов во времени. При фиксации интервалов каждой неисправности в таком случае выходит непрерывная картина возникновения отказов во времени (группа динамических моделей с непрерывным вре-

менем). Может фиксироваться только число отказов за любой промежуток времени. В этом случае поведение модели может быть представлено только в дискретных точках (группа динамических моделей с дискретным временем) [8, 9].

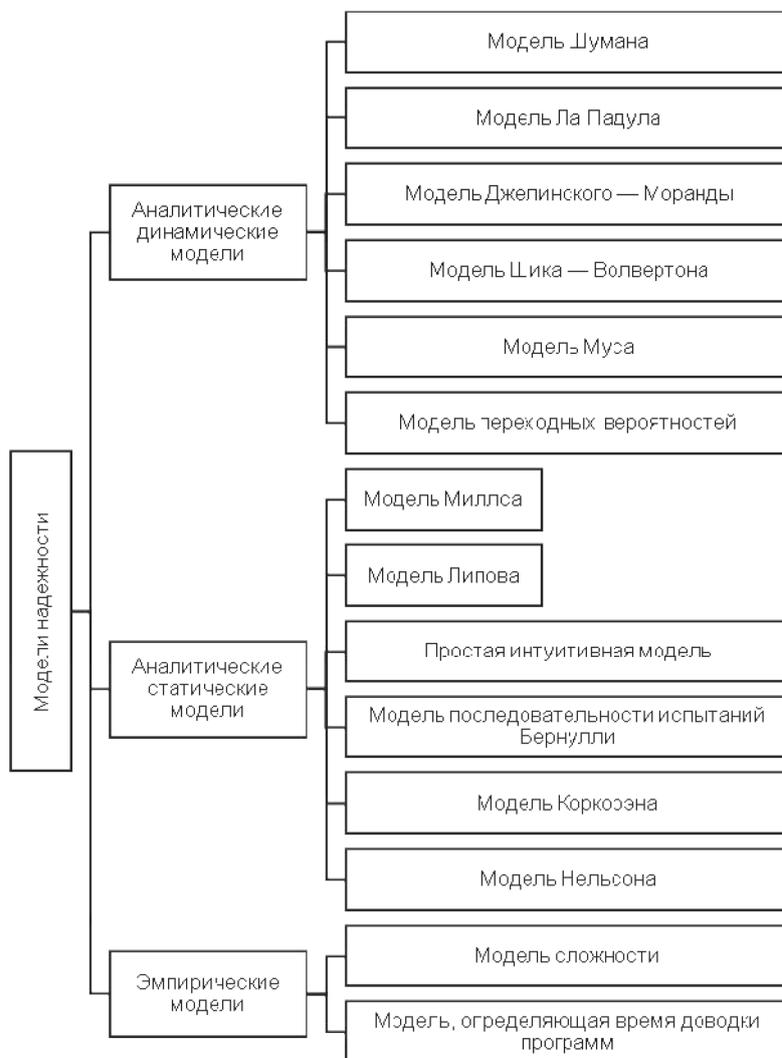


Рисунок 5. Классификация моделей надежности программных средств

Figure 5. Classification of software reliability models

Выводы

Основной целью данной статьи являлось изучение эффективности работы различных моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления в технологической области. В результате выполненной работы были решены следующие задачи: изучена оценка надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления технологическими процессами, изучено испытание надежности автоматизи-

рованной производственной системы, а также изучена работа моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы. Также в работе были определены: мероприятия по оценке надежности, задачи по обеспечению надежности, мероприятия по испытанию автоматизированной производственной системы, приемы для снижения временных и финансовых затрат на испытания и классификация моделей надежности программных средств.

Список литературы

1. Титов А.В., Харьковской А.А., Чуканов В.О. Модели надежности программного обеспечения ответственного назначения // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление. 2011. № 2 (120). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-nadezhnosti-programmnogo-obespecheniya-otvetstvennogo-naznacheniya>.
2. Василенко Н.В., Макаров В.А. Модели оценки надежности программного обеспечения // Вестник НовГУ. 2004. № 28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-otsenki-nadezhnosti-programmnogo-obespecheniya>.
3. Blagodatskikh V.A., Volnin V.A., Poskakalov K.F. *Standardization of Software Development: Textbook* / Ed. by O.S. Razumov. Moscow: Finance and Statistics Publ., 2003.
4. Хунов Т.Х. Анализ моделей прогнозирования надежности программных средств // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2016. № 19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-modeley-prognozirovaniya-nadezhnosti-programmnyh-sredstv>.
5. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005.
6. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
7. Ruffing J.S. *Windows 2008 Server R2 & SQL Server 2008 R2 High Availability Clustering*. Scream Publications, 2011.
8. Weldon B.H., Rogers S.B. *HP ProLiant Servers: Official Study Guide and Desk Reference*. Prentice Hall, 2004.
9. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2010.
10. Tulloch M. *Introducing Windows Server 2008*. Microsoft Press, 2007.

References

1. Titov A.V., Khar'kovoi A.A., Chukanov V.O. *Modeli nadezhnosti programmnogo obespecheniya otvetstvennogo naznacheniya* [Models of Reliability of Responsible Software].

Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika, telekommunikatsii i upravlenie – Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University. Computer Science, Telecommunications and Management, 2011, No. 2 (120). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-nadezhnosti-programmnogo-obespecheniya-otvetstvennogo-naznacheniya>. [in Russian].

2. Vasilenko N.V., Makarov V.A. *Modeli otsenki nadezhnosti programmnogo obespecheniya* [Software Reliability Assessment Models]. *Vestnik NovGU – NovSU Bulletin*, 2004, No. 28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-otsenki-nadezhnosti-programmnogo-obespecheniya>. [in Russian].

3. Blagodatskikh V.A., Volnin V.A., Poskakalov K.F. *Standardization of Software Development: Textbook*. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2003. [in Russian].

4. Khunov T.Kh. *Analiz modelei prognozirovaniya nadezhnosti programmnykh sredstv* [Analysis of Software Reliability Forecasting Models]. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh – New Information Technologies in Automated Systems*, 2016, No. 19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-modeley-prognozirovaniya-nadezhnosti-programmnyh-sredstv>. [in Russian].

5. Cherkesov G.N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* [Reliability of Hardware and Software Systems]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2005. [in Russian].

6. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of Reliability Theory]. 2nd ed. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. [in Russian].

7. Ruffing J.S. *Windows 2008 Server R2 & SQL Server 2008 R2 High Availability Clustering*. Scream Publications, 2011.

8. Weldon B.H., Rogers S.B. *HP ProLiant Servers: Official Study Guide and Desk Reference*. Prentice Hall, 2004.

9. Oliner V.G., Oliner N.A. *Komp'yuternye seti* [Computer Networks]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2010. [in Russian].

10. Tulloch M. *Introducing Windows Server 2008*. Microsoft Press, 2007.



***Кубрин С. С.
Kubrin S. S.***

*доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией 2.3
«Геотехнологические риски
при освоении газоносных угольных
и рудных месторождений»,
ФГБУН Институт проблем комплексного
освоения недр Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация*



***Решетняк С. Н.
Reshetnyak S. N.***

*кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Энергетика
и энергоэффективность горной
промышленности», ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»;
старший научный сотрудник лаборатории
2.3 «Геотехнологических рисков
при освоении газоносных угольных
и рудных месторождений»,
ФГБУН Институт проблем комплексного
освоения недр Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация*

УДК 622:621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-120-128

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНО-МЕХАНИЗИРОВАННОГО ЗАБОЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ В ПРОГРАММЕ MATLAB

Актуальность

В настоящее время проводится достаточно большое количество научных технических, технологических и организационных исследований с целью снижению себестоимости добычи угля подземным способом. Это обусловлено определенным снижением стоимости угля как на мировом, так и на внутреннем рынках. Кроме этого, рост цифровизации в других отраслях промышленности подталкивает горнодобывающие предприятия к внедрению современных цифровых решений в своих организациях.

Цель исследования

Целью научного исследования, представленного в публикации, является построение имитационных моделей основного технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты с достаточной степенью адекватности работы реального технологического оборудования.

Метод исследования

Следует отметить, что комплексно-механизированный забой угольной шахты — это начало технологической цепи добычи угля подземным способом, от работы которого зависит работа всего угледобывающего предприятия. Поэтому моделированию режимов работы технологического оборудования комплексно-механизированного забоя необходимо уделить особое внимание. В публикации представлено имитационное моделирование оборудования комплексно-механизированного забоя угольной шахты, выполненное в имитационной среде Simulink программного продукта Matlab. В частности, представлены модели: выемочного комбайна; лавного конвейера; дробилки; перегружателя. В качестве прототипа

имитационной модели выемочного комбайна выступает Eickhoff SL-300. В качестве прототипа модели лавного конвейера выступает конвейер FFC-9 Glinik. В качестве прототипа модели дробилки выступает дробилка FLB-10G Glinik. В качестве прототипа модели перегружателя выступает перегружатель FSL-9 Glinik. Следует отметить, что именно это оборудование установлено на выемочном участке высокопроизводительной угольной шахты «Полысаевская» шахтоуправления «Комсомолец» АО «СУЭК-Кузбасс».

Результаты

Представленные имитационные модели технологического оборудования комплексно-механизированного забоя угольной шахты позволяют задавать различные значения как по электрическим, так и по технологическим параметрам. Анализ результатов моделирования позволит оптимизировать режимы работы оборудования, в том числе режимы удельного электропотребления основного технологического оборудования, что скажется на себестоимости добычи угля подземным способом и позволит повысить его конкурентоспособность на рынке.

Ключевые слова: имитационное моделирование, угольная шахта, выемочный участок, комплексно-механизированный забой, электромеханическая система, режимы электропотребления, режимы работы технологического оборудования.

SIMULATION OF COMPLEX-MECHANIZED DOWNHOLE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF A HIGH-PERFORMANCE COAL MINE IN THE MATLAB PROGRAM

Relevance

Currently, a large number of scientific, technical, technological and organizational studies are being conducted in order to reduce the cost of underground coal mining. This is due to a certain reduction in the cost of coal, both on the global and domestic markets. In addition, the growth of digitalization in other industries is pushing mining companies to implement modern digital solutions in their organizations.

Aim of research

The aim of the scientific research presented in the publication is to build simulation models of the main technological equipment of the complex-mechanized face of a high-performance coal mine with a sufficient degree of adequacy to the real equipment.

Methods

It should be noted that the complex-mechanized face of a coal mine is the beginning of the technological chain of coal mining by underground method, on the work of which the work of the entire coal mining enterprise depends. Therefore, special attention should be paid to modeling the operating modes of the complex-mechanized face equipment. The publication presents a simulation of the equipment of complex-mechanized coal mine face, presented in the software product Matlab. In particular, the following models are presented: a dredging combine; an avalanche conveyor; a crusher; a reloader. The Eickhoff SL-300 (variant 4) serves as a prototype of the simulation model of the dredging combine. The prototype of the avalanche conveyor model is the FFC-9 Glinik conveyor. The prototype model of the crusher is the FLB-10G Glinik crusher. The FSL-9 Glinik reloader serves as a prototype of the reloader model. It should be noted that this equipment is installed at the excavation site of the high-performance coal mine «Polysaevskaya» of the Komsomolets mining department of JSC «SUEK-Kuzbass».

Results

The presented simulation models of complex-mechanized coal mine face equipment will allow you to set different values, both in terms of electrical and technological parameters. The study of the simulation results will allow optimizing the operating modes of the equipment, including the modes of specific power consumption of the main technological equipment, which will affect the cost of underground coal mining and will increase its competitiveness in the market.

Keywords: simulation modeling, coal mine, excavation site, complex-mechanized face, electromechanical system, power consumption modes, operating modes of technological equipment.

Введение

В настоящее время проводится достаточно большое количество научных технических, технологических и организационных исследований с целью снижения себестоимости добычи угля подземным способом, а также обеспечения высокой производительности выемочных участков угольных шахт [1–7]. Помимо этого, проводится достаточно большой объем исследований по повышению безопасности проведения подземных горных работ [8, 9]. Однако следует отметить, что весомый вклад в себестоимость добытого угля вносит удельный расход электропотребления как по угледобывающему предприятию в целом, так и по конкретному участку работ [10–13]. Наблюдаемое в настоящее время бурное развитие цифровых технологических решений позволило рассмотреть вопросы оптимизации режимов электропотребления основного технологического оборудования угольных шахт [14, 15] в новом ракурсе. Следует отметить, что комплексно-механизированный забой угольной шахты — это начало технологической цепи добычи угля подземным способом, от работы которого зависит работы всего угледобывающего предприятия. Поэтому моделированию режимов работы технологического оборудования комплексно-механизированного забоя необходимо уделить особое внимание. Имитационное моделирование будет проводиться в имитационной среде Simulink программного про-

дукта Matlab, который достаточно хорошо зарекомендовал себя в применении к объектам как горной промышленности, так и в других областях [16–21]. В качестве прототипа объекта исследования принято оборудование комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты «Полысаевская» шахтоуправления «Комсомолец» АО «СУЭК-Кузбасс». Все это позволяет сделать заключение об актуальности научного исследования по имитационному моделированию режимов работы технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты.

Основная часть

Для моделирования выемочного комбайна угольной шахты принят высокопроизводительный выемочный комбайн Eickhoff SL-300. Данный комбайн существует в четырех модификациях, принимаем в качестве базовой четвертую (последнюю) модификацию данного выемочного комбайна. Принципиальная схема систем электроприводов очистного комплекса Eickhoff SL-300 (вариант 4) представлена на рисунке 1. В состав выемочного комбайна входит понижающий трансформатор на напряжение первичной обмотки 3300 В и напряжением вторичных обмоток 460 В (для питания преобразователя частоты системы управления подачей комбайна) и 600 В (для питания электроприводов гидравлической системы).

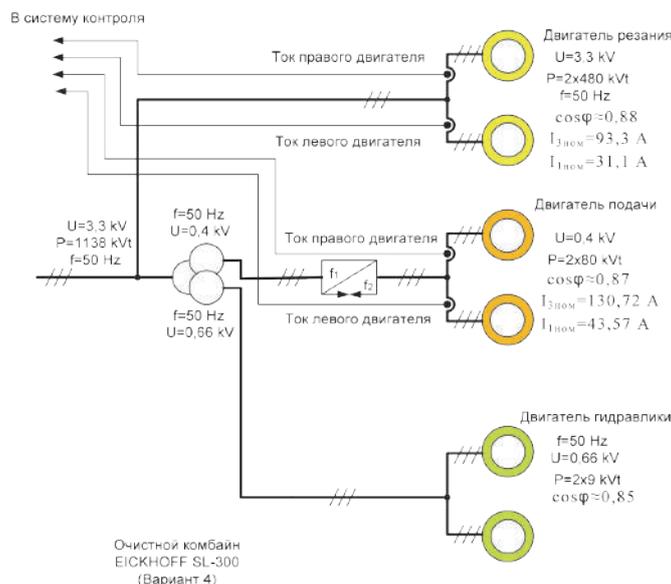


Рисунок 1. Структурная схема выемочного комбайна Eickhoff SL-300

Figure 1. Block diagram of the Eickhoff SL-300 dredging combine

На рисунке 2 представлена имитационная модель выемочного комбайна Eickhoff SL-300 (вариант 4) в программном продукте Matlab. В качестве источника напряжения в модели используется трехфазный программируемый источник (V) напряжением 3,3 кВ, частота питающей сети 50 Гц. К источнику напряжения подключен трехфазный универсальный измеритель тока и напряжения, от которого происходит питание всех систем электроприводов выемочного комбайна. Кроме того, сигналы по уровню тока и напряжения, выходящие из этого измерительного устройства, выводятся на экраны осциллографов, а также на блок определения активной и индуктивной мощности (PQ), с последующим выводом на осциллограф. Питающее напряжение 3,3 кВ поступает на 2 асинхронных двигателя, которые имитируют работу органов резания выемочного комбайна (левого и правого). С выхода имитационных блоков двигателей органов резания снимаются параметры по скорости вращения роторов и току в статорных обмотках.

В состав имитационной модели выемочного комбайна также входит понижающий трансформатор (T1) на напряжение первичной обмотки 3300 В и напряжением вторичных обмоток 460 В (для питания преобразо-

вателя частоты системы управления подачи очистного комплекса) и 600 В (для питания электроприводов гидравлической системы). Имитационные блоки асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, используемые в гидравлической системе комбайна, присоединяются к вторичной обмотке трансформатора (T1) без каких-либо преобразовательных устройств. С выхода имитационных блоков двигателей гидравлической системы снимаются параметры по скорости вращения роторов и току в статорных обмотках.

Система подачи выемочного комбайна предусматривает возможность регулирования скорости движения. Ввиду этого в состав данной системы введен статической преобразователь частоты.

Имитационная модель органов подачи выемочного комбайна состоит из неуправляемого выпрямителя, трехфазного автономного инвертора напряжения, 6-пульсного генератора импульсов для управления автономным инвертором напряжения и двумя асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. С выхода имитационных блоков двигателей системы подачи снимаются параметры по скорости вращения роторов и току в статорных обмотках.

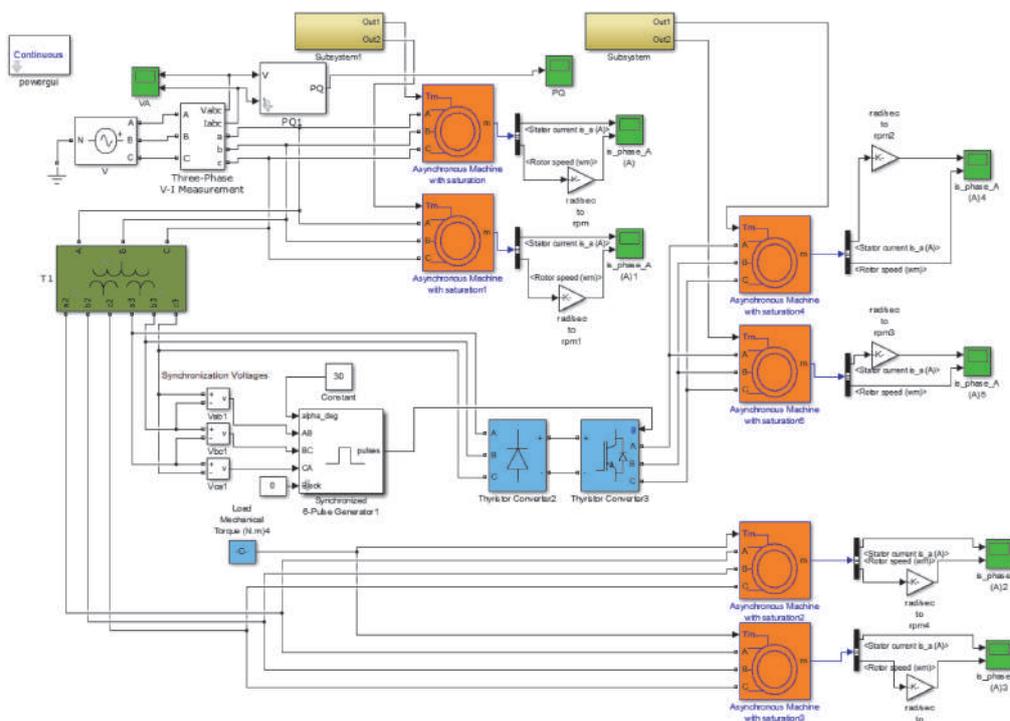


Рисунок 2. Имитационная модель выемочного комбайна Eickhoff SL-300

Figure 2. Simulation model of the Eickhoff SL-300 dredging combine

Следует отметить, в имитационной модели выемочного комбайна возможна настройка каждого электродвигателя под конкретный технологический режим работы, что обеспечивает возможность провести имитационное моделирование практически любого режима работы выемочного комбайна. Это реализовано в блоках подсистем модели Subsystem1 и Subsystem2, в которых закладываются нагрузочные диаграммы статических механических нагрузок для определенных режимов.

Одним из самых энергоемких потребителей в условиях выемочного участка угольной шахты является забойный (лавный, скребковый) конвейер. Данное оборудование предназначено для транспортировки отбитого угля из забоя в конвейерный штрек.

В качестве прототипа модели используется забойный конвейер FFC-9 Glinik, выполненный по трехдвигательной схеме. На рисунке 3 представлена структурная схема забойного конвейера FFC-9 Glinik. Данная структурная схема является наиболее распространенной и состоит из трех двигателей. Два головных двигателя располагаются в начале забойного конвейера и работают на один приводной барабан, обеспечивая двойной момент. Эти двигатели подключены к питающей сети с напряжением 1140 В без каких-либо преобразовательных устройств.

Вспомогательный двигатель, расположенный в хвосте забойного конвейера, подклю-

чен к питающей сети напряжением 1140 В через устройство плавного пуска. Данное устройство выполнено с использованием элементов преобразовательной техники, в значительной степени повышает уровень надежности этого оборудования, обеспечивая плавный запуск забойного конвейера путем оптимального регулирования натяжения на статоре в процессе пусков с ограничением токов и соответственно устранением рывков в механической части.

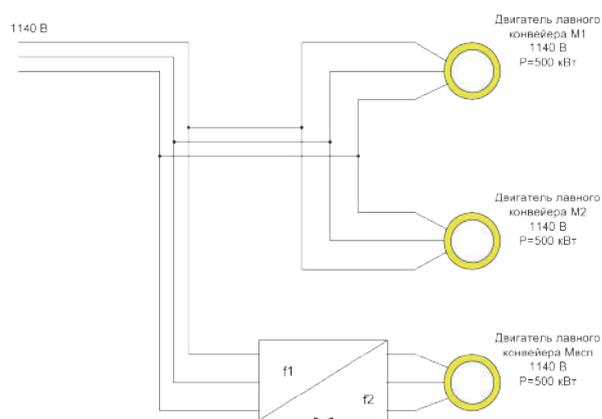


Рисунок 3. Структурная схема забойного конвейера FFC-9 Glinik

Figure 3. Block diagram of the conveyor FFC-9 Glinik

Структурная схема имитационной модели забойного конвейера FFC-9 Glinik в программном продукте Matlab представлена на рисунке 4. В качестве источника напряжения в модели используется трехфазный программируемый источник (V) напряжением 1,14 кВ,

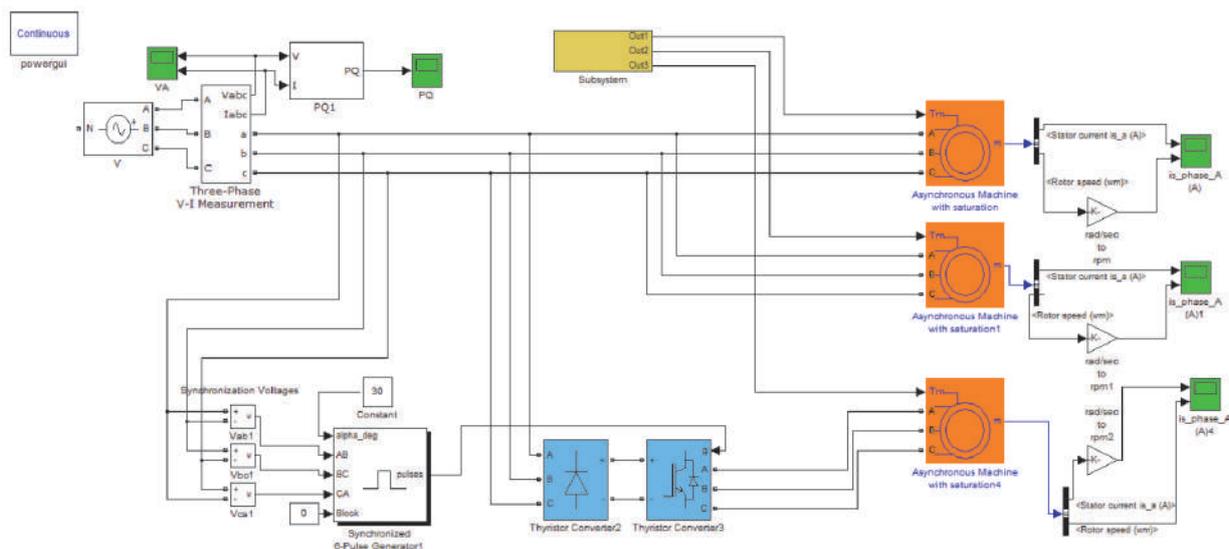


Рисунок 4. Имитационная модель забойного конвейера FFC-9 Glinik

Figure 4. Simulation model of the conveyor FFC-9 Glinik

частота питающей сети 50 Гц. К источнику напряжения подключен трехфазный универсальный измеритель тока и напряжения, от которого происходит питание всех систем электроприводов забойного конвейера. Кроме того, сигналы по уровню тока и напряжения, выходящие из этого измерительного устройства, выводятся на экраны осциллографов, а также на блок определения активной и индуктивной мощности (PQ), с последующим выводом на осциллограф. Питающее напряжение 1,14 кВ поступает на 2 асинхронных двигателя, которые имитируют работу головных асинхронных двигателей, расположенных в начале конвейера. С выхода имитационных блоков головных двигателей снимаются параметры по скорости вращения роторов и току в статорных обмотках.

Система управления вспомогательного привода выполнена с использованием преобразователя частоты. Имитационная модель этой системы управления электроприводом состоит из неуправляемого выпрямителя, трехфазного автономного инвертора напряжения, 6-пульсного генератора импульсов для управления автономным инвертором напряжения и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

С выхода имитационных блоков двигателя снимаются параметры по скорости вращения роторов и току в статорных обмотках.

Следует отметить, в имитационной модели забойного конвейера возможна настройка под конкретный режим работы с помощью встроенной подсистемы (блок Subsystem) с закладываемой в ней технологической нагрузочной диаграммой, что обеспечивает возможность провести имитационное моделирование в широком диапазоне режимов.

В состав оборудования выемочного участка угольной шахты также входит дробилка, которая предназначена для разрушения негабаритных кусков угля и породных включений, транспортируемых из выемочного забоя, посредством ударного механического воздействия. Данное оборудование устанавливается перед перегружателем.

Система электропривода выполнена с использованием асинхронного электродвига-

теля с короткозамкнутым ротором, получающего питание без преобразовательных устройств. Также в состав оборудования выемочного участка угольной шахты входит перегружатель, который предназначен для транспортирования добытого угля от лавного (забойного, скребкового) конвейера до ленточного магистрального конвейера. Этот элемент представляет собой особый вид скребкового конвейера с переменным уровнем става. Система электропривода данного устройства выполнена с использованием асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, получающего питание от преобразователя частоты. Структурная схема дробилки FLB-10G Glinik и перегружателя FSL-9 Glinik представлена на рисунке 5.

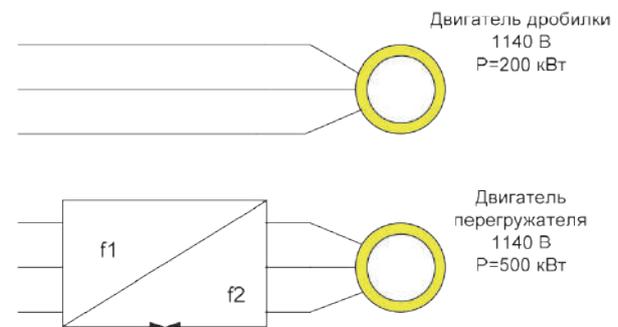


Рисунок 5. Структурная схема дробилки FLB-10G Glinik и перегружателя FSL-9 Glinik

Figure 5. Block diagram of the FKB-10G Glinnik crusher and the FSL9 Glinnik reloader

На рисунках 6 и 7 представлены имитационная модель дробилки FLB-10G Glinik и имитационная модель перегружателя FSL-9 Glinik соответственно. В качестве источника напряжения в модели дробилки используется трехфазный программируемый источник (V) напряжением 1,14 кВ, частота питающей сети 50 Гц. К источнику напряжения подключен трехфазный универсальный измеритель тока и напряжения, от которого происходит питание электропривода дробилки. Кроме того, сигналы по уровню тока и напряжения, выходящие из этого измерительного устройства, выводятся на экраны осциллографов, а также на блок определения активной и индуктивной мощности (PQ), с последующим выводом на осциллограф. Питающее напряжение 1,14 кВ поступает на асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

С выхода имитационного блока двигателя снимаются параметры по скорости вращения ротора и ток в статорных обмотках.

В качестве источника напряжения в модели перегружателя используется трехфазный программируемый источник (V) напряжением 1,14 кВ, частота питающей сети 50 Гц. К источнику напряжения подключен трехфазный универсальный измеритель тока и напряжения, от которого происходит питание электропривода дробилки. Кроме того, сигналы по уровню тока и напряжения, выходящие из этого измерительного устройства, выводятся на экраны осциллографов, а также на блок определения активной и индуктивной мощности (PQ), с последующим выводом на осциллограф. Система управления электропривода перегружателя выполнена с использованием преобразователя частоты.

Имитационная модель этой системы управления электроприводом состоит из неу-

правляемого выпрямителя, трехфазного автономного инвертора напряжения, 6-пульсного генератора импульсов для управления автономным инвертором напряжения и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. С выхода имитационных блоков двигателя снимаются параметры по скорости вращения роторов и току в статорных обмотках.

Следует также отметить существующую возможность в этих моделях корректировки режимов работы в широком диапазоне путем задания технологических нагрузочных диаграмм на приводные двигателю.

Получены результаты имитационного моделирования основного технологического оборудования высокопроизводительного выемочного участка, в частности на рисунке 8 представлены результаты имитационного моделирования выемочного комбайна по модели рисунка 2.

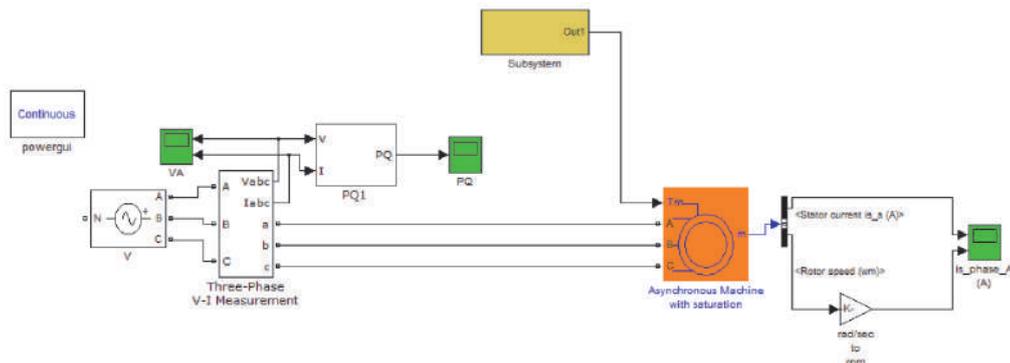


Рисунок 6. Имитационная модель дробилки FLB-10G Glinik

Figure 6. Simulation model of the FLB-10G Glinik crusher

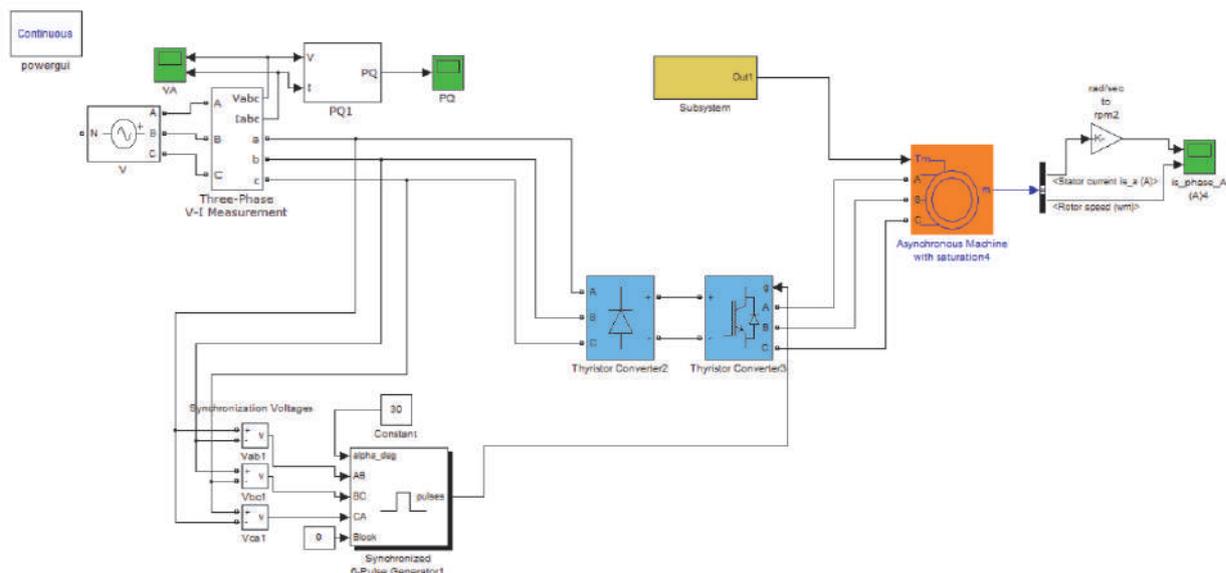


Рисунок 7. Имитационная модель перегружателя FSL-9 Glinik

Figure 7. Simulation model of the FSL-9 Glinik reloader

Проведена проверка адекватности имитационных моделей основного технологического оборудования выемочного участка угольной шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс».

Следует учесть, что при проверке адекватности моделей были приняты стандартные допущения по определению действующих значений токов и напряжений, а также сред-

них значений токов и напряжений по отношению к амплитудным значениям токов и напряжений, полученных в результате имитационного моделирования технологического оборудования высокопроизводительных выемочных участков.

Результаты проверки адекватности моделей представлены в таблице 1.

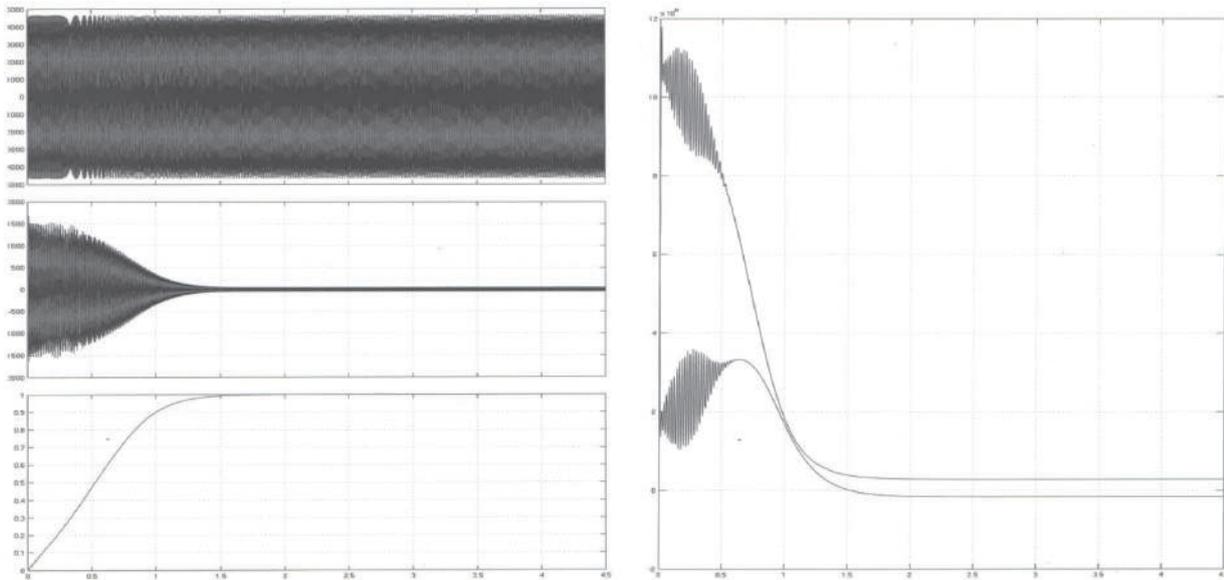


Рисунок 8. Результаты имитационного моделирования выемочного комбайна, двигатель органа резания (правый) (напряжение, ток, относительная скорость вращения, (активная и реактивная мгновенные мощности))

Figure 8. The results of the simulation of the dredging combine, the motor of the cutting body (right) (voltage, current, relative speed of rotation, (active and reactive instantaneous power))

Таблица 1. Результаты проверки адекватности моделей

Table 1. Results of checking the adequacy of models

№	Название оборудования	$U_{\text{экс}}, \text{В}$	$I_{\text{экс}}, \text{А}$	$U_{\text{мод}}, \text{В}$	$I_{\text{мод}}, \text{А}$	Разница \pm	% адекватности
1	Выемочный комбайн	3271	83,89	3300	88,38	18,8 В 4,49 А	0,60 % 5,40 %
2	Забойный конвейер	1134	406,70	1140	390,3	6,0 В 16,4 А	0,53 % 4,01 %
3	Дробилка	1134	124,90	1140	115,3	6,0 В 9,6 А	0,53 % 7,69 %
4	Перегружатель	1147	40,00	1140	37,5	7,0 В 2,5 А	0,61 % 6,25 %

Вывод

Следует отметить, что представленные имитационные модели технологического оборудования комплексно-механизированного забоя угольной шахты дают результаты с высокой степенью адекватности, позволяют задавать различные режимы работы как по электрическим, так и по технологическим

параметрам. Анализ результатов моделирования позволит оптимизировать режимы работы оборудования, в том числе режимы удельного электропотребления основного технологического оборудования, что скажется на себестоимости добычи угля подземным способом и позволит повысить его конкурентоспособность на рынке.

Список литературы

1. Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С., Руденко Ю.Ф. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах. М.: Изд-во ООО «Московский издательский дом», 2009. 396 с.
2. Мешков А.А., Казанин О.И., Сидоренко А.А. Реализация производственного потенциала высокопроизводительного оборудования — ключевое направление совершенствования подземной добычи энергетических углей // Горный информационно-аналитический бюллетень 2020. № 12. С. 156-165. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-156-165.
3. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Meshkov A.A., Sidorenko S.A. Reproduction of the Longwall Panels: Modern Requirements for the Technology and Organization of the Development Operations at Coal Mines // Eurasian Mining. 2020 (2). P. 19-23. DOI: 10.17580/em.2020.02.05.
4. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Sirenko Y.G. Analysis of the Methods of Calculating the Main Roofcaving Increment in Mining Shallow Coal Seams with Long Breaking Faces // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14. No. 3. P. 732-736.
5. Sidorenko A.A., Ivanov V.V., Sidorenko S.A. Numerical Simulation of Rock Massif Stress State at Normal Fault at Underground Longwall Coal Mining // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 844-851.
6. Захаров В.Н., Линник В.Ю., Линник Ю.Н., Жабин А.Б. Классификация угольных пластов по особенностям геологического строения и разрушаемости // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 5. С. 5-21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-5-12.
7. Бабокин Г.И. Исследование влияния технологической схемы работы и длины лавы на удельный расход электрической энергии очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2. С. 139-149. DOI: 10.25018/02361493-2021-2-0-139-149.
8. Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Kolikov K.S. Aerological Risk Management in Designing, Operation, Closure and Temporary Shutdown of Coal Mines // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020. No. 6. P. 85-94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94.
9. Скопинцева О.В., Баловцев С.В. Контроль качества атмосферного воздуха на угольных шахтах на основе статистики газового мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 78-89. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89.
10. Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo. Constructing an Energy Efficiency Benchmarking System for Coal Production // Applied Energy. 2016. No. 169. P. 301-308.
11. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Анализ технологических показателей работы выемочного участка шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 3. С. 14-21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-14-21.
12. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты // Уголь. 2018. № 10. С. 66-70. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-66-70.
13. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of Technological Performance of the Extraction Area of the Coal Mine // III-rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018. Kemerovo, 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101014.
14. Захарова А.Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса. Кемерово: Изд-во Кемеровского гос. техн. ун-та, 2002. 198 с.
15. Захарова А.Г., Разгильдеев Г.И. Структура энергопотребления и ресурсы энергосбережения на шахтах Кузбасса // Уголь. 2000. № 7 (892). С. 48-50.
16. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebiikhov Y.V. Development of Universal Mathematical Model of Electrical Power Supply System of Area of Industrial Enterprise // Proceedings—2019 International Russian Automation Conference. RusAutoCon 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
17. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. Mathematical Modeling of Technical Systems in the Matlab // Modern High Technologies. 2017. No. 8. P. 56-64.
18. Semenov A.S., Egorov A.N., Fedorov O.V. The Analysis of the Practice of Using

of High-Voltage Frequency Converters ACS5000 // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, art. No. 8602676. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602676.

19. Shevyreva N., Kozhakov O. Ensuring the Power Quality in the Operation of Variable Frequency Drives of Drilling Rigs // 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020. Proceedings, 2020, 9249360. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249360.

20. Shevyrev Yu.V., Morgachev D.A. Analysis of Electromagnetic Compatibility between Diesel Engine Power Plant and Main Electric Motor of Drilling Unit // Gornyi Zhurnal. 2015. No. 1. P. 62-66. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.11.

21. Nepsha F., Belyaevsky R. Development of Interrelated Voltage Regulation System for Coal Mines Energy Efficiency Improving // III International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences. 2018. 41, 03013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103013>.

References

1. Ruban A.D., Artem'ev V.B., Zaburdyaev V.S., Zaburdyaev G.S., Rudenko Yu.F. *Problemy obespecheniya vysokoi proizvoditel'nosti ochistnykh zaboev v metanoobil'nykh shakhtakh* [Problems Performance Mines in Metanopoli Mines]. Moscow, Izd-vo OOO «Moskovskii izdatel'skii dom», 2009. 396 p. [in Russian].

2. Meshkov A.A., Kazanin O.I., Sidorenko A.A. Realizatsiya proizvodstvennogo potentsiala vysokoproizvoditel'nogo oborudovaniya — klyuchevoe napravlenie sovershenstvovaniya podzemnoi dobychi energeticheskikh uglei [Realization of the Production Potential of high-performance Equipment is a Key Area of Improvement of Underground Mining, Energy Coal]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Information-Analytical Bulletin*, 2020, No. 12, pp. 156-165. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-156-165. [in Russian].

3. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Meshkov A.A., Sidorenko S.A. Reproduction of the Longwall Panels: Modern Requirements for the Technology and Organization of the Development Operations at Coal Mines. *Eurasian*

Mining, 2020 (2), pp. 19-23. DOI: 10.17580/em.2020.02.05.

4. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Sirenko Y.G. Analysis of the Methods of Calculating the Main Roofcaving Increment in Mining Shallow Coal Seams with Long Breaking Faces. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, Vol. 14, No. 3, pp. 732-736.

5. Sidorenko A.A., Ivanov V.V., Sidorenko S.A. Numerical Simulation of Rock Massif Stress State at Normal Fault at Underground Longwall Coal Mining. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2019, Vol. 10, No. 1, pp. 844-851.

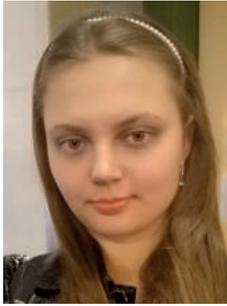
6. Zakharov V.N., Linnik V.Yu., Linnik Yu.N., Zhabin A.B. Klassifikatsiya ugol'nykh plastov po osobennostyam geologicheskogo stroeniya i razrushaemosti [Classification of Coal Seams by Features of Geological Structure and Destructibility]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2019, No. 5, pp. 5-21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-5-12. [in Russian].

7. Babokin G.I. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskoi skhemy raboty i dliny lavy na udel'nyi raskhod elektricheskoi energii ochistnogo kombaina [Investigation of the Influence of the Technological Scheme of Operation and the Length of the Lava on the Specific Consumption of Electric Energy of The Cleaning Combine]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2021, No. 2, pp. 139-149. DOI: 10.25018/02361493-2021-2-0-139-149. [in Russian].

8. Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Koliakov K.S. Aerological Risk Management in Designing, Operation, Closure and Temporary Shutdown of Coal Mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2020, No. 6, pp. 85-94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94.

9. Skopintseva O.V., Balovtsev S.V. Kontrol' kachestva atmosfernogo vozdukh na ugol'nykh shakhtakh na osnove statistiki gazovogo monitoringa [Control of Atmospheric Air Quality at Coal Mines on the Basis of Gas Monitoring Statistics]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2021. № 1. С. 78-89. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89. [in Russian].

10. Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo. Constructing an Energy Efficiency Benchmarking System for Coal Production. *Applied Energy*, 2016, No. 169, pp. 301-308.
11. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Analiz tekhnologicheskikh pokazatelei raboty vyemochnogo uchastka shakhty «Polysaevskaya» AO «SUEK-Kuzbass» [Analysis of Technological Indicators of the Work of the Excavation Site of the Polysaevskaya Mine of JSC SUEK-Kuzbass]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Information and Analytical Bulletin*, 2019, No. 3, pp. 14-21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-14-21. [in Russian].
12. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Aktual'nost' povysheniya urovnya energoeffektivnosti i bezopasnosti vyemochnogo uchastka ugol'noi shakhty [Relevance of Improving the Level of Energy Efficiency and Safety of the Coal Mine Excavation Site]. *Ugol' — Coal*, 2018, No. 10, pp. 66-70. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-66-70. [in Russian].
13. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of Technological Performance of the Extraction Area of the Coal Mine. *III International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018*, Kemerovo, 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101014.
14. Zakharova A.G. *Zakonomernosti elektropotrebleniya na ugol'nykh shakhtakh Kuzbassa* [Relevance of Improving the Level of Energy Efficiency and Safety of the Coal Mine Excavation Site]. Kemerovo, Izd-vo Kemerovskogo gos. tekhn. un-ta, 2002. 198 p. [in Russian].
15. Zakharova A.G., Razgil'deev G.I. Struktura energopotrebleniya i resursy energosberezheniya na shakhtakh Kuzbassa [The Structure of Energy Consumption and Energy Saving Resources in the Mines of Kuzbass]. *Ugol' — Coal*, 2000, No. 7 (892), pp. 48-50. [in Russian].
16. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebi-khov Y.V. Development of Universal Mathematical Model of Electrical Power Supply System of Area of Industrial Enterprise. *Proceedings—2019 International Russian Automation Conference. RusAutoCon 2019*. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
17. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. Mathematical Modeling of Technical Systems in the Matlab. *Modern High Technologies*, 2017, No. 8, pp. 56-64.
18. Semenov A.S., Egorov A.N., Fedorov O.V. The Analysis of the Practice of Using of High-Voltage Frequency Converters ACS5000. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018*, art. No. 8602676. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602676.
19. Shevyreva N., Kozhakov O. Ensuring the Power Quality in the Operation of Variable Frequency Drives of Drilling Rigs. *11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020. Proceedings, 2020, 9249360*. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249360.
20. Shevyrev Yu.V., Morgachev D.A. Analysis of Electromagnetic Compatibility between Diesel Engine Power Plant and Main Electric Motor of Drilling Unit [Analysis of Electromagnetic Compatibility between Diesel Engine Power Plant and Main Electric Motor of Drilling Unit]. *Gornyi Zhurnal — Gornyi Journal*, 2015, No. 1, pp. 62-66. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.11. [in Russian].
21. Nepsha F., Belyaevsky R. Development of Interrelated Voltage Regulation System for Coal Mines Energy Efficiency Improving. *III International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences*. 2018. 41, 03013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184103013>.



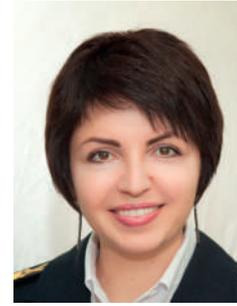
Абрамкина К. В.
Abramkina K. V.

*инженер, ассистент,
ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский
государственный морской
технический университет»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация*



Марковкина Н. Н.
Markovkina N. N.

*кандидат технических наук,
инженер,
ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский
государственный морской
технический университет»,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация*



Сметюх Н. П.
Smetukh N. P.

*кандидат технических наук,
доцент,
ФГБОУ ВО «Керченский
государственный
морской технологический
университет»,
г. Керчь,
Российская Федерация*

УДК 681.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-131-140

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕД РАЗРАБОТКИ MATLAB И COMSOL ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ЛЕВИТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЬЕЗОИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Актуальность

В данной работе рассмотрены проблемы моделирования акустического поля левитации, формирования данного поля. Показаны расчеты возмущений и моделирование «провально-го» элемента для фазированных решеток с датчиками ультразвука размером 16 x 16 в среде Matlab.

Цели исследования

Рассмотреть и смоделировать примеры измерения расстояния и распознавание объектов, измерения уровня или скорости, сварку или склеивание, тестирование с высоким разрешением. Электрокерамика, материалы, которые изменяют свою форму при приложении электрического поля и вырабатывают электричество при приложении силы, отлично подходят для этих целей. Обычно используется класс пьезокерамики. Экономия затрат — это один из ключевых факторов.

Методы исследования

В статье представлены фрагментарная разработка и оценка интегрированной среды моделирования тепла, воздуха и влажности для моделирования и моделирования динамических процессов акустической среды. Все модели реализованы в вычислительном программном комплексе MatLab с использованием SimuLink и Comsol. В эту работу включено более 3 различных моделей, связанных с акустическими свойствами для реализации управления акустическим полем левитации с помощью ультразвуковых пьезоизлучателей. Большинство моделей успешно проверены (с помощью аналитических решений или путем сравнения с другими результатами моделирования). Использование среды моделирования для решения проблем проектирования демонстрируется на тематическом анализе литературных источников. В целом можно сделать вывод, что среда моделирования способна решать широкий спектр комплексных задач, связанных с теплом, воздухом и влажностью. Кроме того, это многообещающе для решения текущих проблем моделирования, вызванных либо разницей в постоянных времени между компонентами вентиляции отопления и кондиционирования воздуха и реакцией здания, либо проблемами, вызванными отсутствием инструментов моделирования зданий, которые включают возможности моделирования деталей в 2D и 3D.

Результаты

В пакете Comsol выполнены расчеты полного акустического давления и также рассмотрен график зависимости давления от расстояния для модели датчика ультразвука. Кроме того, проведен анализ обоих программных пакетов и показаны результаты по их применению для задачи моделирования акустического поля левитации для фазированной решетки с пьезоизлучателями. Создание компоновочной системы управления можно реализовать непосредственно в среде Matlab, однако она ограничена в базовых системах расчета. Интеграция двух пакетов позволит создать основу для реализации системы управления акустическим полем левитации.

Ключевые слова: Matlab, управление, моделирование, акустика, левитация.

ACOUSTIC LEVITATION FIELD CONTROL USING ULTRASONIC PIEZO TRANSMITTERS

Relevance

In this work, the problems of modeling the acoustic field of levitation, the formation of this field were considered. The calculations of disturbances and modeling of the «failure» element for phased arrays with ultrasound sensors 16 x 16 in the Matlab environment are shown.

Aims of research

Consider and simulate examples of distance measurement and object recognition, level or velocity measurements, welding or gluing, high resolution testing. Electroceramics, materials that change their shape when an electric field is applied and generate electricity when a force is applied, are great for this purpose. The piezoceramic class is commonly used. Cost savings are one of the key factors.

Research methods

The article presents a fragmentary development and assessment of an integrated environment for modeling heat, air and humidity for modeling and modeling dynamic processes of an acoustic environment. All models are implemented in the MatLab computer software package using SimuLink and Comsol. This work includes more than 3 different models related to acoustic properties for the implementation of control of the acoustic levitation field using ultrasonic piezo emitters. Most of the models have been successfully validated (using analytical solutions or by comparison with other simulation results). The use of a modeling environment to solve design problems is demonstrated in a thematic analysis of literature sources. In general, we can conclude that the modeling environment is capable of solving a wide range of complex problems related to heat, air and humidity. In addition, it is promising for solving current modeling problems caused either by the difference in time constants between HVAC components and building response, or by problems caused by the lack of building modeling tools that include 2D and 3D part modeling capabilities.

Results

In the Comsol package, calculations of the total acoustic pressure are performed and a graph of the dependence of pressure on distance for a model of an ultrasound sensor is also considered. In addition, the analysis of both software packages was carried out and the results of their application for the problem of modeling the acoustic field of levitation for a phased array with piezo emitters were shown. The creation of a layout control system can be implemented directly in the Matlab environment, but it is limited in the basic calculation systems. The integration of the two packages will create the basis for the implementation of a levitation acoustic field control system.

Key words: Matlab, control, modeling, acoustics, levitation.

Введение

Для реализации цели исследования рассмотрены программные среды для разработки Matlab и COMSOL и их проекты. Целью исследования является сравнение параметров и технических характеристик для моделирования поля акустической левитации для решеток с пьезоизлучателями. В среде разработки

Matlab рассматриваются процессы формирования ультразвукового поля, получен расчет возмущений и сбоев элементов решетки из датчиков ультразвука, а также проанализирована структура и расчет полного акустического давления в среде Comsol.

Рассмотрим акустическое поле левитации в стоячей волне. Данное поле может исполь-

зоваться для левитации объектов с диаметром менее половины λ . Эффект достигается с помощью излучателя звука и отражателя (обычно вогнутой формы для лучшей фокусировки) или двух и более излучателей звука. В пространстве между отражателем и излучателем возникает интерференция излучаемых и отраженных волн одинаковой частоты и фазы, или интерференция излучаемых волн от 2-х и более излучателей звука. Ослабевающие излученные волны усиливаются встречными волнами от отражателя или второго излучателя звука. Таким образом, получается поле левитации стоячей волны.

Если использовать 4 излучателя звука, можно получить 2 пересекающихся поля левитации стоячей волны для контроля пространства по 3 осям.

Поперечная сила излучения (радиальная сила) — это сила давления, действующая в поперечном направлении относительно первичной силы. Эта сила возникает из-за того, что объект в поле является препятствием, поэтому среда обтекает частицу, этот эффект ограничен областью около частицы.

Для определения давления акустического излучения на сферу используется теория Кинга [1]:

$$\delta p = p - p_0 = p_0 \dot{\phi} + \frac{1}{2} \frac{p_0}{c^2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} p_0 q^2, \quad (1)$$

где $\dot{\phi}$ — потенциал скорости,

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{D\phi}{Dt} - \xi \frac{d\phi}{dx} - \eta \frac{d\phi}{dy} - \zeta \frac{d\phi}{dz} = \\ &= \frac{D\phi}{Dt} + u\xi + v\eta + w\zeta, \end{aligned} \quad (2)$$

q^2/c^2 — конечный результат: c^2 — постоянная, а $\frac{dp}{dp}$, dp — плотность среды;

ξ, η, ζ — дают вклады второго порядка в вариации давления над границей и имеют тот же порядок величины.

Так, скорость потока вокруг частицы уменьшается с увеличением дистанции [2]. Учитывая

$$\dot{\phi} - \int \frac{dp}{p} = \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

это создает дополнительное давление, которое растет с увеличением дистанции, что ведет к стабилизации частицы.

Изменение давления зависит от расстояния между излучателем и левитируемым объектом [3].

Акустическая сила для небольшого твердого тела (4):

$$8\pi r_s (kr_s) \bar{E} \sin(2kh) f \left(\frac{p_0}{p_s} \right), \quad (4)$$

где k — количество волн;

r_s — радиус сферы;

E — полная энергия звука в среде;

F — коэффициент относительной плотности;

p_s — плотность сферы.

Принимая во внимание эту силу, нет необходимости, чтобы отражатель и излучатель были перпендикулярны вертикальной оси. Пока угол относительно оси не превышает определенных величин, объект все равно будет левитировать, если сила тяжести не преодолет сумму главной и поперечной сил [4, 5].

Программная среда Matlab для управления полем акустической левитации

Необходимо исследовать возможности пакета инструментов для систем с фазированными решетками в Matlab для решения поставленных целей и задач исследования.

Прежде всего необходимо рассмотреть процесс создания планарных решеток для устройства акустической левитации [6, 7]. В данном листинге 1 рассмотрим формирование планарной решетки. Для начала нужно определить количество элементов решетки в каждом ряду и каждом столбце. Для заданного устройства левитации достаточно сформировать решетку 16×16 , в которой расположены датчики ультразвука. Кроме того, нужно задать расстояние между элементами (излучателями) также в каждом ряду и столбце. В итоге получим 256 элементов, как показано на рисунке 1.

На рисунке 2 представлен график амплитудных возмущений для решетки излучателей размером 16×16 . Он отражает зависимость нормализованного распределения мощности к значению напряжений. В данном случае возмущения принимаются за статистически независимые гауссовские случайные значения. Здесь отмечено соотношение идеальной амплитуды и с возмущениями.

Кроме того, на рисунке 2 представлено амплитудное сужение как показатель прироста (усиления) возмущений (искажений).

По данным графикам можно провести сравнение резонанса для всех 256 датчиков

Листинг 1.

```
M = 16; % Number of elements on each row
N = 16; % Number of elements on each column
dy = 0.5; % Spacing between elements on each row (m)
dz = 0.5; % Spacing between elements on each column (m)
ura = phased.URA([aN M],[dz dy]);
viewArray(ura,'Title','Uniform Rectangular Array (URA)');
```

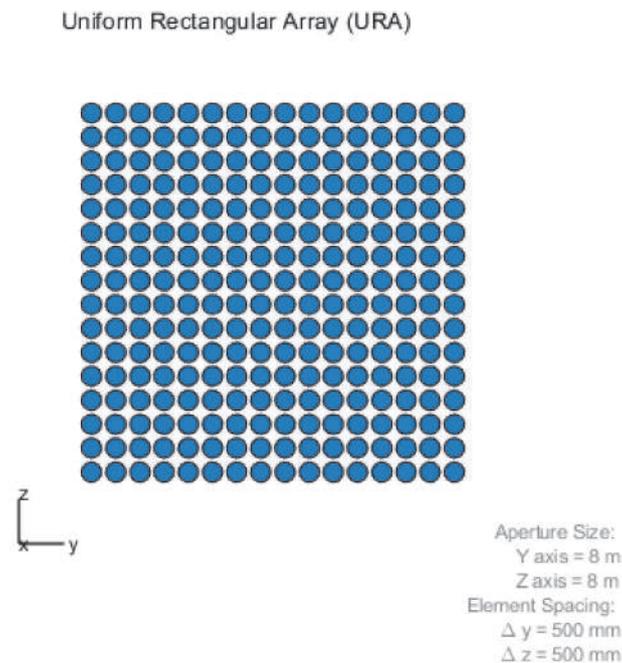


Рисунок 1. Планарная решетка с излучателями

Figure 1. Planar array with emitters

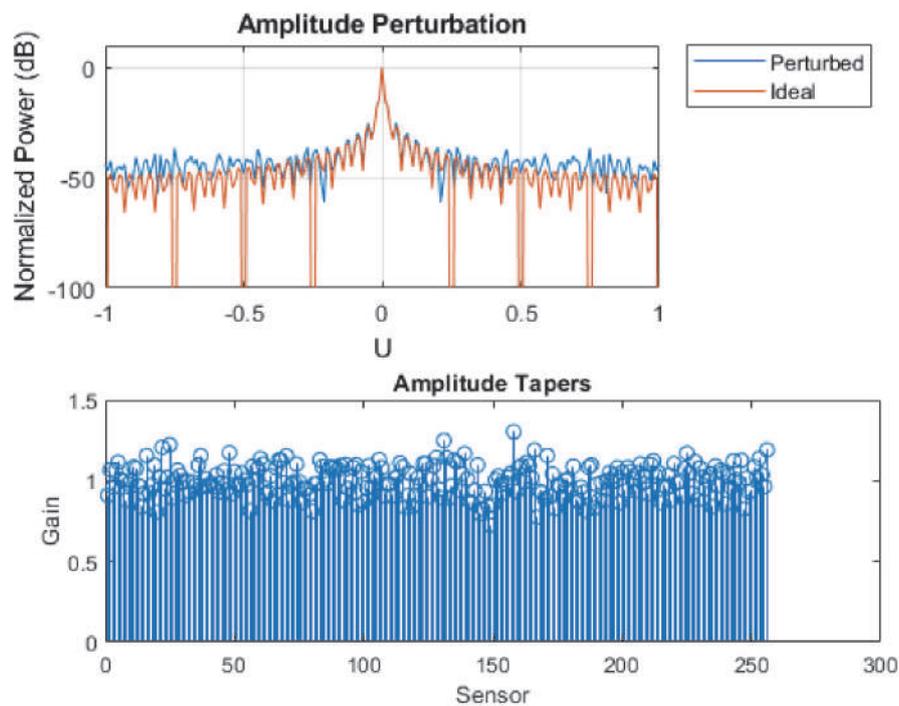


Рисунок 2. Амплитудные возмущения и спадающее распределение поля

Figure 2. Amplitude disturbances and decaying field distribution

ультразвука (амплитудное сужение) для датчиков в ряду с возмущениями к датчикам в «идеальном» ряду ответ на возмущения. Можно сравнить амплитуду резонанса с возмущениями к идеальной амплитуде (наблюдается превышение по гауссовским значениям «провальных» элементов) [8].

На рисунке 3 показано добавление фазовых возмущений по алгоритму первой части, только при сужении мы имеем масштаб один и фазовый сдвиг 0 (в прошлом примеры были распространены случайные числа, равные единице, как и в данном примере).

Также можно проанализировать соотношение между идеальной фазовой амплитудой и с возмущениями, а также проследить за резонансом, при котором можно увидеть отклонения по значениям сенсоров (например в диапазоне от 100 до 150).

Также можно отобразить, как нужно изменить положение каждого датчика с возмущениями по трем осям (направлениям) (рисунок 4). Соответственно, существует возможность перестроить ряд. Здесь отражена зависимость мощности от напряжения (при позиционных возмущениях).

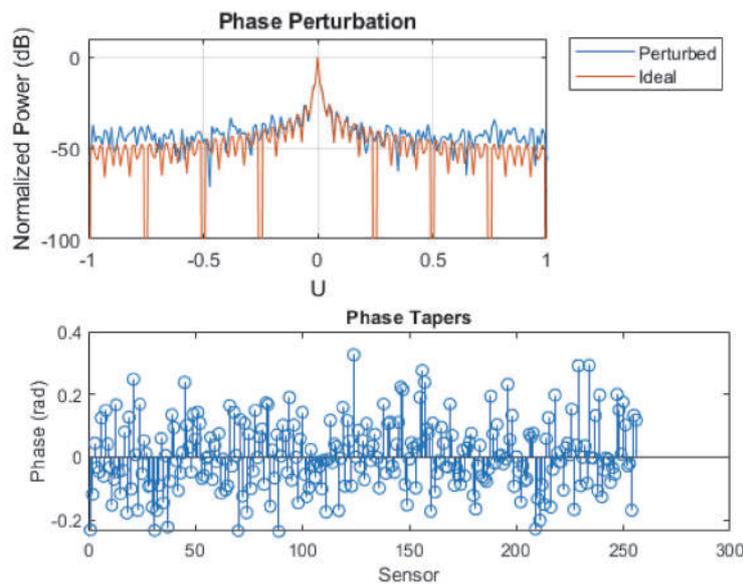


Рисунок 3. Фазовые возмущения и сужения амплитуды
Figure 3. Phase disturbances and amplitude contractions

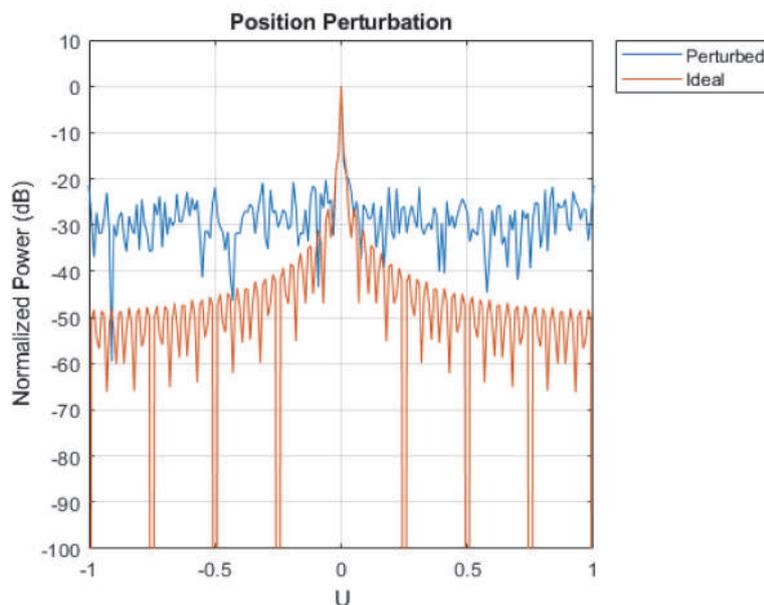


Рисунок 4. Позиционные возмущения
Figure 4. Positional disturbances

Далее рассмотрена модель возмущений (рисунок 5) и изображены модели с изотропной характеристикой и с возмущениями. Можно сравнить резонанс для двух случаев с возмущениями и без возмущений (в изотропной среде). Можно сделать вывод, что в изотропной модели характеристика по мощности обладает лучшими показателями по сравнению со второй моделью [9].

Сбой в работе некоторых элементов решетки 16×16 пьезоизлучателей показан

на рисунке 6. Каждый из 256 излучателей имеет 10 %-ый шанс на сбой в работе. На графиках рисунка 6 отображены зависимость нормализованной мощности от напряжения, а также графики со сбоем и без в работе излучателей. Нужно обратить внимание на то, как трудно получить глубокий ноль для ряда элементов со сбоем при отклике, что отображено на графике для решетки 16×16 .

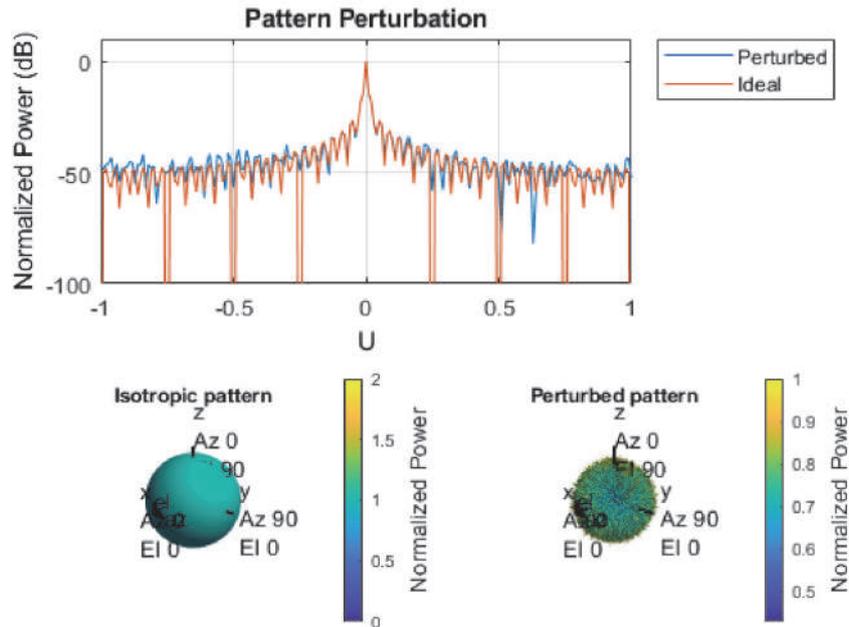


Рисунок 5. Модель возмущений

Figure 5. Perturbation model

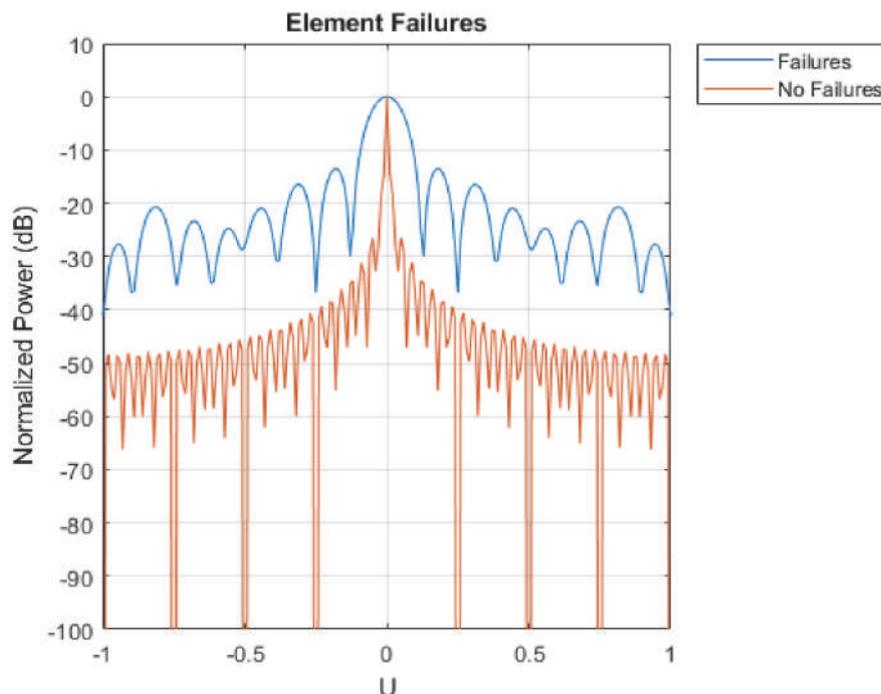


Рисунок 6. Сбой элементов

Figure 6. Failure of elements

В итоге на рисунке 7 изображена требуемая решетка с ультразвуковыми излучателями 16 x 16 с «провальными» элементами.

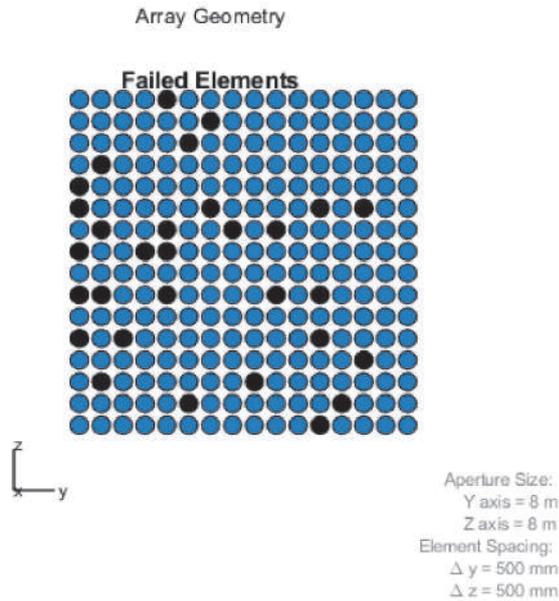


Рисунок 7. Изображение ряда с «провальными» элементами

Figure 7. Image of a row with «failed» elements

Подводя итоги и суммируя результаты, следует вывод, что получены отклики для всех элементов массива, проведено моделирование для всех случаев возмущений, а также рассмотрено влияние отклика (резонанса) для всех случаев. На рисунке 7 получено отображение элементов со сбоями в работе при генерации ультразвуковых колебаний с заданной частотой для 256 элементов решетки.

Моделирование поля акустической левитации в Comsol Multiphysics

Далее необходимо провести анализ моделирования датчика ультразвуковой левитации. В качестве шаблона выбрана модель из Comsol multiphysics. Проанализируем графики данной модели. В данном программном решении можно рассматривать также материал и геометрию предполагаемого изделия и выполнять необходимые физико-математические расчеты.

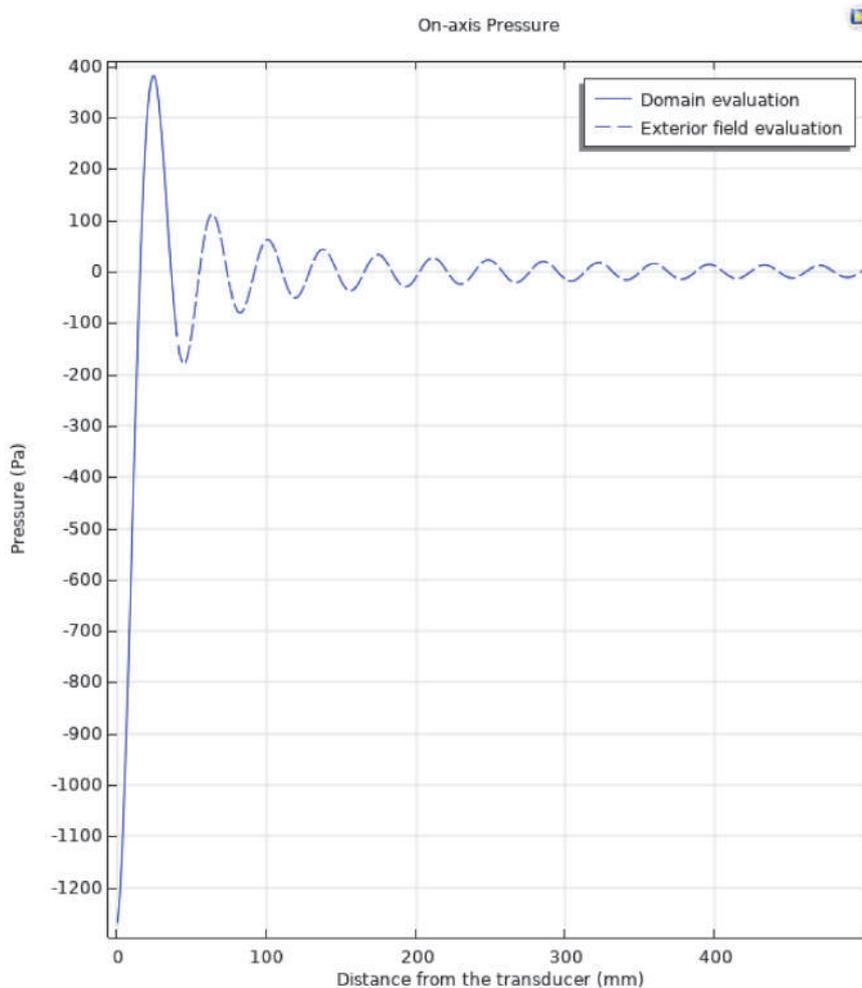


Рисунок 8. График зависимости давления от дистанции

Figure 8. Graph of pressure versus distance

На рисунке 8 приведена зависимость расстояния от давления акустического поля. В результате наблюдений, можно сделать вывод, что при увеличении расстояния давления падает, как и должно быть при испытании в реальной среде [10].

На рисунке 9 представлена частотная область, которую можно рассчитать при помощи формул (5), (6) и, соответственно,

рассмотреть акустическое давление как функцию частоты, а также видим в сумме расчет полного акустического давления с ранжированием по зонам датчика ультразвука [9–11].

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{dp_t}{dt} + \nabla * u_t = Q_m, \quad (5)$$

$$p \frac{du_t}{dt} + \nabla * (p_t l) = q_d. \quad (6)$$

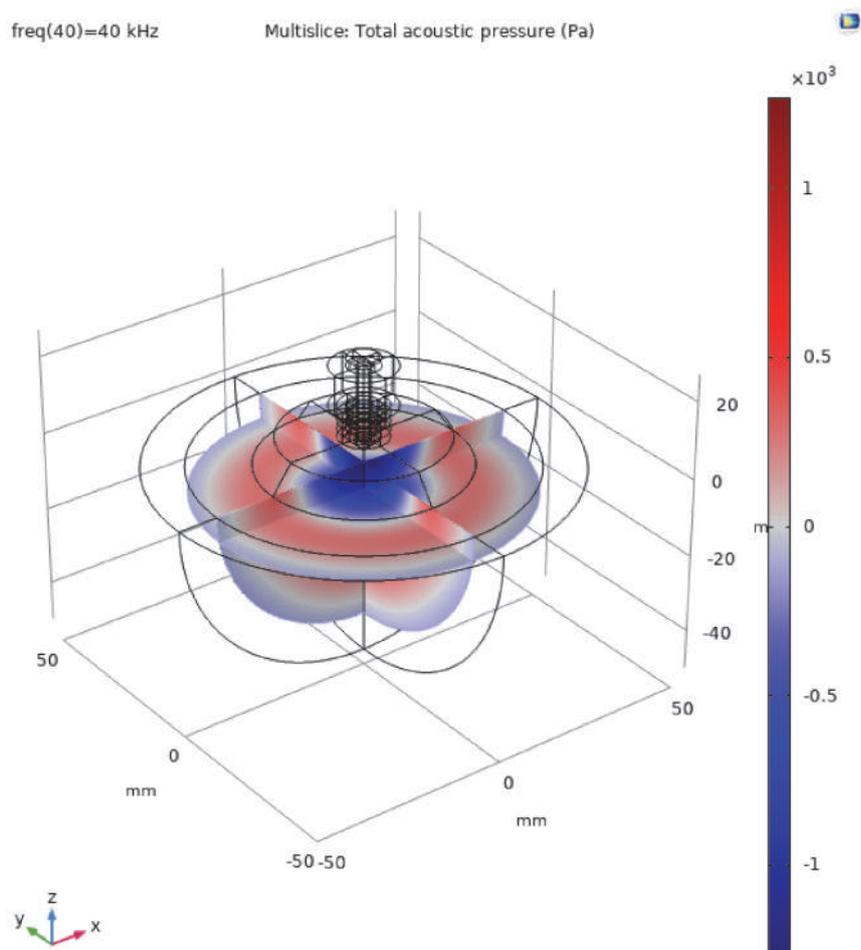


Рисунок 9. Полное акустическое давление

Figure 9. Total acoustic pressure

Вывод

Исследованы возможности рассмотренных программных пакетов для расчета и моделирования систем акустической левитации, а также для расчета и управления акустическим полем левитации.

Среда Matlab также позволяет добавить систему управления, что позволит непосредственно контролировать работу устройства акустической левитации.

С другой стороны, в среде Comsol в полной мере могут быть реализованы расчеты

акустических систем разных размеров по параметрам, применена теория управления акустическим полем и интегрирована в среду Matlab.

Создание системы управления можно реализовать непосредственно в среде Matlab, однако она ограничена в базовых системах расчета.

Интеграция двух пакетов позволит создать основу для реализации системы управления акустическим полем левитации.

Список литературы

1. King L.V. On the Acoustic Radiation Pressure on Spheres // *Proc. R. Soc. Lond. A*147, 2014. P. 212-240.
2. Vandaele V., Lambert P., Delchambre A. Non-Contact Handling in Microassembly: Acoustical Levitation // *Precision Engineering*. 2005. No. 29. P. 491-505.
3. Zhao S. Investigation of Non-Contact Bearing Systems Based on Ultrasonic Levitation: Ph. D. Thesis. University of Paderborn, Germany. 2010. 107 p.
4. Жиленков А.А., Черный С.Г. Применение технологий искусственного интеллекта в автоматизации контроля и управления в системах активных фазированных решеток для геоинформационного комплекса // *Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России*. 2020. № 2 (146). С. 57-63.
5. Castro A. Manipulation of Biomimetic Objects in Acoustic Levitation. University Pierre et Marie Curie, France. 2013. 187 p.
6. Binh Dang, Zhilenkov A. Finite Precision Modeling of Radar Digital Chaotic Systems with Dynamical Properties Analysis // *AIP Conference Proceedings*, 2018, 2034, 020007. <https://doi.org/10.1063/1.5067350>.
7. Zhilenkov A.A. High Productivity Numerical Computations for Gas Dynamics Modelling Based on DFT and Approximation // *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow, 2018. P. 400-403. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317117.
8. Lisitsa D., Zhilenkov A.A. Comparative Analysis of the Classical and Nonclassical Artificial Neural Networks // *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Saint-Petersburg, 2017. P. 922-925. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910707.
9. Chernyi S.G., Vyngra A.V., Erofeev P., Novak B.P. Analysis of the Starting Characteristics of the complex Maritime Systems // *Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019*. 2020. P. 2164-2171.
10. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Automatic Estimation of Defects in Composite Structures

as Disturbances Based on Machine Learning Classifiers Oriented Mathematical Models with Uncertainties // *Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2020. № 3. P. 13-29.

11. Ивановский А.Н., Марковкина Н.Н., Черный С.Г. Выделение марки углубления на изображении с использованием алгоритмов компьютерного зрения // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 1-2 (51). С. 102-107.

References

1. King L.V. On the Acoustic Radiation Pressure on Spheres. *Proc. R. Soc. Lond. A*147, 2014, pp. 212-240.
2. Vandaele V., Lambert P., Delchambre A. Non-Contact Handling in Microassembly: Acoustical Levitation. *Precision Engineering*, 2005, No. 29, pp. 491-505.
3. Zhao S. *Investigation of Non-Contact Bearing Systems Based on Ultrasonic Levitation: Ph. D. Thesis*. University of Paderborn, Germany. 2010. 107 p.
4. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Prime-nenie tekhnologii iskusstvennogo intellekta v avtomatizatsii kontrolya i upravleniya v sistemakh aktivnykh fazirovannykh reshetok dlya geoinformatsionnogo kompleksa [The Use of Artificial Intelligence Technologies in the Automation of Control and Management in Active Phased Array Systems for a Geo-information Complex]. *Oboronnyi kompleks — nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii — Defense Complex — to the Scientific and Technical Progress of Russia*, 2020, No. 2 (146), pp. 57-63. [in Russian].
5. Castro A. Manipulation of Biomimetic Objects in Acoustic Levitation. University Pierre et Marie Curie, France. 2013. 187 p.
6. Binh Dang, Zhilenkov A. Finite Precision Modeling of Radar Digital Chaotic Systems with Dynamical Properties Analysis. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 2034, 020007. <https://doi.org/10.1063/1.5067350>.
7. Zhilenkov A.A. High Productivity Numerical Computations for Gas Dynamics Modelling Based on DFT and Approximation. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow, 2018, pp. 400-403. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317117.

8. Lisitsa D., Zhilenkov A.A. Comparative Analysis of the Classical and Nonclassical Artificial Neural Networks. *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Saint-Petersburg, 2017. P. 922-925. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910707.
9. Chernyi S.G., Vyngra A.V., Erofeev P., Novak B.P. Analysis of the Starting Characteristics of the complex Maritime Systems. *Procedia Computer Science. International Conference on Computational Intelligence and Data Science, ICCIDS 2019*. 2020. P. 2164-2171.
10. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Automatic Estimation of Defects in Composite Structures as Disturbances Based on Machine Learning Classifiers Oriented Mathematical Models with Uncertainties. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2020, No. 3, pp. 13-29.
11. Ivanovskii A.N., Markovkina N.N., Chernyi S.G. Vydelenie marki uglubleniya na izobrazhenii s ispol'zovaniem algoritmov komp'yuternogo zreniya [Identification of the Mark of a Depression in the Image Using Computer Vision Algorithms]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii — Marine Intellectual Technologies*, 2021, No. 1-2 (51), pp. 102-107. [in Russian].

ОБ АВТОРАХ

Абрамкина Кристина Вадимовна

инженер, ассистент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Авдеев Борис Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Андреева Елена Григорьевна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрическая техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск, Российская Федерация

Бордюг Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Вынгра Алексей Викторович

ассистент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Габитов Руслан Фаритович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Гупаленко Дарья Дмитриевна

аспирант, специалист 1-ой категории, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Ениватов Валерий Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовых энергетических установок, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Железняк Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Жиленков Антон Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой киберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Захаров Денис Юрьевич

кандидат технических наук, главный специалист, ООО «Газпром ПХГ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Зинченко Антон Александрович

аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Имаев Радмир Фларитович

студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Кириллов Роман Вячеславович

доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Комиссаров Денис Русланович

аспирант 2-го курса по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника», инженер кафедры «Электрооборудование судов и автоматизации производства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Кубрин Сергей Сергеевич

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений», ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Кулакова Екатерина Сергеевна

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Марковкина Наталья Николаевна

кандидат технических наук, инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Моисеев Илья Сергеевич

бакалавр кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Муравьева Елена Александровна

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Низамов Максим Олегович

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Нуйкин Дмитрий Анатольевич

магистрант кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Решетняк Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; старший научный сотрудник лаборатории «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений», ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Сафиуллин Рузил Ахнафович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Технические дисциплины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», филиал, г. Нефтекамск, Российская Федерация

Семина Ирина Александровна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрическая техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск, Российская Федерация

Сметюх Надежда Павловна

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Соловьев Богдан Алексеевич

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Сорокин Александр Владимирович

ассистент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технологический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Токарева Светлана Андреевна

ведущий экономист, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Хазиева Регина Тагировна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Шабанов Виталий Алексеевич

кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технологический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Юдинцев Антон Геннадьевич

кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Abramkina Kristina V.

Engineer, Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Marine Technical University», Saint-Petersburg, Russian Federation

Andreeva Elena G.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Electrical Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Omsk State Technical University», Omsk, Russian Federation

Avdeev Boris A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

Bordyug Aleksandr S.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Enivatov Valery V.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Ship Power Plants Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

Gabitov Ruslan F.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Gupalenko Daria D.

Post-Graduate Student, 1st Category Specialist, Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

Imaev Radmir F.

Student of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Khazieva Regina T.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Kirillov Roman V.

Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Komissarov Denis R.

2nd Year Postgraduate Student in the Direction of Training «Electrical and Heat Engineering», Engineer of Electrical Equipment for Ships and Production Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Kulakova Ekaterina S.

Cand. Sci. Tech., Assistant of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Kubrin Sergey S.

D-r Sci. Tech., Professor, Head of Laboratory 2.3 «Geotechnological Risks of Subsoil Development», Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Markovkina Natalya N.

Cand. Sci. Tech., Engineer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Marine Technical University», Saint-Petersburg, Russian Federation

Moiseev Ilya S.

Bachelor Student of Automatic Control Systems and Onboard Computer Facilities Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Marine Technical University», Saint-Petersburg, Russian Federation

Muraveva Elena A.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Nizamov Maksim O.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Nuykin Dmitriy A.

Under-Graduate Student of Automated Technology and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Reshetnyak Sergey N.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Energy and Energy Efficiency of the Mining Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Science and Technology»; Senior Researcher of Laboratory 2.3 «Geotechnological Risks of Subsoil Development», Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Safiullin Ruzil A.

Cand. Sci. Phys. and Maths, Assistant Professor of Technical Disciplines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

Semina Irina A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Omsk State Technical University», Omsk, Russian Federation

Shabanov Vitaly A.

Cand. Sci. Tech., Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Smetyukh Nadezhda P.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Soloviev Bogdan A.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Sorokin Aleksandr V.

Assistant of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Tokareva Svetlana A.

Leading Economist, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Economic University», Saint-Petersburg, Russian Federation

Vyngra Aleksei V.

Assistant of Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Yudintsev Anton G.

Cand. Sci. Tech., Director, Research Institute of Automation and Electromechanics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics», Tomsk, Russian Federation

Zakharov Denis Yu.

Cand. Sci. Tech., Chief Specialist, Gazprom PHG LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

Zhelezniak Aleksandr A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Zhilentsov Anton A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Cybernetic Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Marine Technical University», Saint-Petersburg, Russian Federation

Zinchenko Anton A.

Postgraduate Student of Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

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 5 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 interesting 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.