



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический
и производственный журнал**

(26) 5 / 2024

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года
Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	АХМЕТОВА И.Г.
Заместитель главного редактора	STANIMIR VALTCHEV

Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
--------------------------------	--------------

Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	МАЙОРОВА Е.С.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

- ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ) (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

РИНЦ:

- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) - ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.
---	--

Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
------------------	---

Сайт:	https://www.energyret.ru/
--------------	---

Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
------------------	--

Адрес издателя:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
------------------------	---

Адрес редакции:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
------------------------	---

Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
-------------------	--------------------

Email:	problems_ener@mail.ru
---------------	-----------------------

Типография:	ООО "ФОЛИАНТ"
--------------------	---------------

Адрес типографии:	420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в
--------------------------	--

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**2024
Т.26, № 5
Сентябрь - Октябрь
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)**

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ахметова И.Г., Stanimir Valtchev, Iliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Андреев В.П., Аракелян Э.К., Борисов В.В., Боруш О.В., Бочкарев И.В., Брякин И.В., Ваньков Ю.В., Вафин Д.Б., Голенищев-Кутузов А.В., Грачева Е.И., Дмитриев А.В., Довгун В.П., Зверева Э.Р., Ившин И.В., Калайда М.Л., Касимов В.А., Козелков О.В., Корнилов В.Ю., Лаптев А.Г., Мещеряков В.Н., Мингалеева Г.Р., Николаева Л.А., Сафин А.Р., Суслов К.В., Федотов А.И., Щинников П.А., Якимов Н.Д.

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-83199 от 31.03.2022 г.

Founder: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials.

Sections:

EDITORIAL BOARD:

Iliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Andreev Victor, Arakelyan Edik, Borisov Andrey, Borush Olesya, Bochkarev Igor, Briakin Ivan, Vankov Yury, Vafin Danil, Golenishchev-Kutuzov Alexander, Gracheva Elena, Dmitriev Andrey, Dovgun Valery, Zvereva Elvira, Igor Ivshin, Kalaida Marina, Vasil Kasimov, Kozelkov Oleg, Kornilov Vladimir, Laptev Anatoly, Meshcheryakov Viktor, Mingaleeva Guzel, Nikolaeva Larisa, Safin Alfred, Suslov Konstantin, Fedotov Alexander, Shchinnikov Pavel, Yakimov Nikolay.

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,
Russian Federation

Tel./fax: +7 (843) 527-92-76

Printing House: LLC «FOLIANT»

Address of the printing house 420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V

Email: problems_ener@mail.ru

Site: <https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

РОМАНОВА В.В., БАТУХТИН А.Г., СУСЛОВ К.В., ХРОМОВ С.В., ГАЛЯТИН В.А. Комплексная оценка факторов, воздействующих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей угледобывающего комплекса	3
ГАТАУЛЛИН А.М., ГАВРИЛЕНКО А.Н., ПИСКОВАЦКИЙ Ю.В., МИНКИН А.С. Диагностика фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов	19

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

БОЯРКОВ Д.А., КОМПАНИЕЦ Б.С. Методика оценки технического состояния электрических сетей на основе определения вероятности выхода их из строя	31
ЛАНСБЕРГ А.А., ВИНОГРАДОВ А.В. Корректировка методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ	44

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

РОТОВ П.В., ГОРШКОВ А.В., РОТОВА М.А. О целесообразности изменения схемы подключения установок горячего водоснабжения	54
БРАГИН Д.М., МУСТАФИН Р.М., ПОПОВ А.И., ЗИНИНА С.А., ЕРЕМИН А.В. Исследование аэродинамических процессов в пористых материалах на основе трижды периодических минимальных поверхностей	66
ИВАНОВ И.А., КОТИН Д.А. Разработка алгоритма управления повышающим преобразователем с возможностью динамической коррекции параметров системы управления	79
ЗВЕРЕВ Л.О., ЗЛОБИН В.Г., ЗВЕРЕВА Э.Р. Модернизация тепловой схемы ПГУ-450 с увеличением тепловой мощности отопительных отборов и сохранения суммарной электрической мощности	92

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ШИЛИН А.Н., БОГАЛЕ М.А., КОНОВАЛОВА Л.А. Модель искусственной нейросети для прогнозирования объема воды в водохранилище	104
--	-----

CONTENTS

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

ROMANOVA V.V., BATUKHTIN A.G., SUSLOV K.V., KHROMOV S.V., GALYATIN V.A. Comprehensive assessment of factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors of a coal mining complex	3
GATAULLIN A.M., GAVRILENKO A.N., PISKOVATSKIY Y.V., MINKIN A.S. Diagnostics of porcelain insulators by partial discharges characteristics	19

ELECTRIC POWER INDUSTRY

BOYARKOV D.A., KOMPANEETS B.S. Methodology for assessing the technical condition of electrical networks based on determining the probability of their failure	31
LANSBERG A.A., VINOGRADOV A.V. Correction of methods for calculating the single-phase short circuit current in a rural 0.4 kV electric grid	44

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

ROTOV P.V., GORSHKOV A.V., ROTOVA M.A. About expediency of changing the connection diagram of hot water supply units	54
BRAGIN D.M., MUSTAFIN R.M., POPOV A.I., ZININA S.A., EREMIN A.V. Investigation of aerodynamic processes in porous materials based on triply periodic minimal surfaces	66
IVANOV I.A., KOTIN D.A. Development of a control algorithm for a boost converter with the possibility of dynamic correction of control system parameters	79
ZVEREV L.O., ZLOBIN V.G., ZVEREVA E.R. Modernization of the PGU-450 thermal circuit with an increase in the thermal power of heating selections and preservation of the total electric power	92

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

SHILIN A.N., BOGALE M.A., KONOVALOVA L.A. Artificial neural network model for predicting water inflow into a reservoir	104
--	-----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313:622.23.05

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

Романова В.В.^{1,2}, Батухтин А.Г.¹, Суслов К.В.^{1,3}, Хромов С.В.¹, Галятин В.А.¹

¹Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

²Филиал Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», г. Волжский, Россия

³Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия
romanova181@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в решении проблемы надёжного функционирования элементов систем энергетики и обеспечение их эффективной эксплуатации при ведении открытых горных работ. В работе представлен методический подход, который позволяет оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях угольного разреза со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи. ЦЕЛЬ работы состоит в количественной оценке эксплуатационных факторов, воздействующих на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Сосредоточено внимание, как разные по физической основе воздействующие факторы, среди которых выделены электрические параметры – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициенты гармонических составляющих напряжения и параметры окружающей среды – температура, влажность воздуха и запылённость, влияют на динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя. В качестве объекта исследования рассмотрены асинхронные электродвигатели, применяемые на одном из предприятий компании АО «СУЭК» Забайкальского края. МЕТОДЫ. Основным инструментом, для реализации задач исследования, использовано компьютерное моделирование на основе программного комплекса Matlab. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследования выполнены на асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором с $P_n = 3$ кВт, номинальной частотой вращения 1500 об/мин. Моделирование режима работы, исследуемого электродвигателя, выполнено путём изменения параметров эксперимента: величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) – от 4 до 12% с диапазоном в 2%; величины коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) – от 0 до 4% с диапазоном в 1%; величины температуры окружающей среды ($\Delta T_{окр}$) – от -30°C до $+30^\circ\text{C}$ с диапазоном в 10°C ; величины влажности воздуха (V_ϵ) – 20% и 60%; величины коэффициента теплопроводности пыли (K_m) – 0,12 и 0,28. Основываясь на полученные результаты исследования, построены диаграммы, наглядно иллюстрирующие динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя в зависимости от совокупности воздействующих факторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Тенденции решения вопросов надёжного функционирования угледобывающего предприятия с наличием асинхронных электродвигателей и обеспечение их эффективной эксплуатации являются наиболее приоритетными, главным образом, ориентированными на поддержание стабильности технологических процессов и сохранения объёмов добычи угледобывающего предприятия. Оценена устойчивость электродвигателя к определённым воздействующим факторам и установлены их критические значения. Сформулированы рекомендации по использованию асинхронных электродвигателей с учётом условий их эксплуатации.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель; компьютерное моделирование на основе системы Matlab/Simulink; внешние воздействующие факторы; эксплуатационная надёжность асинхронного электродвигателя.

Благодарности: авторский коллектив выражает благодарность С.В. Ковшову – к.т.н., доценту, заместителю директора Института целевых образовательных программ по методической работе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» за оказанную помощь и ценные рекомендации в ходе выполнения данного исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

Для цитирования: Романова В.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В., Хромов С.В., Галятин В.А. Комплексная оценка факторов, воздействующих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей угледобывающего комплекса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 3-18. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF LOW-VOLTAGE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS OF A COAL MINING COMPLEX

Romanova V.V.^{1,2}, Batukhtin A.G.¹, Suslov K.V.^{1,3}, Khromov S.V.¹, Galyatin V.A.¹

¹Trans-Baikal State University, Chita, Russia

²Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Volzhsky, Russia

³National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
romanova181@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of this study lies in solving the problem of reliable functioning of elements of energy systems and ensuring their effective operation during open-pit mining. The paper presents a methodological approach that allows us to assess the level of reliability of low-voltage asynchronous electric motors in a coal mine with complex mining, geological and climatic conditions of production. THE PURPOSE of the work is to quantify the operational factors affecting the service life of an asynchronous electric motor with a short-circuited rotor. Attention is focused on how influencing factors, different in physical basis, among which electrical parameters are highlighted – the coefficient of voltage asymmetry in the reverse sequence, the coefficients of harmonic voltage components and environmental parameters – temperature, air humidity and dustiness, affect the dynamics of changes in the service life of an asynchronous electric motor. Asynchronous electric motors used at one of the enterprises of JSC SUEK in the Trans-Baikal Territory are considered as an object of research. METHODS. The main tool for the implementation of research tasks is computer modeling based on the Matlab software package. RESULTS. The studies were performed on an asynchronous electric motor with a short-circuited rotor with $P_n = 3$ kW, rated speed 1500 rpm. The simulation of the operating mode of the electric motor under study was performed by changing the experimental parameters: the values of the total coefficient of harmonic voltage components (K_U) – from 4 to 12% with a range of 2%; the values of the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence (K_{2U}) – from 0 to 4% with a range of 1%; the ambient temperature ($\Delta T_{окр}$) – from -30°C to $+30^{\circ}\text{C}$ with a range of 10°C ; air humidity values (V_c) – 20% and 60%; dust thermal conductivity coefficient values (K_m) – 0,12 and 0,28. Based on the obtained research results, diagrams are constructed that clearly illustrate the dynamics of changes in the service life of an asynchronous electric motor depending on the combination of influencing factors. CONCLUSION. The trends in solving the issues of reliable functioning of a coal mining enterprise with the presence of asynchronous electric motors and ensuring their efficient operation are the most priority, mainly focused on maintaining the stability of technological processes and maintaining the production volumes of a coal mining enterprise. The stability of the electric motor to certain influencing factors is estimated and their critical

values are established. Recommendations on the use of asynchronous electric motors are formulated, taking into account their operating conditions.

Keywords: asynchronous electric motor; computer simulation based on the Matlab/Simulink system; external influencing factors; operational reliability of an asynchronous electric motor.

Acknowledgements: the author's team expresses its gratitude to S.V. Kovshov, Ph.D., Associate Professor, Deputy Director of the Institute of Targeted Educational Programs for Methodological Work of the St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II for the assistance and valuable recommendations during the implementation of this study. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme № 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement № 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023).

For citation: Romanova V.V., Batukhtin A.G., Suslov K.V., Khromov S.V., Galyatin V.A. Comprehensive assessment of factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors of a coal mining complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 3-18. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

Эффективное функционирование угледобывающего предприятия зависит от стабильной и безаварийной работы отдельных его элементов, в частности асинхронных электродвигателей (АД), служащих электрическим приводом подавляющего большинства ответственных механизмов. Следует заметить, что роль низковольтных асинхронных электродвигателей в технологической цепочке угледобывающих комплексов очевидна и значима, выход из строя одного «звена» приводит к нарушению сложных технологических процессов, простоя технологической цепи, и в результате к снижению объёмов добычи [1].

Специфика работы предприятий угольной промышленности сопряжена сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, соответственно, эксплуатация электрооборудования в подобных условиях обусловлена наличием агрессивной среды и повышенной запыленности [1]. Наряду с этим, необходимо выделить проблему низкого качества электрической энергии (КЭЭ) в электрических сетях, питающих предприятия минерально-сырьевого комплекса. Так, в результате проведённых инструментальных исследований в электрических сетях Забайкальской электроэнергетической системы [2] установлено следующее, что показатели качества электрической энергии (ПКЭ), такие как несимметрия и несинусоидальность напряжения, отклонение напряжения превышают в 2-3 раза нормируемое ГОСТ 32144 – 2013 [3] значение. Как отмечено в работах [2, 4], значительное отклонение от регламентируемых норм наблюдается по следующим показателям: K_{2U} , $K_{U(3)}$, $K_{U(5)}$, $K_{U(15)}$, $K_{U(21)}$. Очевидно, что особенности работы Забайкальской электроэнергетической системы с комплексом неблагоприятных факторов приводят к увеличению аварийности электрооборудования потребителей края, кроме того, к снижению надёжности и эффективности их функционирования.

Литературный обзор существующих проблем надёжности АД в условиях текущей эксплуатации [5-7] показывает, что техническое состояние и уровень надёжности асинхронных электродвигателей зависит от состояния изоляции обмоток. Согласно авторским сведениям отмечено следующее, что одной из причин выхода из строя электродвигателей является повреждение изоляции обмоток статора вследствие теплового воздействия.

Выполненные в работах авторов исследования особенностей [8-10] и условий эксплуатации асинхронных электродвигателей [11-13] указывают, что ряд внешних воздействующих факторов, таких как неудовлетворительное качество питающего напряжения, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, запыленность, способствуют уменьшению охлаждения асинхронных электродвигателей, что неизбежно влечёт за собой дополнительный рост температуры отдельных частей электродвигателя, в конечном итоге приводит к перегреву изоляции обмоток. В связи с этим становится очевидным, что, нарушение теплового режима работы электродвигателей, при наличии сложных условий эксплуатации, неизбежно приводит к снижению срока службы АД. Согласно многочисленным исследованиям, проведённым авторами [8-10], установлено, что совокупное воздействие эксплуатационных факторов, существенно влияет на изменение срока службы электродвигателей.

Исходя из вышеизложенного, аргументируем, что, несмотря на наличие современных взглядов и достаточно глубокую проработку данной тематики, остаётся ряд нерешённых вопросов в контексте проблемы совокупного влияния факторов. Вследствие этого, требуется разработка новых направлений и подходов к оценке степени надёжности АД в условиях текущей эксплуатации на угольных разрезах со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, которым посвящена данная работа.

Основная цель работы заключается в количественной оценке эксплуатационных факторов, воздействующих на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Для достижения цели работы решены следующие задачи:

- проведён анализ проблемы эксплуатационной надёжности асинхронных электродвигателей, при этом определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на стабильную работу электродвигателей, применяемых на предприятии компании АО «СУЭК» Забайкальского края;

- выполнен критический анализ фактического состояния КЭЭ электрических сетей 0,4; 6; 35 кВ электроэнергетической системы Забайкальского региона;

- разработаны методические основы реализации подхода, направленного на оценку, кроме того, обеспечение эффективной и безаварийной эксплуатации асинхронных электродвигателей, работающих на угольных разрезах открытого способа добычи.

Как известно, работа предприятий минерально-сырьевого комплекса неотъемлемо связана с рядом технологических сложностей, одной из которых является наличие повышенной запыленности атмосферы угольных разрезов [1]. Соответственно, в данных условиях особое внимание приобретает исследование и анализ процессов пылеобразования на предприятиях угольной промышленности.

В работе сосредоточено внимание на изучении изменения срока службы АД в зависимости от разных по физической основе факторов: электрических параметров – коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициентов гармонических составляющих напряжения; параметров окружающей среды – температуры и влажности воздуха, запылённости.

Ключевым содержательным моментом в контексте реализации задач исследования является прогнозирование изменения реального срока службы электродвигателя в зависимости от совокупного воздействия факторов. Совершенно очевидно, что решение подобной задачи позволяет выявить уровень устойчивости АД к влиянию эксплуатационных факторов, установить их критические значения.

Именно поэтому, формализация комплексной оценки и анализ степени влияния эксплуатационных факторов являются основополагающими элементами в концепции обеспечения эффективной и безаварийной эксплуатации электродвигателей.

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке методического подхода решения задач оценки надёжности АД, при влиянии внешних воздействующих факторов, путём прогнозирования реального срока их службы. Предлагаемый подход позволяет оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи.

Практическая значимость результатов исследования заключается в выявлении критических значений параметров эксплуатации низковольтных асинхронных электродвигателей, кроме того, в определении рекомендуемых режимов работы, способствующих продлению срока службы АД, при воздействии группы эксплуатационных факторов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Развитие концептуального видения реализации методического подхода, позволяющего оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей при работе в условиях угледобывающего комплекса со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, является основной задачей данного исследования.

В качестве объекта исследования рассмотрены асинхронные электродвигатели, применяемые на одном из предприятий компании АО «СУЭК» Забайкальского края. Основным видом деятельности предприятия является добыча бурого угля открытым способом.

В технологическом процессе угледобывающего предприятия задействованы одноковшовые шагающие экскаваторы (драглайны) ЭШ-10/70, необходимые для выемки большого объёма горных пород на вскрышных работах и отвалах карьера. Для

электроприводов главных механизмов шагающих экскаваторов (тяги, подъёма и шагания) применяются электродвигатели постоянного тока типа МПЭ 450-900, для электроприводов главных механизмов шагающих экскаваторов (поворота) электродвигатели постоянного тока типа МПВЭ 400-900. В процессе работы электродвигателей постоянного тока предусмотрен их обдув асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором серии АИР100S4.

В соответствии с изложенным в данной работе требуется выполнить исследование и детальный анализ режимов работы АД серии АИР100S4 с $P_n = 3$ кВт, номинальной частотой вращения 1500 об/мин. [14].

Как известно [15], показатели надёжности асинхронных электродвигателей имеют следующие значения – средний срок службы более 15 лет при наработке 40000 часов. Наряду с этим отметим, что стабильная и безаварийная работа асинхронных электродвигателей возможна при определенных условиях эксплуатации, обеспечивающих допустимый тепловой режим работы, установленный заводом изготовителем.

Методический подход, позволяющий оценить степень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи, включает в себя: аналитический обзор эксплуатационных факторов, оказывающих наибольшее влияние на тепловой режим работы электродвигателей, методику определения теплового баланса АД, анализ экспериментальных исследований физико-химического состава пыли вблизи и на поверхности электродвигателей, компьютерное моделирование на основе системы Matlab/Simulink.

Предлагаемый методический подход представлен в следующей последовательности:

Шаг 1. Выполнение аналитического обзора эксплуатационных факторов, оказывающих наибольшее влияние на тепловой режим работы низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых в условиях угольного разреза со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, включающего детальный анализ экспериментальных исследований физико-химического состава пыли.

Принципы исследования запыленности на предприятии компании АО «СУЭК» Забайкальского края следующие:

- проанализирована запыленность на добычном и вскрышном участках, на постоянных автодорогах;
- измерения проводились счётным методом с помощью счётчика пылевых частиц DT9880 и весовым методом с применением сифонного аспиратора, фильтров АФА-20.

Шаг 2. Уравнение теплового баланса АД для установившегося режима при искажениях напряжения выглядит следующим образом:

$$\sum \Delta P + \sum \Delta P_{ад} = K_{т0} \cdot \sum S_{п} \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр}), \quad (1)$$

где:

$\sum \Delta P$ – потери в АД в условиях отсутствия искажений напряжения, Вт;

$\sum \Delta P_{ад}$ – дополнительные потери в АД при искажениях напряжения, Вт;

$S_{п}$ – площадь поверхности теплоотдачи АД, м²;

$\Delta T_{дв}$ – температура на поверхности АД, °С;

$\Delta T_{окр}$ – температура окружающей среды, °С;

$K_{т0}$ – коэффициент теплоотдачи АД, Вт/(м²·°С).

Шаг 3. Определение потерь мощности в АД при условии отсутствия искажений напряжения.

Согласно [16], потери мощности в АД рассчитываются следующим образом:

$$\sum \Delta P = P_{з1} + P_{з2} + \Delta P_{мех}, \quad (2)$$

где:

$P_{з1}$ – электрические потери в обмотке статора АД, Вт;

$P_{з2}$ – электрические потери в обмотке ротора АД, Вт;

$\Delta P_{мех}$ – механические потери в АД, Вт.

Далее определим отдельные слагаемые формулы (2):

1) определение электрических потерь в обмотке статора

$$P_{з1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \quad (3)$$

2) определение электрических потерь в обмотке ротора

$$P_{з2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2, \quad (4)$$

где r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора, в пересчёте на рабочую температуру $\theta_{раб}$:

$$r_1 = r_{1a} [1 + \alpha (\theta_{раб} - 20)]; \quad (5)$$

$$r_2 = r_{2a} [1 + \alpha (\theta_{\text{рас}} - 20)],$$

где:

r_{1a} и r_{2a} – активные сопротивления обмоток при температуре $\theta_{\text{рас}} = 20$ °C;

α – температурный коэффициент, для меди $\alpha = 0,004$;

3) определение механических потерь в АД согласно [15], по формуле:

$$\Delta P_{\text{мех}} = 1,3 \cdot (1 - D_a) \cdot \left(\frac{ng}{10}\right) D_a^4, \quad (6)$$

где:

ng – номинальная частота вращения АД, об/мин;

D_a – внешний диаметр обода ротора АД, м.

Шаг 4. Определение дополнительных тепловых потерь мощности в электродвигателе вследствие искажения напряжений.

Выполним расчёт дополнительных тепловых потерь мощности в АД согласно формуле Шидловского [17]:

$$\Delta P_{\text{ад}} = \frac{r_1 \cdot I_n^2}{\eta \cdot \cos \varphi} (2,41 \cdot K_{2U}^2 + 2 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}}), \quad (7)$$

где:

r_1 – активные сопротивления обмоток фаз статора, Ом;

η – КПД АД, %;

K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %;

U_v – отношение напряжения v -й гармоники к номинальному;

v – порядковый номер гармоники;

I_n – пусковой ток АД, А.

Шаг 5. Определение изменения процесса теплоотдачи в результате потерь мощности АД. При этом требуется отследить динамику изменения коэффициента теплоотдачи при наличии пыли на корпусе электродвигателя.

Стоит отметить, что охлаждение электродвигателя осуществляется двумя способами – непосредственно теплоотдача с поверхности электродвигателя в окружающую среду, помимо этого, теплопередача с поверхности электродвигателя в окружающую среду через слой пыли. Принимаем, что в одной произвольной точке поверхности АД может быть только один способ передачи тепла. Следовательно, для отслеживания динамики изменения коэффициента теплоотдачи, необходимо ввести коэффициент, характеризующий величину покрытия пылью асинхронного электродвигателя (K_m). Соответственно, правая часть уравнения (1) будет состоять из двух слагаемых, расчёт которых необходимо выполнить в данном пункте работы.

Вследствие этого, рассмотрим слой пыли как однослойную плоскую стенку постоянной толщины [18], тогда:

$$Q = K_m / h \cdot \sum S_n \cdot (\Delta T_{\text{дв}} - \Delta T_{\text{окр}}), \quad (8)$$

где:

K_m – коэффициент теплопроводности пыли, Вт/(м °C);

h – толщина пыли, принятая 10 мм [19].

Тогда правая часть уравнения (1) примет следующий вид:

$$Q = \frac{K_m}{h} \cdot \sum S_n \cdot (\Delta T_{\text{дв}} - \Delta T_{\text{окр}}) + K_{\text{то}} \cdot \sum S_n \cdot (\Delta T_{\text{дв}} - \Delta T_{\text{окр}}) \cdot (1 - K_{\text{пп}}). \quad (9)$$

Кроме того, необходимо учесть влияние влажности воздуха на работу АД, для этого рассчитаем коэффициент теплоотдачи с поверхности электродвигателя:

$$K_{\text{то}} = \frac{Q_n}{\sum S_n (\Delta \vartheta_n)}, \quad (10)$$

где Q_n – количество теплоты, определяемое по формуле:

$$Q_n = \Delta \vartheta_n (c_n V), \quad (11)$$

где:

c_n – удельная теплоёмкость воздуха зависит от влажности воздуха (V_c), определяется в соответствии с [20];

V – необходимое количество охлаждающего воздуха, м³/с;

$\Delta \vartheta_n$ – превышение температуры охлаждающей среды.

$$V = m (n_k l_k + 100) \frac{n}{1000} \left(\frac{D_{\text{ин}}}{100}\right) \cdot 10^{-4}, \quad (12)$$

где:

n – количество пар полюсов;

m – коэффициент размерности электродвигателя, при $n = 2$, $m = 2,6$, а при $n = 4, 6, 8, 10$, $m = 3,15$;

n_k, l_k – число и длина радиальных вентиляционных каналов (при их отсутствии $n_k l_k = 0$);
 $D_{вн}$ – внешний диаметр АД, м.

Подставляя известные выражения в (1), получим уравнение следующего вида:

$$3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 + \left(\frac{3 \cdot I_2^2 \cdot r_2}{s} - \eta \cdot P_1 \right) + 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + \frac{r_1 \cdot I_n^2}{(\eta \cdot \cos \varphi)(2,41 \cdot K_{2U}^2 + 2 \sum_{v=3}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}})} =$$

$$= \frac{K_{тн}}{h} \cdot \sum S_{п} \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр}) \cdot K_{пп} + K_{то} \cdot \sum S_{п} \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр})(1 - K_{пп}). \quad (13)$$

Шаг 6. Определение динамики изменения срока службы электродвигателя путём прогнозирования реального срока его службы в зависимости от сочетания воздействующих эксплуатационных факторов.

Учитывая полученные выше зависимости, выразим изменение срока службы асинхронного электродвигателя в виде:

$$z = e^{\frac{3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 + \left(\frac{3 \cdot I_2^2 \cdot r_2}{s} - \eta \cdot P_1 \right) + 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + \frac{r_1 \cdot I_n^2}{(\eta \cdot \cos \varphi)(2,41 \cdot K_{2U}^2 + 2 \sum_{v=3}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}})}{\frac{K_{тн}}{h} \cdot S_{п} \cdot K_{пп} + S_{п}(c_B V)(1 - K_{пп})}}$$

$$\Delta Z = Z(1 - z), \quad (14)$$

Динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя относительно нормативного рассчитаем по следующей формуле:

$$\Delta Z = Z(1 - z), \quad (15)$$

где $Z = 15$ лет – нормативный срок службы электродвигателя.

Итак, после процедуры подготовки необходимых исходных параметров приступаем к процессу моделирования теплового режима работы АД.

Шаг 7. Выполним процесс моделирования теплового режима работы АД при его эксплуатации с наличием внешних воздействующих факторов, предварительно сформировав модель исследования (рис. 1).

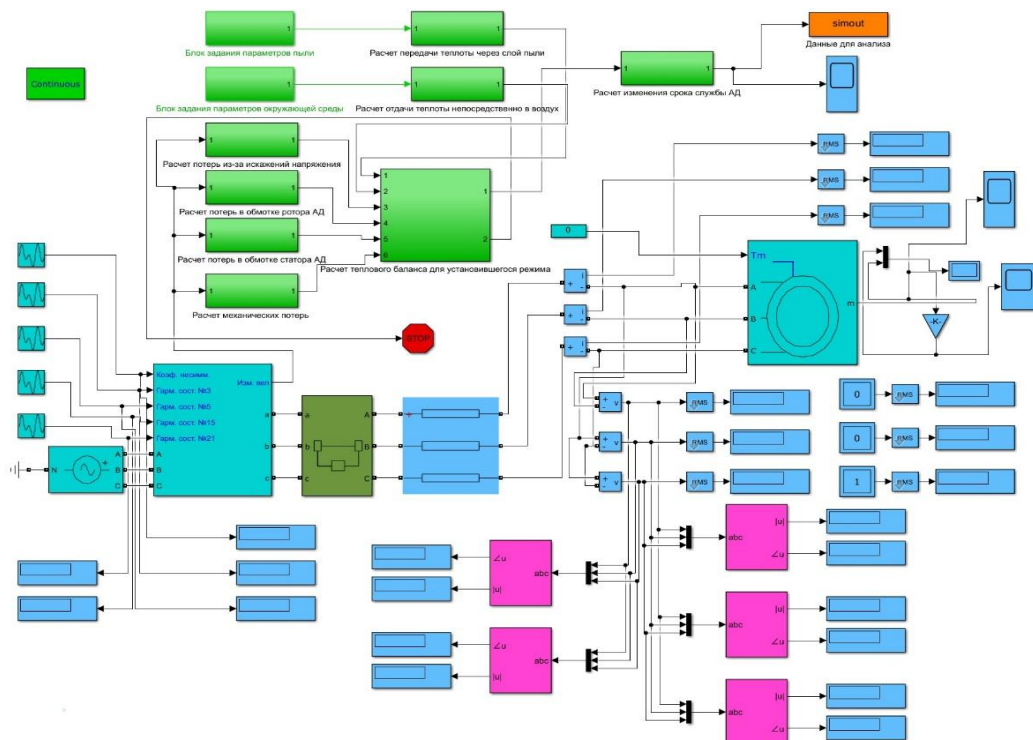


Рис. 1. Компьютерная модель исследования

Fig. 1. Computer model of the study

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработанная модель исследования позволяет выполнять процедуру имитации работы электродвигателя при различных заданных условиях эксплуатации.

Моделирование режима работы, исследуемого электродвигателя, выполнено путём изменения следующих параметров эксперимента:

– величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) – от 4 до 12% с диапазоном в 2%;

- величины коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) – от 0 до 4% с диапазоном в 1%;
- величины температуры окружающей среды ($\Delta T_{окр}$) – от - 30⁰С до + 30⁰С с диапазоном в 10⁰С;
- величины влажности воздуха (V_c) – 20% и 60%;
- величины коэффициента теплопроводности пыли (K_m) – 0,12 и 0,28, принятые в соответствии с [21].

При этом в исследованиях приняты условия:

- величина суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения состоит из следующих слагаемых $K_{U(3)}$, $K_{U(5)}$, $K_{U(15)}$, $K_{U(21)}$, определяемая согласно [22];
- величина коэффициента теплопроводности пыли, прежде всего, зависит от состава пыли.

Исходя из этого, в исследованиях рассмотрены два типа пыли, образовавшиеся в результате вскрышных работ, это каменноугольная пыль с коэффициентом теплопроводности, составляющим 0,12 и каменноугольная пыль с включениями кварцевой пыли, с коэффициентом теплопроводности, составляющим 0,28.

В ходе экспериментов исследуемые параметры оставались неизменными на протяжении одной итерации моделирования.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Опираясь на полученные результаты моделирования, построены графические интерпретации (рис. 2-9), наглядно иллюстрирующие динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя в зависимости от совокупности воздействующих эксплуатационных факторов, позволяющие выявить уровень устойчивости электродвигателя к влиянию определённых эксплуатационных факторов, установить их критические значения.

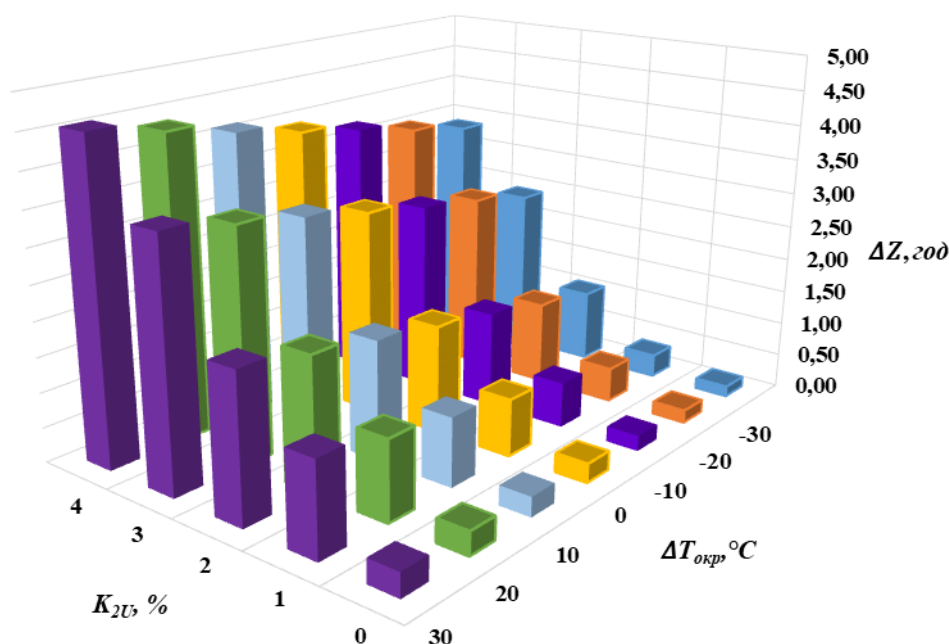


Рис. 2. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

Fig. 2. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_{2U} , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

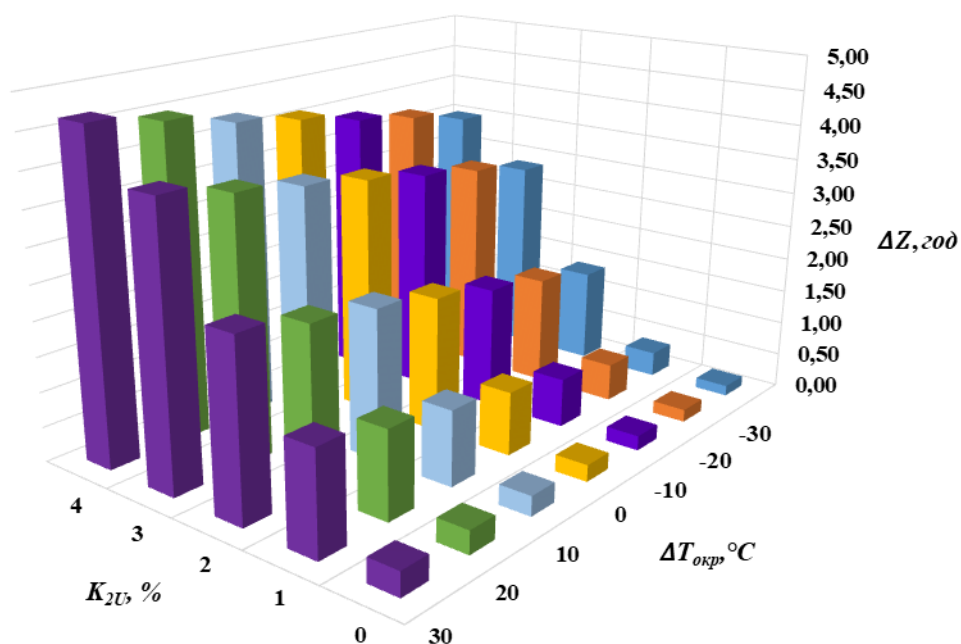


Рис. 3. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

Fig. 3. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_{2U} , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

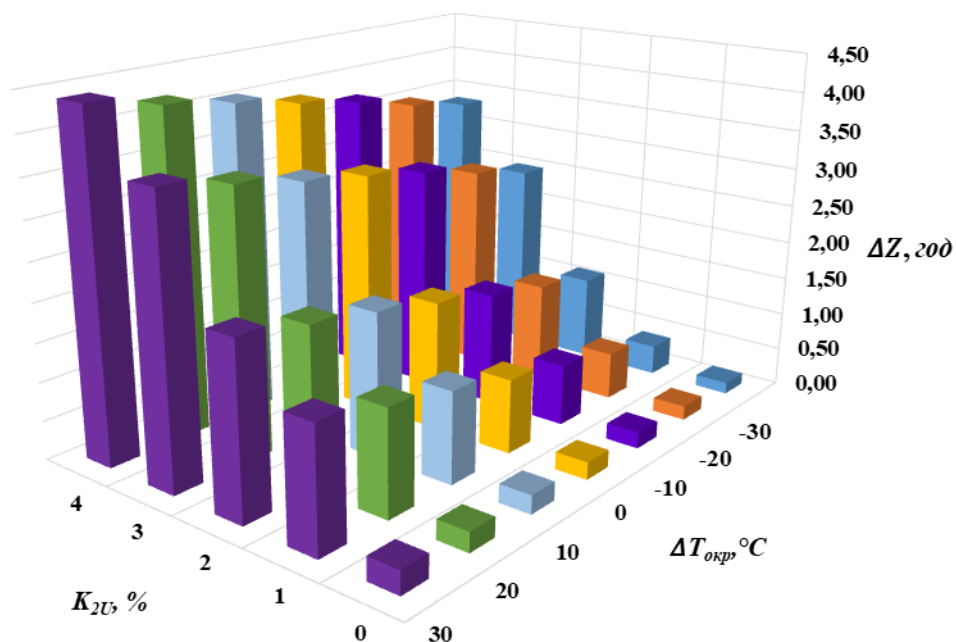


Рис. 4. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

Fig. 4. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_{2U} , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

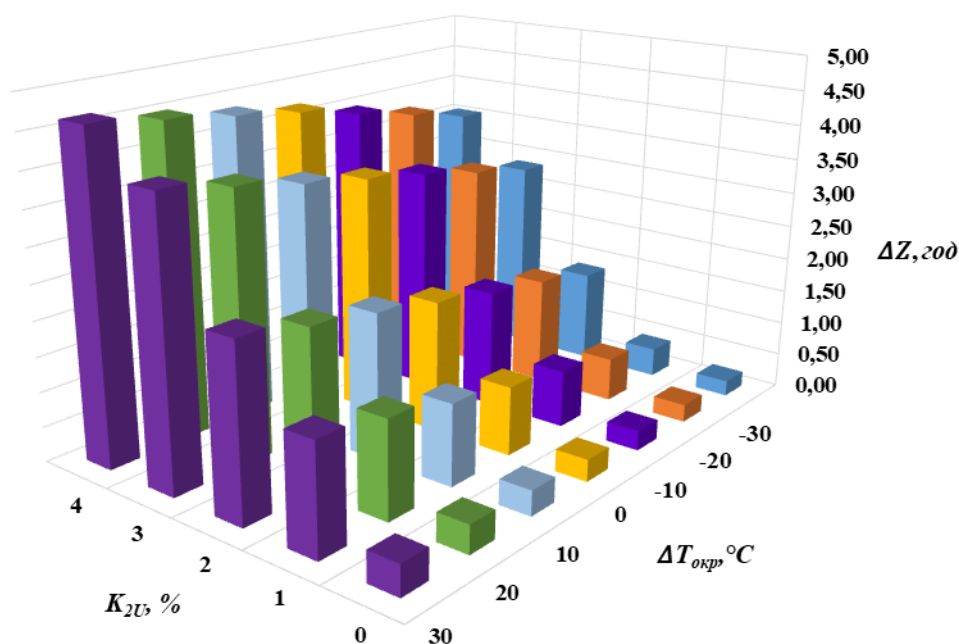


Рис. 5. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

Fig. 5. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

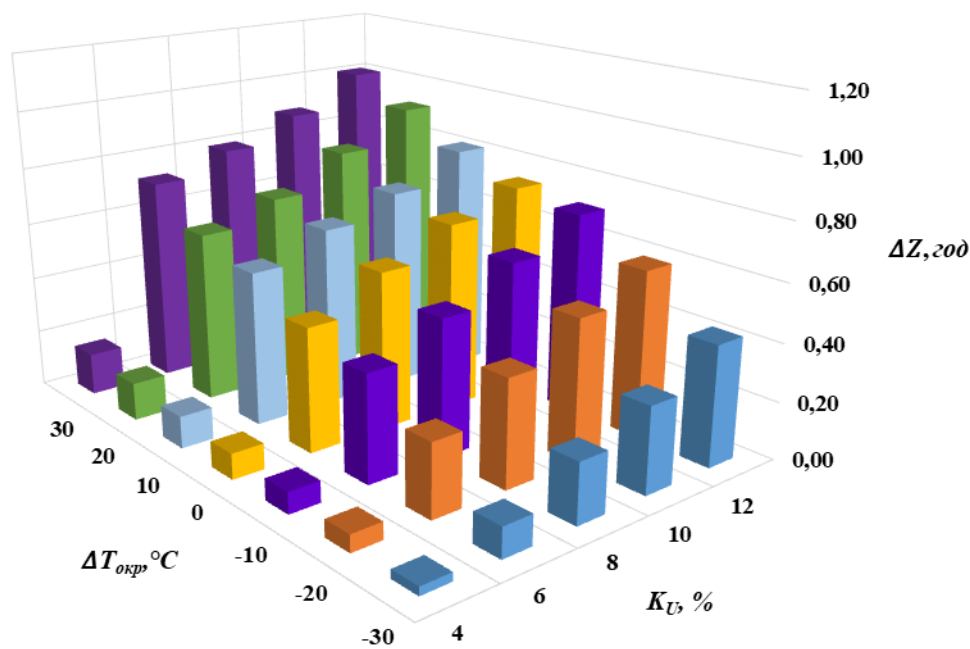


Рис. 6. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

Fig. 6. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

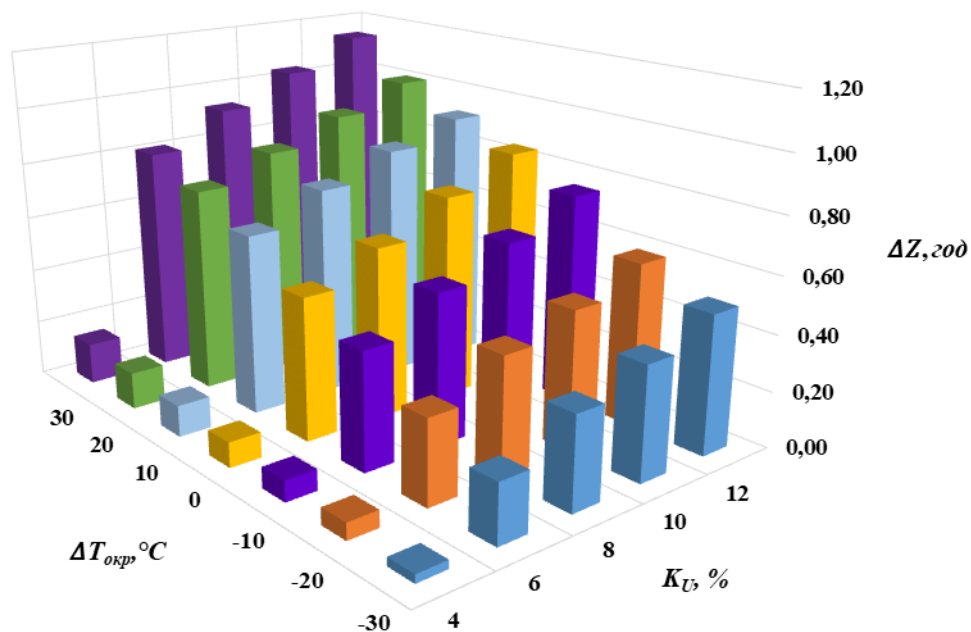


Рис. 7. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

Fig. 7. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

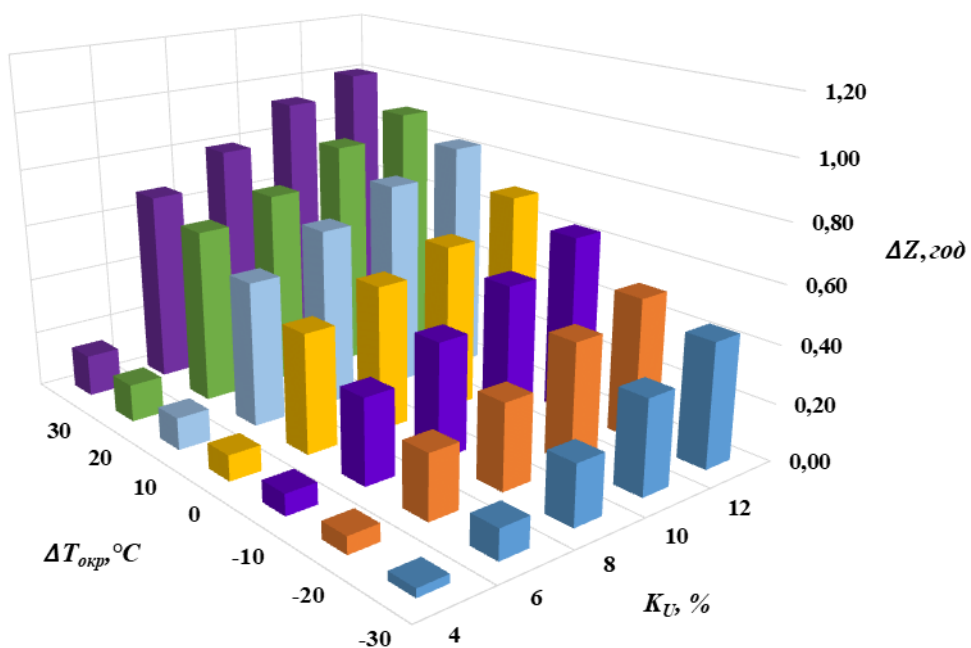


Рис. 8. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

Fig. 8. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

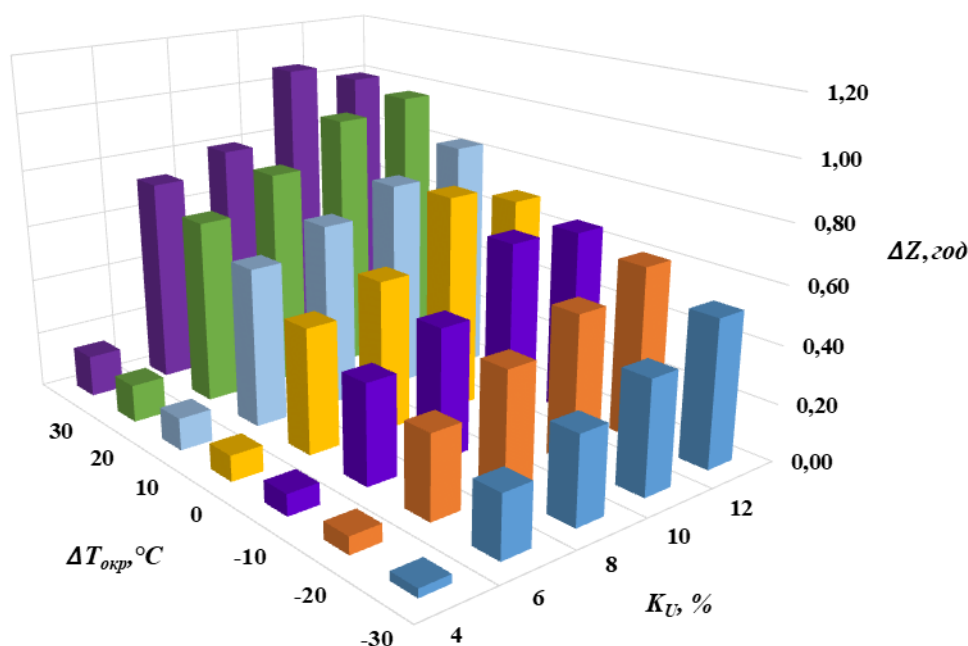


Рис. 9. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

Fig. 9. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ изображённых на (рис. 2-5) графических интерпретаций свидетельствует о том, что снижение срока службы АД:

1) в случае каменноугольной пыли с $K_m = 0,12$ и $V_c = 20\%$ составляет, соответственно:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,58$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,72$ года;
- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,59$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,77$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,97$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,1$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,98$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,2$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,48$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,65$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,54$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,67$ года;

2) в случае каменноугольной пыли с $K_m = 0,28$ и $V_c = 60\%$ составляет:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,05$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,35$ года;
- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 2\%$ $\Delta Z = 1,11$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,38$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,56$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,92$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,71$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,98$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,1$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,56$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,22$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,57$ года.

Графические отображения, проиллюстрированные на (рис. 6 - 9), показывают, что снижение срока службы АД:

1) в случае каменноугольной пыли с включениями кварцевой пыли с $K_m = 0,12$ и $V_c = 20\%$ составляет:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,39$ года;
- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,41$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,74$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,76$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 1,04$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{UU} = 8\%$ $\Delta Z = 1,06$ года;

2) в случае каменноугольной пыли с включениями кварцевой пыли с $K_m = 0,28$ и $V_c = 60\%$ составляет:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,3$ года;

- при $\Delta T_{\text{окр}} = -30^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,33$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = 0^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,59$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = 0^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,66$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,89$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 1,06$ года.

Проведенные исследования доказали влияние эксплуатационных факторов на срок службы асинхронного электродвигателя, наряду с этим установлено, что максимальная величина варьирования срока службы наблюдается при наличии каменноугольной пыли $K_m = 0,12$ с сочетанием следующих параметров $K_{2U} = 4\%$, $V_c = 20\%$, $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ и составляет $\Delta Z = 4,67$ года.

Исходя из полученных результатов исследования, сформулируем следующие выводы:

1. Исследования в контексте оценки факторов, воздействующих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей угледобывающего предприятия выполнены на основе прогнозирования изменения срока службы АД. Следует отметить, что сосредоточено внимание на изменении срока службы АД в зависимости от разных по физической основе факторов: электрических параметров – коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициентов гармонических составляющих напряжения; параметров окружающей среды – температуры и влажности воздуха, запылённости. Соответственно, концепция данного исследования является принципиальным методическим подходом, позволяющим оценить степень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи.

2. Необходимо подчеркнуть, что воздействие эксплуатационных факторов значительно снижают уровень надёжности асинхронных электродвигателей, уменьшая срок их службы. Так, в работе реализована оценка влияния различных эксплуатационных факторов, в результате которой выявлен показатель качества электрической энергии – K_{2U} , имеющий наибольшее воздействие на изменение срока службы АД. Кроме того, установлено, что величина воздействия пыли на срок службы АД зависит от её физико-химического состава. Так, например, максимальное изменение срока службы электродвигателей при каменноугольной пыли с $K_m = 0,12$, и $V_c = 60\%$ составило $\Delta Z = 4,65$ года, а для каменноугольной пыли с включениями кварцевой пыли с $K_m = 0,28$ и $V_c = 60\%$ составило $\Delta Z = 4,56$ года. Отмечено, что максимальная величина варьирования срока службы наблюдается при наличии каменноугольной пыли $K_m = 0,12$ с сочетанием следующих параметров $K_{2U} = 4\%$, $V_c = 20\%$, $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ и составляет $\Delta Z = 4,67$ года.

Следовательно, аргументируем следующее, что степень устойчивости электродвигателей к воздействию запыленности зависит от состава пыли, который определяет совокупную величину её теплопроводности.

3. Согласно проведённым исследованиям рекомендуемый режим работы АД, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи при одновременном воздействии факторов составляет следующие значения – $K_{2U} \leq 2\%$, $K_U \leq 8\%$, $20 \leq V_c \leq 50\%$, $-30^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{окр}} \leq +20^{\circ}\text{C}$.

Следственно, с учётом изложенного отметим, что на основании разработанного подхода выявлены критические значения параметров эксплуатации низковольтных асинхронных электродвигателей.

4. Очевидно, что необходимо придерживаться соблюдения рекомендуемых параметров эксплуатации электродвигателей при их работе. В случае выхода из строя электродвигателей, с целью сохранения объёмов добычи угледобывающего предприятия, должно предусматриваться быстрое восстановление работоспособности электроприводных механизмов, которое обеспечивается за счёт «горячего резерва» электродвигателей на предприятии.

5. Стабильная и безаварийная работа асинхронных электродвигателей несомненно зависит от условий их эксплуатации, в связи с этим внедрение системы организационных и технических воздействий, направленных на поддержание технического состояния путём коррекции искажений напряжения, кроме того, визуальный осмотр и своевременное обслуживание, способствуют их длительной работе.

Заключение (Conclusions)

В работе представлено концептуальное видение реализации методического подхода, позволяющего оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей при работе в условиях угледобывающего комплекса со сложными горно-

геологическими и климатическими условиями добычи. Становится очевидным, что тенденции решения вопросов надёжного функционирования угледобывающего предприятия с наличием асинхронных электродвигателей и обеспечение их эффективной эксплуатации являются наиболее приоритетными, главным образом, ориентированными на поддержание стабильности технологических процессов и сохранения объёмов добычи угледобывающего предприятия.

Литература

1. Афанасьев В. Я. Уголь России: состояние и перспективы: Монография / В.Я. Афанасьев, Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник. М.: НИЦ ИНФРА-М. 2017. 271 с.
2. Коверникова Л.И., Шамонов Р.Г., Суднова В.В. Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению: монография / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2017. 219 с.
3. ГОСТ 32144 – 2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
4. Zapanov O.V., Kovernikova L.I. On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» / E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209 (07012). p.6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907012>.
5. Назарычев А.Н. Надёжность и оценка технического состояния оборудования систем электроснабжения / А.Н. Назарычев, Д.С. Крупенёв. Новосибирск: Наука. 2020. 224 с.
6. Хомутов С.О. Анализ влияния внешних воздействующих факторов на состояние изоляции электродвигателей // Ползуновский вестник. Барнаул: Издательский центр АлтГТУ им. И.И. Ползунова. 2005. №4. Ч.3. С. 260 – 267.
7. Sebok M., Guttien M., Kucera M., Korenciak D. Condition analysis of electrical machines by thermovision. Przegląd Elektrotechniczny. 2020. 96(8). pp. 47 – 50. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.08.10>.
8. Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 216 (01084). p.4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.
9. Mohammed J.A-K., Al-Sakini S.R., Hussein A.A. Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2020. Vol. 10. № 3. pp. 2259 – 2270. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270>.
10. Sorin Deleanu, Mihai Iordache, Marilena Stanculescu, Dragos Niculae. The Induction Machine Operating from a Voltage Supply, Unbalanced and Polluted with Harmonics: A Practical Approach, 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania. 2019. pp. 181 – 184.
11. Романова В.В., Суслов К.В., Хромов С.В., Батухтин А.Г. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 4. С.131 – 141. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.
12. Tabora J.M., de Matos E.O., Soares T.M., Tostes M.E. Voltage unbalance effect on the behavior of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes // Proc. on VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Santo André, São Paulo, Brazil. 2020. p.6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
13. Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V. Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2552 (070017). 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0117210>.
14. Технические характеристики асинхронных электродвигателей серии АИР. Номинальная частота вращения 1500 об/мин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55>. Ссылка активна на 08 июня 2024.
15. Копылов И. П. Проектирование электрических машин, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт. 2024. 828 с.
16. Шайтор Н. М. Расчёт и анализ температурных полей асинхронных двигателей / Н. М. Шайтор, А. С. Велияев // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 2. С. 112 – 118.
17. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. Киев: Наукова думка. 1985. 268 с.
18. Кудинов В. А. Техническая термодинамика и теплопередача / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. М.: Издательство Юрайт. 2024. 454 с.
19. Sharov N.A., Dudayev R.R., Krishchuk D.I., Liskova M.Yu. Dust suppression methods in coal mines of the Far North. Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2019. Vol.19. №2. pp.184 – 200. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.8.
20. ГОСТ IEC 60034-2A-2012. Машины электрические вращающиеся. Часть 2 – Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин при испытаниях (исключая машины для тяговых транспортных средств). Измерение потерь калориметрическим методом. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
21. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. М.: Энергия. 1980. 288 с.
22. ГОСТ 30804.4.7 – 2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и

интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. М.: Стандартиформ, 2013. 34 с.

Авторы публикации

Романова Виктория Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета; канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетики» филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Волжском. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>. E-mail: romanova181@mail.ru

Батухтин Андрей Геннадьевич – д-р техн. наук, доцент, декан Энергетического факультета Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>. E-mail: batuhtina_ir@mail.ru

Сулов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»; гл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории «Энергосбережения и плазменных технологий» Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>. E-mail: dr.souslov@yandex.ru

Хромов Сергей Владимирович – ст. преподаватель кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>. E-mail: sergeixrom@inbox.ru

Галятин Владислав Алексеевич – студент кафедры «Строительство» Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-4358-7633>. E-mail: galiatin01@mail.ru

References

1. Afanasyev VYa. *Ugol' Rossii: sostojanie i perspektivy*. М.: SIC INFRA-M. 2017; 271 p. (In Russ).
2. Kovernikova LI, Shamonov RG, Sudnova VV. *Kachestvo jelektricheskoy jenerгии, sovremennoe sostojanie, problemy, predlozheniya po ih resheniju*. ed. by N.I. Voropai. Novosibirsk: Nauka. 2017; 219 p. (In Russ).
3. GOST 32144 – 2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standartinform. 2014; 19 p. (In Russ).
4. Zapanov OV, Kovernikova LI. On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine». *E3S Web of Conferences*. 2020; 209 (07012): 6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907012>.
5. Nazarychev AN. Reliability and assessment of the technical condition of the equipment of power supply systems. 2020; 224 p. (In Russ).
6. Khomutov SO. Analysis of the influence of external influencing factors on the state of insulation of electric motors. *Polzunovskiy vestnik*. 2005; 4(3): 260 – 267. (In Russ).
7. Sebok M, Gutten M, Kucera M, et al. Condition analysis of electrical machines by thermovision. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2020; 96(8): 47 – 50. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.08.10>.
8. Romanova VV, Suslov KV, Khromov SV. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors. *E3S Web of Conferences*. 2020; 216 (01084): 4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.
9. Mohammed JA-K, Al-Sakini SR, Hussein AA. Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2020; 10(3): 2259 – 2270. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270>.
10. Sorin D, Mihai I, Marilena S, et al. The Induction Machine Operating from a Voltage Supply, Unbalanced and Polluted with Harmonics: A Practical Approach, *15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania. 2019; 181 – 184.
11. Romanova VV, Suslov KV, Khromov SV, Batukhtin AG. Analysis of the degree of influence of the asymmetry of the supply voltage on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2022; 24(4): 131 – 141. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141>. (In Russ).
12. Tabora JM, de Matos EO, Soares TM, et al. Voltage unbalance effect on the behavior of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes. *Proc. on VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. Santo 2020; 6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
13. Romanova VV, Suslov KV, Khromov SV. Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2552 (070017): 7. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0117210>.

14. *Tekhnicheskie kharakteristiki asinkhronnykh elektrodvigateli serii AIR. Nominal'naya chastota vrashcheniya 1500 ob/min* [Electronic resource]. URL: [http:// www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55](http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55). Accessed: 08 June 2024. (In Russ).
15. Kopylov IP. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin*. M.: Yurayt Publishing House. 4th ed. 2024; 828 p. (In Russ).
16. Shaitor NM. Calculation and analysis of temperature fields of asynchronous motors. *Power plants and technologies*. 2021; 7(2): 112 – 118. (In Russ).
17. Shidlovsky AK. *Povyshenie kachestva jenerгии v jelektricheskikh setjah*. Kiev: Naukova dumka. 1985; 268 p. (In Russ).
18. Kudinov VA. *Tekhnicheskaja termodinamika i teploperedacha*. M.: Yurayt Publishing House. 4th ed. 2024; 454 p. (In Russ).
19. Sharov NA, Dudayev RR, Krishchuk DI, Liskova MYu. Dust suppression methods in coal mines of the Far North. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2019; 19(2): 184 – 200. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.8.
20. GOST IEC 60034-2A-2012. Electric rotating machines. Part 2 – Methods for determining losses and efficiency of rotating electric machines during tests (excluding machines for traction vehicles). Measurement of losses by the calorimetric method. Moscow: Standartinform, 2014; 19 p. (In Russ).
21. Krasnoshchekov EA, Sukomel AS. *Zadachnik po teploperedache*. 4th ed. M.: Energy. 1980; 288 p. (In Russ).
22. GOST 30804.4.7 – 2013 (IEC 61000-4-7:2009). Electromagnetic compatibility of technical means. General guidance on measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical means connected to them. Moscow: Standartinform, 2013; 34 p. (In Russ).

Authors of the publication

Victoria V. Romanova – Trans-Baikal State University, Chita, Russia; Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Volzhsky, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>. E-mail: romanova181@mail.ru

Andrey G. Batukhtin – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>. E-mail: batuhtina_ir@mail.ru

Konstantin V. Suslov – National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia; Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>. E-mail: dr.souslov@yandex.ru

Sergey V. Khromov – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>. E-mail: sergeixrom@inbox.ru

Vladislav A. Galyatin – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-4358-7633>. E-mail: galiatin01@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено	29.07.2024 г.
Отредактировано	21.08.2024 г.
Принято	02.09.2024 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.317.333

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30

ДИАГНОСТИКА ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Гатауллин А.М., Гавриленко А.Н., Писковацкий Ю.В., Минкин А.С.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
gataullin1969@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования определяется тем, что на сегодняшний день отсутствует методика оценки состояния изоляторов и их гирлянд по характеристикам частичных разрядов (ЧР). В настоящее время в эксплуатации находится большое количество опорных и проходных фарфоровых изоляторов. ЦЕЛЬ. Распознавание ЧР в твердой изоляции, исследование характеристик ЧР в предпробойной ситуации, распознавание дефектных изоляторов по характеристикам ЧР. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи осуществлялись регистрация и сравнительный анализ характеристик ЧР для дефектного и работоспособного фарфорового изолятора. Для исследования характеристик различных типов ЧР, в том числе в предпробойной ситуации применялась система образцовых ЧР поверхность-игла. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье сопоставлены характеристики ЧР, полученные стандартным прибором R-400 производства «Димрус» с применением стандартного датчика. Разработана методика распознавания развития предпробойной ситуации разрядного промежутка поверхность-игла и фарфорового изолятора. Разработан методика распознавания дефектного фарфорового изолятора по амплитудно-фазовым диаграммам (АФД) ЧР, разработан метод оценки пробивного напряжения фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов. ВЫВОДЫ. В момент перехода в предпробойную стадию, обнаружены ЧР для которых характерно резкое нарастание встречного движения зарядов. Эти разряды приводили к увеличению тока утечки и регистрировались в фарфоровых изоляторах с применением прибора «Димрус» со стандартным набором датчиков. На основе анализа характеристик этих разрядов был сделан вывод относительно пробивного напряжения изоляторов.

Ключевые слова: метод частичных разрядов; частичные разряды; диагностика высоковольтных фарфоровых изоляторов; высоковольтные изоляторы; диагностика высоковольтных электрических изоляторов по характеристикам частичных разрядов; оценка пробивного напряжения фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов.

Для цитирования: Гатауллин А.М., Гавриленко А.Н., Писковацкий Ю.В., Минкин А.С. Диагностика фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 19-30. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30.

DIAGNOSTICS OF PORCELAIN INSULATORS BY PARTIAL DISCHARGES CHARACTERISTICS

Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piskovatskiy Y.V., Minkin A.S.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gataullin1969@gmail.com

Abstract: RELEVANCE of the research is in the development of a non-destructive method for

diagnosing porcelain insulators of high-voltage electrical equipment based on analysis of the characteristics of partial discharges (PDs). The problem of the final stage of breakdown of both the discharge gap and porcelain insulators recognizing is currently has not solved. THE PURPOSE. Recognition of PDs in solid insulation, study of PDs characteristics in a pre-breakdown situation, recognition of defective insulators based on PDs characteristics analysing. METHODS. The study of PDs characteristics for a defective and functional porcelain insulator were carried out. To study the characteristics of various types of PDs, including in the pre-breakdown situation, a system of surface-needle electrode system was used. RESULTS. The article describes compares the PDs characteristics obtained using standard R-400 device and a digital storage oscilloscope (DSO) using a telescopic antenna. A technique for recognizing the development of the pre-breakdown situation of the surface-needle discharge gap and the porcelain insulator was developed. The technique for recognizing a defective porcelain insulator from the amplitude-phase diagrams (APD) of PDs was developed. The method for assessing the breakdown voltage of porcelain insulators based on the characteristics of partial discharges was developed. CONCLUSION. At the moment of transition to the pre-breakdown stage were observed a sharp increase in the counter-movement of charges of opposite polarity. In the stage immediately before the breakdown, near zero values of the applied voltage of negative polarity, ordered PDs of the same polarity as the applied voltage were recorded in large numbers. These discharges led to an increase in leakage current and were interpreted as initial corona discharges. These discharges were recorded both by a telescopic antenna in a surface-needle system and in porcelain insulators.

Keywords: method of partial discharges; partial discharges; diagnostics of high-voltage electrical insulators; high-voltage electrical insulators; assessment of the breakdown voltage of porcelain insulators based on partial discharge characteristics.

For citation: Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piskovatskiy Y.V., Minkin A.S. Diagnostics of porcelain insulators by partial discharges characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 19-30. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30.

Введение (Introduction)

Частичные разряды приводят к повреждению изоляции высоковольтного электрооборудования. С другой стороны, по характеристикам ЧР можно прогнозировать разрушение изоляции. Поэтому в последнее время метод ЧР активно развивается как наиболее перспективный метод неразрушающего контроля изоляции высоковольтного электрооборудования. Одной из главных нерешенных задач является диагностика изоляторов, оценка их сопротивления и пробивного напряжения по характеристикам ЧР. Следует отметить, что ряд авторов объясняют механизм разрушения фарфоровых и полимерных изоляторов увеличением количества воздушных включений в толще изоляции, так называемых каверн, которые приводят к появлению устойчивого сквозного тока через весь объем изолятора, что и является причиной их пробоя. Также в ряде работ исследованы поверхностные ЧР, которые обычно характерны для тарельчатых изоляторов.

В работе [1] описана теория так называемых сверхбольших ЧР, на основе которой объясняется пробой полимерных изоляторов, но не объясняется механизм развития пробоя, который, как известно, начинается от начальных ЧР небольшой амплитуды. В дальнейшем будем называть их максимальными ЧР. При проведении данного исследования дефекты были созданы искусственно, не был произведен сравнительный анализ характеристик ЧР дефектных и бездефектных изоляторов. Также не исследованы характеристики ЧР в их взаимосвязи с током утечки изоляторов, их сопротивлением и пробивным напряжением.

В работе [2] описан прибор для оценки состояния высоковольтных изоляторов комбинированным методом на основе регистрации и анализа характеристик сигналов акустической эмиссии и электромагнитных волн, обусловленных ЧР. В этой работе отсутствует количественная оценка состояния изоляторов.

В работе [3] описаны результаты исследования характеристик ЧР в тарельчатых изоляторах воздушных линий электропередачи в ультравысокочастотном (УВЧ) диапазоне электромагнитного излучения (ЭМИ), обусловленного ЧР. При этом в лабораторных условиях сопоставлялись характеристики ЧР с применением аппарата испытания диэлектриков АИД-70 при величине приложенного напряжения 8,5 кВ. В

данной работе отсутствуют рекомендации по определению величины пробивного напряжения изоляторов по характеристикам ЧР.

В работе [4] были исследованы характеристики модельных разрядов в системе стержень-оконцеватель с помощью телевизионной антенны «Дельта». При этом были обнаружены отличия в фазовом распределении ЧР и их интенсивностей в зависимости от наличия, или отсутствия дефектов. В данной работе отсутствует сравнительный анализ полученных распределений ЧР со стандартными амплитудно-фазовыми диаграммами (АФД), построенными с помощью программного обеспечения стандартного прибора для измерения и анализа характеристик ЧР, например, R-400 производства «Димрус». Также не приведены характеристики ЧР на стадии формирования предпробойной ситуации и перехода в стадию пробоя модельного разрядного промежутка при увеличении приложенного напряжения. В представленной работе рассмотрены вопросы, которые не в полной мере освещены в вышеперечисленных работах.

Для изучения характеристик антенн, эффективности применяемых методов и оборудования обычно используют образцовый источник ЧР поверхность-игла, который позволяет моделировать ЧР в резко неоднородных полях. Отметим, что в фарфоровых тарельчатых изоляторах, ЧР возникают либо на поверхности, либо внутри в условиях резко неоднородных полей. По этой причине полезно сопоставить ЧР в системе поверхность-игла и в фарфоровых тарельчатых изоляторах. При этом актуально решить задачу выработки критериев распознавания ЧР и их источника, в том числе с применением антенн и фильтров. При регистрации ЧР электромагнитными датчиками и антеннами в УВЧ диапазоне ЭМИ теряется информация о фазе приложенного напряжения и соответственно возможность распознавания типа дефекта, что наряду с выработкой критериев предпробойной ситуации является важной научной задачей.

Сделан вывод, что антенны УВЧ диапазона не позволяют регистрировать ЧР, присущие различным стадиям пробоя.

Можно утверждать, что в большинстве случаев основной причиной разрушения изоляторов любого типа являются внутренние дефекты, которые образуются на этапе их изготовления, а их развитие в процессе эксплуатации приводит к постепенному уменьшению электрической прочности и сопровождается увеличением числа и интенсивности ЧР. Для разделения различных типов ЧР друг от друга и идентификации дефекта строят статистические распределения ЧР [5]. Старение изоляции высоковольтного электрооборудования может сопровождаться развитием электрических триингов (дендритов) [6]. Прорастание электрических триингов по поверхности загрязненного изолятора сопровождается уменьшением поверхностного сопротивления изолятора [7]. В предпробойной ситуации воздушного разрядного промежутка и полимерной изоляции в основном наблюдаются ЧР величиной от 50 пКл до 150 пКл [8]. Разработана модель старения изоляции, в которой рост дендритов сопровождается увеличением геометрических размеров каверн [9]. Точное определение величины заряда, обусловленного ЧР, на практике обычно не представляется возможным, причем в одних случаях будет наблюдаться переходная характеристика [10], в других случаях импульсная характеристика [11], обусловленная параметрами измерительной цепи [12], что влияет на величину определяемого кажущегося заряда – заряда, приводящего к таким же изменениям в окружающей среде, что и реальный заряд, внесенный в разрядный промежуток. Имеются сведения, что разрушение диэлектриков под воздействием переменного напряжения происходит по причине электронных лавин [13]. Для разделения различных типов ЧР друг от друга и идентификации дефекта строят статистические распределения ЧР с применением стандартных приборов [14]. Старение изоляции высоковольтного электрооборудования может сопровождаться развитием электрических триингов (дендритов) [15]. Можно сделать вывод, что гораздо более эффективно не стремиться к тому, чтобы как можно более точно измерять величину кажущегося заряда, а сравнивать характеристики ЧР, полученные в одних и тех условиях и делать выводы на основании сопоставления этих характеристик.

Научная значимость исследования состоит в том, что по характеристикам ЧР был изучен переход от начальной стадии пробоя к предпробойной ситуации и к финальной стадии пробоя модельного разрядного промежутка, построена модель оценки пробивного напряжения и получены практические результаты пробивного напряжения фарфоровых изоляторов.

Практическая значимость данной работы заключается в разработке методики оценки пробивного напряжения фарфоровых изоляторов и их гирлянд по

характеристикам ЧР, полученные стандартным прибором R-400.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектами исследования были фарфоровые изоляторы тарельчатого типа ПФ-6В и их гирлянды, состоящие из двух изоляторов, содержащие один не поврежденный и один поврежденный изолятор, а также два неповрежденных изолятора, которые будем называть бездефектными. Также исследован пробой модельного разрядного промежутка поверхность-игла. Изоляторы ПФ-6В изготовлены из фарфора, поэтому можно полагать, что физические процессы и особенности их протекания будут схожи с таковыми в опорных и проходных фарфоровых изоляторах. Полученные результаты и методика могут быть использованы для развития и распространения методики на другие фарфоровые изоляторы, в частности опорные и проходные.

Такой выбор объектов был связан с тем, что в обоих случаях ЧР возникают в резко неоднородных полях и схожих особенностях механизмов пробоя. Поврежденный фарфоровый изолятор не имел видимых внешних повреждений, а только внутренние. При этом оказалось, что у него низкое пробивное напряжение, что позволило выявить механизмы развития пробоя гирлянд фарфоровых изоляторов, содержащих поврежденный изолятор. Сопротивление поврежденного изолятора, определенное мегаомметром МС-05, оказалось равным 50 МОм, а сопротивление не поврежденного изолятора 3,5 ГОм. Схема проведения эксперимента показана на рисунке 1. В качестве источника высокого напряжения был выбран аппарат испытания диэлектриков АИД-70. Для анализа характеристик ЧР применялся прибор R-400 производства «Димрус». Прибор R-400 применялся вместе со стандартным датчиком высокочастотным измерительным трансформатором (ВИТ) с полосой частот 1÷10 МГц и программным обеспечением, которое позволяет представить распределение ЧР в дБ, В, нКл.

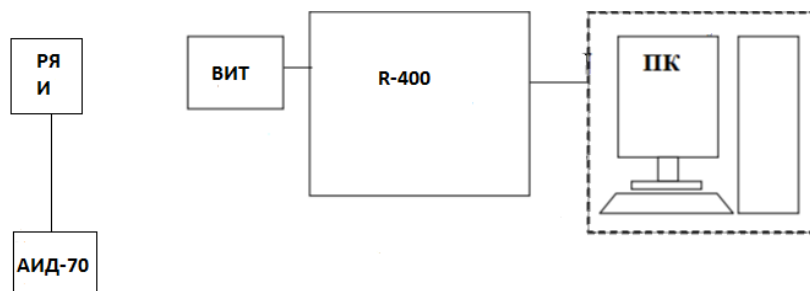


Рис. 1. Схема лабораторной установки. РЯ – разрядная ячейка, И – изолятор и гирлянды изоляторов, АИД-70 – аппарат испытания диэлектриков, ВИТ – высокочастотный измерительный трансформатор (датчик R-400), R-400 – прибор «Димрус», ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory installation. РЯ – discharge cell, И – insulator and insulator garlands, АИД-70 – dielectric testing apparatus, ВИТ – high-frequency measuring transformer (R-400 sensor), R-400 – “Dimrus” device, ПК – personal computer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследования характеристик ЧР проводились при номинальном напряжении отдельно взятых изоляторов и их гирлянд. Исследовали изменение распределений ЧР по фазе и величине приложенного напряжения. Были выведены закономерности изменения этих распределений и их взаимосвязь с пробивным напряжением. Пробивное напряжение не поврежденного изолятора предварительно рассчитывалось по известной формуле и модели, в которой изолятор представлен как цилиндрический конденсатор:

$$U_{np} = E_{np} \frac{(R-r)r}{R}, \quad (1)$$

где R и r – характерные размеры тарельчатого изолятора, а E_{np} – напряженность электрического поля, при которой происходит пробой изолятора.

Для тарельчатого изолятора ПФ-6В она равна примерно 9 кВ/мм. С учетом этой величины и размеров фарфорового изолятора, величина пробивного напряжения оказалась равной 660 кВ. Измерения характеристик ЧР проводились как при постоянном, так и при переменном приложенном напряжении. Исследования показали, что на различных этапах пробоя воздушного разрядного промежутка возникают характерные для этих этапов паттерны ЧР, причем на положительной полуволне

приложенного напряжения в основном наблюдаются провалы приложенного напряжения в момент возникновения ЧР, особенно в интервалах с минимальными значениями напряжений возникновения и гашения ЧР. Такие же особенности были обнаружены для фарфоровых изоляторов и их гирлянд. По этой причине было решено исследовать характеристики одинаковых ЧР, возникающие как при постоянном, так и при переменном приложенном напряжении. Это было сделано также по той причине, что максимальные ЧР при увеличении переменного приложенного напряжения постепенно возникали с меньшей вероятностью, а частота следования относительно небольших ЧР увеличивалась. Также выяснилось, что максимальные ЧР возникают, например, в воздушном разрядном промежутке поверхность-игла в ситуации, далекой от пробоя, а также в неповрежденных фарфоровых изоляторах. Исследования показали, что статистические распределения ЧР для неповрежденного изолятора приближаются к статистическим распределениям ЧР для поврежденного изолятора при значениях приложенного напряжения, близких к пробивным. Такая же особенность характерна для гирлянд. Визуальный осмотр изучаемых изоляторов не проявил таких видимых повреждений как: повреждение глазури, сколы и трещины фарфоровой изоляции, а также отсутствовали видимые загрязнения. Один изолятор не имел внешних повреждений, но его сопротивление было порядка 50 МОм и пробивное напряжение 15 кВ. Другие изоляторы имели омическое сопротивление порядка 3,5 ГОм. Это позволило сделать вывод, что изолятор с сопротивлением 50 МОм имеет внутренние дефекты. Он и был обозначен как поврежденный. Для внутренних разрядов характерна в частности древовидная структура, похожая на структуру разрядов в модели поверхность-игла. Сравнивая АФД для исследуемого объекта с АФД модели поверхность-игла и наблюдая распределение ЧР, похожее на распределение в модели поверхность-игла, можно полагать, что проявляются внутренние ЧР. В частности, при внутренних ЧР увеличивается их количество, особенно с малыми амплитудами, в районе фаз 210÷240 градусов приложенного напряжения. Это позволяет отличать внутренние ЧР от других.

Закономерности пробоя были исследованы на основании расчетной модели оценки пробивного напряжения не поврежденного изолятора, сравнении характеристик ЧР для гирлянд, в том числе содержащих поврежденный изолятор с учетом динамики изменения ЧР, возникающие при постоянном и переменном приложенном напряжении. Расчетная модель пробоя была разработана для гирлянды из двух изоляторов, один из которых дефектный в сравнении с аналогичными характеристиками для гирлянды из двух не поврежденных изоляторов и поврежденного изолятора. При этом предполагалось, что емкость, обуславливающая поверхностные ЧР для поврежденного и неповрежденного изолятора одинаковая, а емкость, обуславливающая внутренние ЧР, разная. Заряд ЧР был определен по формуле:

$$q = CU = (N_1 C_{нов} + N_2 C_{\partial})U, \quad (2)$$

где U – приложенное напряжение, $C_{нов}, C_{\partial}$ – емкости поверхностных и внутренних дефектов соответственно, N_1, N_2 – количество поверхностных и внутренних ЧР положительной полярности.

Преобразовав (2), можно получить систему уравнений для каждого изолятора в гирлянде:

$$\begin{cases} \frac{q_1}{N_1} = (C_{нов} + k_1(U_1)C_{\partial 1})U_1 \\ \frac{q_2}{N_2} = (C_{нов} + k_2(U_2)C_{\partial 2})U_2 \end{cases}, \quad (3)$$

где k_1 – относительное количество внутренних ЧР положительной полярности для дефектного изолятора, k_2 – относительное количество внутренних ЧР положительной полярности для работоспособного изолятора, определенные при соответствующих значениях приложенного напряжения.

Выразим емкости дефектов:

$$\begin{cases} C_{\partial 1} = \frac{\frac{q_1}{N_1 U_1} - C_{нов}}{k_1(U_1)} \\ C_{\partial 2} = \frac{\frac{q_2}{N_2 U_2} - C_{нов}}{k_2(U_2)} \end{cases} . \quad (4)$$

Далее полагаем, что $k_1(U_{1np}) = k_2(U_{2np})$, $N_1 = N_2$, а через каждый изолятор будет протекать один и тот же ток, обусловленный в основном внутренними дефектами, при этом полагаем $C_{нов} \approx 0$. Тогда будет выполняться соотношение:

$$C_{\partial 1} U_{1np} = C_{\partial 2} U_{2np}, \quad (5)$$

где U_{1np} — пробивное напряжение первого изолятора, U_{2np} — пробивное напряжение второго изолятора.

Соотношение (5) говорит о том, что при условиях внутреннего пробоя, сквозной ток через изоляторы будут одинаковыми при определенных значениях приложенного напряжения. В этом случае из (4), пренебрегая $C_{нов}$, после преобразований с учетом (5) получим:

$$U_2 = \frac{U_{2np}}{U_{1np}} \frac{k_1(U_1)}{k_2(U_2)} U_1. \quad (6)$$

Далее рассмотрим гирлянду из двух изоляторов.

Для гирлянды с одним дефектным изолятором будет выполняться соотношение (6), а при каждом шаге увеличения приложенного напряжения, выше пробивного для первого изолятора, k_1 и k_2 будут отличаться от предыдущих значений, тогда можем записать:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{2np}}{U_{1np}} \frac{k_1(U_1)}{k_2(U_2)}. \quad (7)$$

Далее экспериментально были определены величины $k_1 = k_1(U_{1np})$ для дефектного изолятора, $k_2 = k_2(U_{1np})$ для гирлянды из двух бездефектных изоляторов и $k_3 = k_3(U_{1np})$ для гирлянды их двух изоляторов, один из которых дефектный. Из (7) видно, что $k_1 = k_2(U_{2np})$, $k_1 = k_3(U_{3np})$.

$$\text{Пусть } \frac{U_3^n}{U_{1np}} = \frac{U_{3np}}{U_{1np}} \frac{k_1}{k_3(U_3^n)}, \quad k_3(U_3^n) = k_3(U_3^{n-1}) \left(\frac{k_3}{k_2} \right), \quad n = 2, 4, 8, \dots$$

Тогда с учетом пробивного напряжения дефектного изолятора 15 кВ пробивное напряжение бездефектного изолятора равно 660 кВ. Далее показано более подробно, как были получены и уточнены эти результаты.

Результаты (Results)

ЧР от системы поверхность-игла на которую подавалось как переменное так и постоянное напряжение в диапазоне от 5 до 20 кВ как при переменном, так и при постоянном приложенном напряжении ЧР, регистрируемые датчиком R-400, практически не отличаются, независимо от величины приложенного напряжения. В том числе удалось обнаружить ЧР, характерные для перехода к предпробойной ситуации, после возникновения которых при дальнейшем увеличении приложенного напряжения формировались паттерны из большого количества ЧР небольшой амплитуды той же полярности, что и приложенное напряжение. Был сделан вывод, что перед формированием таких паттернов резко нарастает ток, обусловленный встречным движением зарядов. При постоянном приложенном напряжении в основном наблюдались ЧР с провалом приложенного напряжения, но при увеличении приложенного напряжения появлялись редкие ЧР положительной полярности.

При переменном приложенном напряжении на положительной полуволне наблюдались в основном провалы приложенного напряжения, причем относительно большие по сравнению с предпробойным паттерном на отрицательной полуволне

приложенного напряжения. Неожиданным оказалось то, что увеличение переменного приложенного напряжения на отрицательной полуволне приводило к перераспределению ЧР от максимальных к ЧР относительно небольшой амплитуды. Паттерны существенно зависят от диаметра иглы. Например, для иглы 0,5 мм, на положительной полуволне регистрировались биполярные ЧР величиной до 15 нКл (рис. 2).

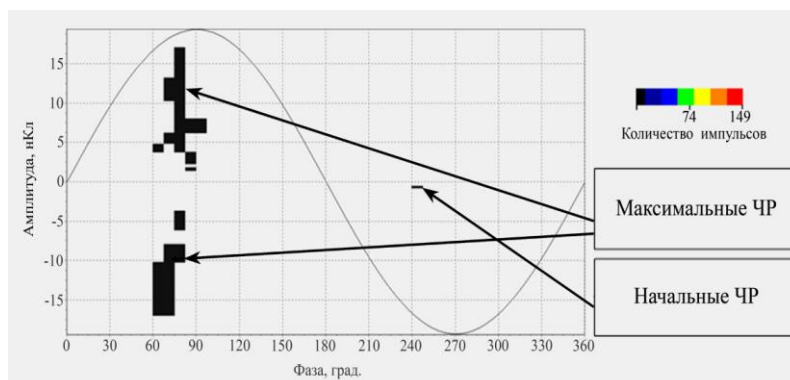


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигналов короны в нКл от фазы действующего напряжения в градусах, полученные с помощью системы поверхность-игла (диаметр иглы 0,5 мм), напряжение 14 кВ. На вставке показана цветовая шкала количества импульсов

Fig. 2. Dependence of the corona signal amplitude in nCl on the phase of the effective voltage in degrees, obtained with the surface-needle system (needle diameter 0.5 mm), voltage 14 kV. The inset shows the color scale of the number of pulses

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для моделирования характеристик ЧР, обусловленных внутренними дефектами, была выбрана игла диаметром 20 мкм, распределение ЧР в такой системе соответствует резко неоднородным полям (рис. 3). Такая же особенность была обнаружена для фарфоровых изоляторов и их гирлянд, причем, наиболее яркая для дефектного изолятора.

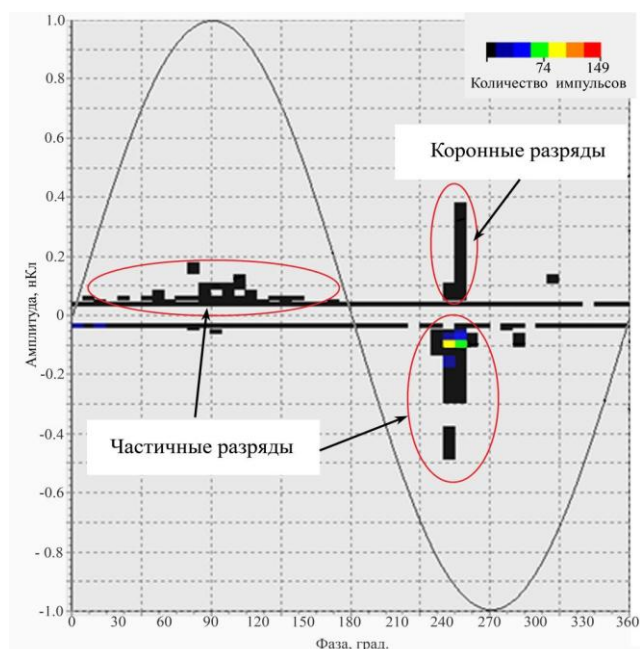


Рис. 3. Частичные разряды в системе поверхность-игла с диаметром иглы 20 мкм. Цветом прямоугольников показано количество импульсов в предпробойной ситуации при напряжении 18 кВ

Fig. 3. Partial discharges in the surface-needle system with a needle diameter of 20 μm. The color of rectangles shows the number of pulses in the pre-failure situation at 18 kV

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Распределения ЧР для фарфоровых изоляторов показаны на рисунках 4, 5 и 6.

С увеличением приложенного напряжения, число относительно больших ЧР росло, но не так быстро, как число относительно небольших ЧР, возникновение которых было объяснено внутренними дефектами. Для дефектного изолятора токи ЧР обусловлены ЧР величиной 35 пКл, 45 пКл, 57 пКл, 262 пКл, 330 пКл и 430 пКл.

Для фарфоровых изоляторов в отличие от системы поверхность-игла, биполярная корона периодически наблюдается практически на всех фазах приложенного напряжения при его увеличении от 15 кВ, при этом ток утечки равен 0,4 мА. Максимальные ЧР при этом наблюдались очень редко, причем до величины 1 нКл. Пробивное напряжение дефектного изолятора 15 кВ. ЧР для этого изолятора регистрировались при 12,5 кВ.

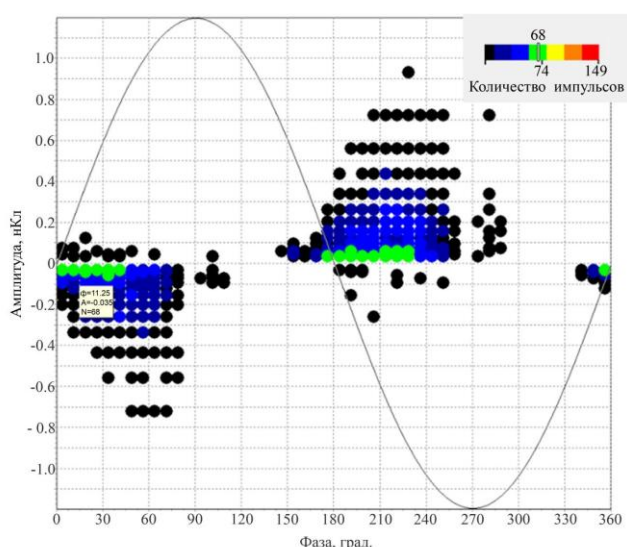


Рис. 4. Частичные разряды в системе гирлянда, состоящей из двух изоляторов, находящихся в нормальном состоянии. Приложено переменное напряжение 10 кВ

Fig. 4. Partial discharges in a daisy chain system consisting of two insulators under normal condition. An alternating voltage of 10 kV is applied

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

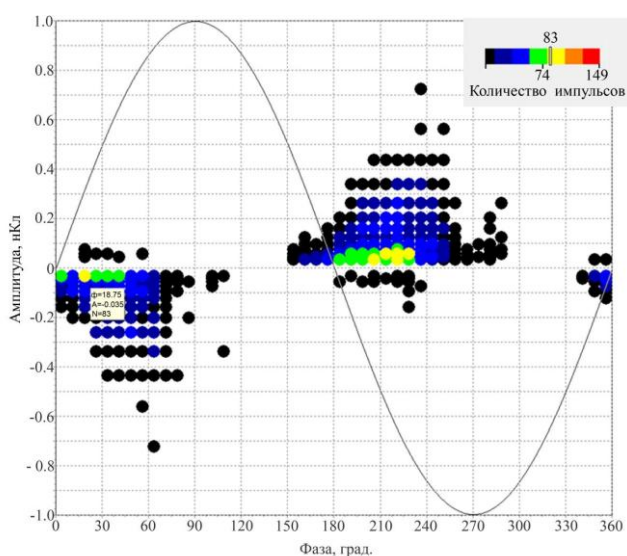


Рис. 5. Частичные разряды в системе гирлянда, состоящей из двух изоляторов, один из которых дефектный. Приложено переменное напряжение 10 кВ

Fig. 5. Partial discharges in a daisy chain system consisting of two insulators, one of which is defective. An alternating voltage of 10 kV is applied

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

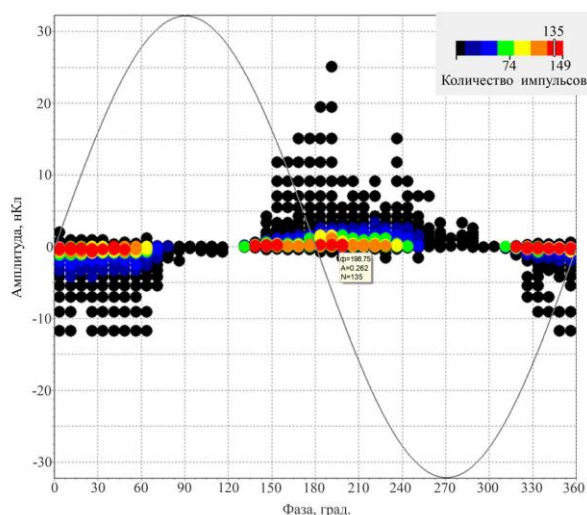


Рис. 6. Частичные разряды. К исправному изолятору приложено переменное напряжение 30 кВ

Fig. 6. Partial discharges. An AC voltage of 30 kV is applied to a serviceable insulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Такие распределения для фарфоровых изоляторов и их отличия для системы поверхность-игла объясняется тем, что при относительно небольших величинах приложенного напряжения, с помощью прибора удается наблюдать ЧР, распространяющиеся со стороны стержня к шапке и в противоположном направлении. Если изолятор исправен, по мере увеличения напряжения происходит пробой за счет развития поверхностных ЧР, пробивное напряжение при этом в десятки раз превышает номинальное. Если изолятор имеет внутренние дефекты, пробой происходит изнутри при существенно меньшей величине действующего напряжения. Поверхностные ЧР наблюдаются на фоне коронных разрядов. Корона, как правило, возникает на пиках действующего напряжения. Для исправного изолятора при 30 кВ наблюдаются начальные ЧР в широком диапазоне фазы приложенного напряжения (рис 6), при этом ток утечки возрастает до 1 мА.

В таблице 1 приводятся характеристики ЧР, полученные с помощью R-400.

Таблица 1

Table 1

Основные характеристики ЧР

Main characteristics of PD

Объект исследования и величина приложенного переменного напряжения	Величина ЧР, пКл	Число ЧР	Соответствующие дефектам ЧР	Всего ЧР	Величина k
Один дефектный изолятор, 12,5кВ	35	375	1160	1645	0,705167173
	45	325			
	57	460			
	262	200			
	330	135			
	430	150			
Два бездефектных изолятора, 25кВ	35	90	305	1010	0,301980198
	45	85			
	57	130			
	262	240			
	330	230			
	430	235			
Два изолятора в гирлянде, один дефектный, 25кВ	35	115	388	1103	0,351767906
	45	118			
	57	155			
	262	235			
	330	215			
	430	265			

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для бездефектного изолятора ток утечки не более 0,2 мА при величине приложенного напряжения 6 кВ. Для гирлянды с одним дефектным изолятором ток утечки при переменном приложенном напряжении 15 кВ 0,4 мА, что уже больше допустимого в условиях эксплуатации. Можно сделать вывод, что ток утечки связан с внутренними ЧР. Следовательно, разработанная методика и модель справедлива для гирлянд фарфоровых изоляторов.

Обсуждение (Discussions)

При значении пробивного напряжения для дефектного изолятора 12,5 кВ была определена величина $k_1 = 0,705$. При величине приложенного напряжения 25 кВ были определены $k_2 = 0,302$ и $k_3 = 0,352$. С учетом того, что пробивное напряжение дефектного изолятора 15 кВ согласно разработанной методике были оценены значения пробивного напряжения гирлянды с дефектным изолятором 660 кВ, что хорошо согласуется с соотношением омических сопротивлений дефектного и бездефектного изоляторов (50 МОм и 3,5 ГОм), которые определяются при постоянном приложенном напряжении с помощью мегаомметра. Разница в оценке связана с тем, что при переменном напряжении более интенсивное встречное движение зарядов разного знака и, как следствие, более интенсивная ионизация окружающего воздуха. Также можно сделать вывод, что максимальные ЧР не определяют степень разрушения внутри изолятора.

Заключение (Conclusions)

Разработана модель пробоя и методика оценки пробивного напряжения гирлянд фарфоровых изоляторов, содержащих дефектный изолятор, по характеристикам частичных разрядов. Полученные значения пробивного напряжения хорошо согласуются с теоретическими приблизительными оценками как по разработанной модели, так и по существующим методикам. Данная методика может быть применена для дистанционной оценки состояния фарфоровых изоляторов в условиях эксплуатации. В работе показано как по амплитудно-фазовым диаграммам распределения ЧР определить гирлянду с дефектным изолятором при номинальном приложенном напряжении. Полученная методика позволяет оценивать пробивное напряжение гирлянды изоляторов по относительным величинам, без калибровки по величине кажущегося заряда, что делает ее универсальной с точки зрения широты выбора способа и частотного диапазона регистрации ЧР.

Литература

1. Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С.151-163. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.
2. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 4. С. 123-133. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133>.
3. Галиева Т.Г., Иванов Д.А. Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. No 4. С. 165-177. [doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177).
4. Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. No 2. С. 117-127. [doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127).
5. Detection and Localization of Partial Discharge in Connectors of Air Power Lines by Means of Ultrasonic Measurements and Artificial Intelligence Models <https://www.researchgate.net/publication/347952901>
6. Schurch, R.; Munoz, O.; Ardila-Rey, J.; Donoso, P.; Peesapati, V. Identification of Electrical Tree Aging State in Epoxy Resin Using Partial Discharge Waveforms Compared to Traditional Analysis. *Polymers* **2023**, *15*, 2461. <https://doi.org/10.3390/polym15112461>
7. Florkowski, M.; Kuniewski, M. Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping. *Energies* **2023**, *16*, 5973. <https://doi.org/10.3390/en16165973>
8. Rodríguez-Serna, J.M.; Albarracín-Sánchez, R. A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach. *Polymers* **2021**, *13*, 324. <https://doi.org/10.3390/polym13030324>

9. Kyere, I.K.; Nyamupangedengu, C.; Swanson, A.G. A Comparative Study of Time-Evolution Characteristics of Single and Double Cavity Partial Discharges. *Energies* **2024**, *17*, 1905. <https://doi.org/10.3390/en17081905>
10. Zhang, X.; Pang, B.; Liu, Y.; Liu, S.; Xu, P.; Li, Y.; Liu, Y.; Qi, L.; Xie, Q. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies* **2021**, *14*, 7692. <https://doi.org/10.3390/en14227692>
11. Karami, H.; Azadifar, M.; Mostajabi, A.; Rubinstein, M.; Karami, H.; Gharehpetian, G.B.; Rachidi, F. Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers. *Sensors* **2020**, *20*, 1419. <https://doi.org/10.3390/s20051419><https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1419>
12. Sikorski, W.; Wielewski, A. Low-Cost Online Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers. *Sensors* **2023**, *23*, 3405. <https://doi.org/10.3390/s23073405>
13. Syasko, V.; Musikhin, A.; Gnivush, I. Improvement of Methods and Devices for Multi-Parameter High-Voltage Testing of Dielectric Coatings. *Coatings* **2024**, *14*, 427. <https://doi.org/10.3390/coatings14040427>
14. Barbieri, L.; Villa, A.; Malgesini, R.; Palladini, D.; Laurano, C. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization. *Energies* **2021**, *14*, 4095. <https://doi.org/10.3390/en14144095>
15. Lu, B.; Li, S.; Cui, Y.; Zhao, X.; Zhang, D.; Kang, Y.; Dong, H. Insulation Degradation Mechanism and Diagnosis Methods of Offshore Wind Power Cables: An Overview. *Energies* **2023**, *16*, 322. <https://doi.org/10.3390/en16010322>

Авторы публикации

Гатауллин Айрат Мухамедович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-6581-2400>. gataullin1969@gmail.com.

Гавриленко Андрей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Писковацкий Юрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Минкин Ахметгарей Султанович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Ivanov D.A. Features of monitoring extra large partial discharge in high voltage insulators. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(1):151-163. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.
2. Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Potapov A.A., Krotov V.I. Using contactless methods of diagnostics of high electric fields. Power engineering: research, equipment, technology. 2019;21(4):123-133. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133>.
3. Galieva T.G., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Andreev N.K., Khamidullin I.N. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(4):165-177. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177>.
4. Golenishchev-Kutuzov A.V., Akhmetvaleeva L.V., Enikeeva G.R., Ivanov D.A., Semennikov A.V., Mardanov G.D. Remote testing for defects in service high-voltage insulators. Power engineering: research, equipment, technology. 2020;22(2):117-127. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127>.
5. Detection and Localization of Partial Discharge in Connectors of Air Power Lines by Means of Ultrasonic Measurements and Artificial Intelligence Models <https://www.researchgate.net/publication/347952901>
6. Schurch, R.; Munoz, O.; Ardila-Rey, J.; Donoso, P.; Peesapati, V. Identification of Electrical Tree Aging State in Epoxy Resin Using Partial Discharge Waveforms Compared to Traditional

Analysis. *Polymers* **2023**, 15, 2461. <https://doi.org/10.3390/polym15112461>

7. Florkowski, M.; Kuniewski, M. Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping. *Energies* **2023**, 16, 5973. <https://doi.org/10.3390/en16165973>

8. Rodríguez-Serna, J.M.; Albarracín-Sánchez, R. A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach. *Polymers* **2021**, 13, 324. <https://doi.org/10.3390/polym13030324>

9. Kyere, I.K.; Nyamupangedengu, C.; Swanson, A.G. A Comparative Study of Time-Evolution Characteristics of Single and Double Cavity Partial Discharges. *Energies* **2024**, 17, 1905. <https://doi.org/10.3390/en17081905>

10. Zhang, X.; Pang, B.; Liu, Y.; Liu, S.; Xu, P.; Li, Y.; Liu, Y.; Qi, L.; Xie, Q. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies* **2021**, 14, 7692. <https://doi.org/10.3390/en14227692>

11. Karami, H.; Azadifar, M.; Mostajabi, A.; Rubinstein, M.; Karami, H.; Gharehpetian, G.B.; Rachidi, F. Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers. *Sensors* **2020**, 20, 1419. <https://doi.org/10.3390/s20051419> <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1419>

12. Sikorski, W.; Wielewski, A. Low-Cost Online Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers. *Sensors* **2023**, 23, 3405. <https://doi.org/10.3390/s23073405>

13. Syasko, V.; Musikhin, A.; Gnivush, I. Improvement of Methods and Devices for Multi-Parameter High-Voltage Testing of Dielectric Coatings. *Coatings* **2024**, 14, 427. <https://doi.org/10.3390/coatings14040427>

14. Barbieri, L.; Villa, A.; Malgesini, R.; Palladini, D.; Laurano, C. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization. *Energies* **2021**, 14, 4095. <https://doi.org/10.3390/en14144095>

15. Lu, B.; Li, S.; Cui, Y.; Zhao, X.; Zhang, D.; Kang, Y.; Dong, H. Insulation Degradation Mechanism and Diagnosis Methods of Offshore Wind Power Cables: An Overview. *Energies* **2023**, 16, 322. <https://doi.org/10.3390/en16010322>

Authors of the publication

Ayrat M. Gataullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-6581-2400>. gataullin1969@gmail.com.

Andrey N. Gavrilenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuri V. Piskovatskiy – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Akhmetgarey S. Minkin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено 25.05.2024 г.

Отредактировано 19.06.2024 г.

Принято 21.06.2024 г.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.31

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-31-43

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ИХ ИЗ СТРОЯ

Боярков Д.А., Компанеец Б.С.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия
dmitrij.bojarkov@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Современное техническое состояние электрических сетей на данный момент времени является в целом неудовлетворительным со средним уровнем физического износа около 60-70 %, поэтому разработка принципиально новых методов оценки их технического состояния на данный момент является актуальной задачей. Анализируемые в статье методики оценки технического состояния электрических сетей базируются в большей степени на субъективном и недостаточно точном методе экспертных оценок, который фактически не учитывает данные его технической диагностики, а также статистику дефектов и отказов. *ЦЕЛЬ.* Разработать методику оценки технического состояния электрических сетей, которая бы базировалась на вероятностных моделях, характеризующих физические процессы, происходящие в электрических сетях, а также данных их технической диагностики, статистики дефектов и отказов. *МЕТОДЫ.* Для оценки технического состояния электрических сетей использовался вероятностный метод оценки. При этом методика предполагает последовательное определение вероятностей проявления выделенных групп аварийных режимов, вероятность выхода из строя элемента сети в целом, а также вероятности выхода из строя объекта и группы объектов электросетевого хозяйства. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* По результатам исследований получены вероятностные модели выхода из строя электрических сетей, которые, в отличие от рассмотренных в статье методик оценки, базируются на данных технической диагностики и осмотров электрооборудования. Приведен пример реализации разработанной методики на реальных объектах электрических сетей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Разработанная методика позволяет более обоснованно производить расстановку приоритетов технических воздействий на электросетевое оборудование, что позволит заменять или производить ремонты того оборудования, которое реально исчерпало свой физический ресурс, что снизит частоту возникновения аварийных режимов и уменьшит ущербы от перерыва электроснабжения.

Ключевые слова: электрическая сеть; техническое состояние; вероятность выхода из строя; техническая диагностика; изоляция; токоведущие элементы; аварийный режим.

Для цитирования: Боярков Д.А., Компанеец Б.С. Методика оценки технического состояния электрических сетей на основе определения вероятности выхода их из строя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 31-43. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-31-43.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL NETWORKS BASED ON DETERMINING THE PROBABILITY OF THEIR FAILURE

Boyarkov D.A., Kompaneets B.S.

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia
dmitrij.bojarkov@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* The current technical condition of electrical networks at the moment is generally unsatisfactory with an average level of physical wear of about 60-70 %, therefore,

the development of fundamentally new methods for assessing their technical condition is currently an urgent task. The methods of assessing the technical condition of electrical networks analyzed in the article are based to a greater extent on the subjective and insufficiently accurate method of expert assessments, which actually does not take into account the data of its technical diagnostics, as well as statistics of defects and failures. **OBJECT.** To develop a methodology for assessing the technical condition of electrical networks, which would be based on probabilistic models characterizing the physical processes occurring in electrical networks, as well as data from their technical diagnostics, statistics of defects and failures. **METHODS.** To assess the technical condition of electrical networks, a probabilistic assessment method was used. In this case, the methodology involves sequential determination of the probabilities of occurrence of selected groups of emergency modes, the probability of failure of a network element as a whole, as well as the probability of failure of an object and a group of objects of the power grid. **RESULTS.** Based on the research results, probabilistic models of failure of electrical networks were obtained, which, unlike the assessment methods discussed in the article, are based on data from technical diagnostics and inspections of electrical equipment. An example of the implementation of the developed methodology on real electrical network objects is given. **CONCLUSION.** The developed methodology allows for a more reasonable prioritization of technical impacts on electrical grid equipment, which will make it possible to replace or repair equipment that has actually exhausted its physical resource, which will reduce the frequency of emergency conditions and reduce damage from power supply interruptions.

Keywords: electric network; technical condition; probability of failure; technical diagnostics; insulation; current-carrying elements; emergency mode.

For citation: Boyarkov D.A., Kompaneets B.S. Methodology for assessing the technical condition of electrical networks based on determining the probability of their failure. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 31-43. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-31-43.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Электросетевой комплекс России до проведения реформ, переводящих отрасль на рыночные механизмы хозяйствования (2002-2008 годы), отличался хорошей устойчивостью и прогнозируемым, достаточно высоким уровнем надежности. Разделение электроэнергетики на множество отдельных субъектов рынка привело к существенному уменьшению инвестиций в отрасль, что, в свою очередь, способствовало к стремительному устареванию электросетевого оборудования. Обновление электросетевой инфраструктуры стало осуществляться по остаточному принципу [1, 2]. В результате обычным явлением стали веерные отключения потребителей, а также в стране стали происходить крупные системные аварии, в том числе с человеческими жертвами [3, 4].

На данный момент времени в среднем около 60-70 % электрических сетей в России выработали свой физический и моральный ресурс [5]. Так, например, для крупнейшей электросетевой компании сибирского региона – ПАО «Россети Сибирь», износ электросетевого оборудования на конец 2023 года в разрезе его типов выглядит следующим образом [6]:

- Трансформаторное оборудование: 66 %;
- Коммутационные аппараты: 81 %;
- ВЛ-0,4-20 кВ: 80 %;
- ВЛ-35-220 кВ: 87 %;
- КЛ-0,4-20 кВ: 62 %;
- КЛ-35-110 кВ: 31 %.

Как видно из приведенной информации, в целом данная тенденция с износом электрооборудования для данной электросетевой компании сопоставима с общероссийской. Также отметим, что особенно остро стоит проблема с высоким износом электрических сетей в сельской местности [5, 6].

Для минимизации последствий действия сложившейся негативной ситуации в отрасли электросетевые организации должны постоянно контролировать надежность и своевременно проводить обновление элементов электрических сетей [7]. Однако обновить единовременно всё объективно нуждающееся в этом электрооборудование

невозможно вследствие ограниченности экономических ресурсов, формирующихся из тарифа на электроэнергию. Согласно стратегии развития электросетевого комплекса РФ до 2030 года, электроэнергетические организации, в условиях ограниченных финансовых ресурсов, для сокращения случаев аварийных отключений и минимизации их последствий должны идентифицировать электрооборудование, находящееся в наиболее неудовлетворительном состоянии [8, 9].

Для определения технического состояния электрических сетей ранее были разработаны специальные методики и автоматизированные системы, приведем некоторые из них. Рассмотрим отечественные разработки:

- Экспертная система оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» [10];
- Автоматизированная система принятия решений для оценки фактического состояния электрооборудования [11];
- Методология принятия решений при оценке технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей с учётом фактора риска повреждения [12];
- Система нечеткого вывода для оценки состояния изоляции кабельных линий [13];
- Автоматизированная система контроля технического состояния основного оборудования магистральных электрических сетей [14];
- Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6 (10) кВ [15];
- Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов [16].

Анализируя приведенные методики и системы, можно прийти к выводу, что в их основу положен в большей степени экспертный метод оценки. Такой подход к оценке технического состояния электрических сетей базируется на мнении экспертов в области эксплуатации электросетевых объектов о реальном состоянии оборудования [7]. Однако, согласно исследованию [17], при широком внедрении такой методики проводящий оценку персонал имеет различную квалификацию и опыт работы в отрасли, при этом итоговая оценка технического состояния электрических сетей, очевидно, будет очень субъективной и недостаточно точной. Соответственно, проводить приоритизацию, опираясь только на метод экспертных оценок при определении технического состояния электрических сетей, будет крайне проблематично.

Также существуют зарубежные методики и системы по оценке технического состояния электрических сетей [18-26]. Однако их внедрение в российскую практику оценки технического состояния электрических сетей будет не совсем корректно, поскольку зарубежные и отечественные правила и нормы эксплуатации, технической диагностики и испытаний электрооборудования значительно различаются [27]. Кроме того, применение зарубежных автоматизированных систем по оценке технического состояния электрических сетей в российских электросетевых компаниях в настоящий момент практически невозможно вследствие санкционных ограничений.

Главный контролирующий электроэнергетическую отрасль орган государственной власти в России – Министерство энергетики РФ, изъявила свою заинтересованность и поддержку данной тематике. В связи с этим, данное ведомство изучило ситуацию, сложившуюся в оценке технического состояния электросетевого оборудования и обозначила несколько обобщенных замечаний к существующим методикам и системам (так называемым системам управления производственными активами в электроэнергетике), которые можно рассматривать как руководство к дальнейшей научной деятельности [27]:

- отсутствует единая методология определения технического состояния отдельных видов оборудования и объектов электросетевого хозяйства в целом исходя из реальных данных об электрооборудовании и интенсивности его эксплуатации;
- отсутствует системная оценка состояния электрооборудования на основе данных его технической диагностики, статистики дефектов и отказов.

Таким образом, разработка принципиальной новой методики оценки технического состояния электрических сетей, которая бы удовлетворяла требованиям, предъявляемым к ней Минэнерго РФ, является актуальной научно-практической задачей.

На основании изложенного, можно заключить, что цель исследования заключается в разработке методики оценки технического состояния электрических сетей, которая бы базировалась на вероятностных моделях, характеризующих физические процессы, происходящие в электрических сетях, а также данных их технической диагностики, статистики дефектов и отказов.

Научная значимость исследования состоит в разработке принципиально новой методики оценки технического состояния электрических сетей, отличающаяся от существующих тем, что относительный ресурс электрооборудования представлен в виде изменения сопротивления изоляции и токоведущих частей, а также наличием поправочных коэффициентов A , отражающих статистику дефектов и параметров потока отказов для каждого вида электрооборудования.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанная методика оценки технического состояния электрических сетей позволяет электросетевым компаниям наиболее оптимально с технико-экономической точки зрения производить технические воздействия на электрические сети.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для наиболее объективной оценки технического состояния электросетевого оборудования необходимо четко представлять и уметь математически описывать физические процессы, которые происходят в электроустановках при протекании в них электрического тока. Применяя «жесткий» детерминистический подход можно составить некоторую обобщенную математическую модель, которая будет представлять из себя достаточно громоздкие и сложно разрешаемые дифференциальные уравнения. Однако в реальных условиях эксплуатации электрических сетей данный метод практически никак не учитывает различного рода неопределенности [28]. Это связано с объективной невозможностью учесть все факторы, которые влияют на реальное техническое состояние электроустановки, например, постоянно меняющиеся условия среды эксплуатации. В связи с этим, для упрощения расчетов и учета неопределенности исходной информации, целесообразно перейти от детерминированной к вероятностной модели технического состояния электрических сетей. В качестве математического описания такой модели предлагается использовать вероятность выхода из строя электросетевого оборудования [29].

Возникновение аварийных режимов в электрических сетях может происходить по самым разным причинам, поэтому обобщенно функцию вероятности выхода из строя можно представить в следующем виде [30]:

$$P = f(S, M, P, B, I \dots), \quad (1)$$

где S – воздействие неблагоприятных условий внешней среды (атмосферные перенапряжения, осадки, гололед, сильный ветер, резкие перепады температур); M – механические повреждения (взаимодействие с птицами и животными, наезд транспортных средств, повреждения силового кабеля при проведении земельных работ и т. д.); P – ошибочные действия либо халатное бездействие персонала, обслуживающего электрические сети; B – заводские дефекты и брак электрооборудования; I – старение и износ электрооборудования.

А также другие факторы, влияние которых на электрические сети не столь велико, но они имеют место быть.

Как известно, электросетевые организации с целью идентификации технического состояния электрооборудования обязаны производить контрольные аппаратные измерения некоторых показателей, характерных для рассматриваемого вида электроустановок (согласно Правилам устройства электроустановок). Данные измеряемые параметры определяются периодически и как раз учитывают все факторы, действующие на электроустановку, в том числе с помощью этих параметров можно определить качество производимого технического обслуживания электроустановки в период между регламентируемыми измерениями (действие человеческого фактора), скорость действия негативных факторов окружающей среды на электрооборудование и т. д. [31] Так, например, для изоляции электроустановки таким параметром является сопротивление изоляции $R_{из}$, а для токоведущих частей – сопротивление контактного соединения постоянному току $R_{конт}$. В связи с этим, построение математических моделей вероятностей выхода из строя электрических сетей будет производиться на основе именно этих измеряемых величин, что, в свою очередь, не потребует дополнительных затрат на создание новых подходов к технической диагностике электросетевого оборудования, что является экономически выгодным [32].

Кроме того, внешние механические повреждения, возникающие в процессе эксплуатации электроустановки и приводящие к ее постепенному выходу из строя, объединяет группу причин, не снижающих изоляционные и токоведущие свойства электроустановок в данный момент времени, но способных привести к более ускоренному ухудшению данных характеристик, и поэтому требующие отдельного внимания [32]. Данные дефекты также накапливаются со временем и приводят к выходу

электроустановки из строя.

Учитывая вышеизложенное, для целей данной методики выделяются три укрупненных группы аварийных режимов электросетевого оборудования (рис. 1).



Рис. 1. Укрупненные группы аварийных режимов в электрических сетях с характерными причинами отказов

Fig. 1. Enlarged groups of emergency modes in electrical networks with typical causes of failures

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Рассматриваемая методика была разработана для основного электросетевого оборудования, выход из строя которого непосредственно приводит к перерыву электроснабжения потребителей, а именно: силовые трансформаторы, силовые выключатели (вакуумные, масляные, воздушные), разъединители, отделители и короткозамыкатели, а также воздушные и кабельные линии электропередачи. В качестве примера проведем оценку технического состояния для разъединителей. Для этих целей были разработаны математические модели вероятностей выхода из строя вследствие разрыва токоведущих элементов, пробоя изоляции, а также вследствие механических повреждений.

Вероятность разрыва токоведущих частей определяется по формуле:

$$P_{\text{конт}} = \frac{1}{\frac{R_{\text{конт.изм.}}}{R_{\text{конт.норм}}} \sqrt{e^{A_{\text{конт}}}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{конт.изм.}}$ – измеренное значение сопротивления контакта постоянному току;

$R_{\text{конт.норм}}$ – нормируемое (максимально допустимое) технической документацией значение сопротивления контакта постоянному току;

$$A_{\text{конт}} = \ln \left(\frac{1}{1 - \Omega_{\text{конт}}} \right) \cdot \frac{R_{\text{конт.изм.}}}{R_{\text{конт.норм}}} = 2,9414 - \text{поправочный коэффициент, учитывающий}$$

статистическую информацию по выходу из строя разъединителей вследствие разрыва токоведущих элементов;

$\Omega_{\text{конт.}} = \omega_{\text{раз}} \cdot \alpha_{\text{конт.раз}}$ – параметр потока отказов вследствие разрыва токоведущих элементов разъединителя;

$\omega_{\text{раз}} = 0,01$ – параметр потока отказов разъединителя (справочная величина)¹;

$\alpha_{\text{конт.раз}} = 0,4286$ – доля разъединителей, вышедших из строя вследствие разрыва токоведущих элементов.

Отметим, что значение $\alpha_{\text{конт.раз}}$ было получено в результате обработки статистической информации по вышедшим из строя более чем 3500 разъединителям (самых разнообразных марок и технических характеристик) за последние 5 лет в одной

¹ Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками. – Москва: СПО Союзтехэнерго, 1985. – 18 с.

из крупнейших электросетевых компаний страны – ПАО «Россети Сибирь».

Вероятность пробоя изоляции:

$$P_{из} = 1 - \frac{1}{\frac{R_{из.изм}}{R_{из.норм}} \sqrt{e^{A_{из}}}}, \quad (3)$$

где $R_{из.изм}$ – измеренное значение сопротивления изоляции;

$R_{из.норм}$ – нормируемое (максимально допустимое) технической документацией значение сопротивления изоляции;

$$A_{из} = \ln\left(\frac{1}{1-\Omega_{из}}\right) \cdot \frac{R_{из.изм}}{R_{из.норм}} = 0,04846 - \text{поправочный коэффициент, учитывающий}$$

статистику дефектов разъединителя при пробое изоляции;

$\Omega_{из} = \omega_{раз} \cdot \alpha_{из.раз}$ – параметр потока отказов вследствие пробоя изоляции разъединителя;

$\omega_{раз} = 0,01$ – параметр потока отказов разъединителя (справочная величина);

$\alpha_{из.раз} = 0,3853$ – доля разъединителей, вышедших из строя вследствие пробоя изоляции.

Данный параметр получен аналогично параметру $\alpha_{конт.раз}$.

Далее рассмотрим механизм определения вероятности выхода из строя вследствие механических повреждений, к которым относятся трещины, сколы, вмятины, выкрашивания, оплавления и т.д. Данный вид повреждений (его объем и глубина) хоть и косвенно, но указывает на то или иное состояние электрооборудования, что, в конечном счете, может привести к аварии. Вероятностные модели выхода из строя в данном случае будет невозможно формализовать в виде какой-либо измеряемой физической величины (сопротивления, тока, напряжения и т. д.), поэтому в данном случае будет уместно их оценить и формализовать с помощью метода экспертных оценок [28, 29].

В условиях эксплуатации электрических сетей нашей страны в качестве экспертов чаще всего выступает эксплуатационный персонал, который может иметь самое различное образование, опыт работы и квалификацию. Поэтому он может оценивать техническое состояние электросетевого оборудования не объективно и даже противоречиво. Для ухода от данной ситуации, оценку внешне идентифицируемых повреждений целесообразно проводить по «жесткой» шкале экспертных оценок, когда сотрудник из числа эксплуатационного персонала четко сличает то или иное повреждение с разработанным описанием дефекта и проставляет соответствующую увиденному балльную оценку [29]. Заметим, что в условиях цифровизации электросетевого комплекса будет очень полезно выполнять фотофиксацию оцененного оборудования в целях дальнейшей выборочной проверки качества оценки и возможности ретроспективного анализа внешнего состояния оборудования.

Разработанная экспертная шкала имеет градацию от «1» до «10», где под «1» понимается наихудшее внешнее состояние оборудования, а под «10» понимается наилучшее внешнее состояние оборудования. Кроме того, данная экспертная шкала имеет и качественную оценку состояния:

– «Хорошее» (от 7 до 10 баллов): состояние оборудования практически не представляет угрозу выхода его из строя (в нормальных условиях эксплуатации);

– «Удовлетворительное» (от 3 до 6 баллов): состояние оборудования уже представляет определенный риск выхода его из строя;

– «Неудовлетворительное состояние» (от 1 до 2 баллов): состояние, которое вызывает наибольшее опасение выхода его из строя, поэтому для него необходимо производить определенные управляющие технические воздействия (вывод из эксплуатации и замена на новое, ремонт, техническое перевооружение и реконструкция и т. д.).

Для разъединителя механические повреждения можно разбить на две системных составляющие: наличие внешних дефектов конструкции, а также наличие дефектов работы механизмов (ножей). Вероятность выхода из строя разъединителя при наличии внешних дефектов определится следующим образом:

$$P_{деф} = \frac{\sqrt[10]{10,3 - \sqrt[10]{B_{деф}}}}{\sqrt[10]{10,3}}, \quad (4)$$

где $B_{деф}$ – экспертная оценка разъединителя на наличие внешних дефектов по шкале от 1 до 10 баллов.

При этом сама экспертная шкала оценок приведена в таблице 1.

Таблица 1
Table 1Экспертная шкала оценки внешних дефектов разъединителя
Expert scale for evaluation of external defects of disconnecter

Качественная шкала оценки элемента электрической сети	Качественное описание оценки элемента электрической сети
10 «хорошее»	1) Крепление разъединителя плотное и надежное, без изменения его положения от исходного; 2) Поверхность изоляторов чистая и ровная, не имеет дефектов (сколы, трещины); 3) В местах соединения токоведущих элементов отсутствуют следы коррозии, деформации, подвижность; 4) Прочие элементы не имеют видимых дефектов: сколов, трещин, деформаций, следов коррозии.
6 «удовлетворительное»	1) Крепление разъединителя плотное, возможно незначительное изменение положения от исходного в следствии механической нагрузки; 2) Поверхность изоляторов имеет незначительные сколы, трещины, изменение окраски части поверхности (хотя бы один признак); 3) В местах соединения токоведущих элементов наблюдаются следы коррозии, но отсутствуют другие дефекты; 4) Прочие элементы имеют незначительные сколы, трещины, деформации, следы коррозии (хотя бы один признак).
2 «неудовлетворительное»	1) Крепление разъединителя слабое, корпус подвижен; 2) Поверхность изоляторов имеет значительные сколы, трещины, наблюдаются следы действия электрической дуги (хотя бы один признак); 3) В местах соединения токоведущих элементов наблюдаются почернения, существенные деформации, в соединениях имеется подвижность (хотя бы один признак); 4) Прочие элементы имеют значительные сколы, трещины, деформации, следы коррозии (хотя бы один признак).

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вероятность выхода из строя ножей разъединителя определится по формуле:

$$P_{\text{нож}} = \frac{\sqrt[10]{10,3} - \sqrt[10]{B_{\text{нож}}}}{\sqrt[10]{10,3}}, \quad (5)$$

где $B_{\text{нож}}$ – экспертная оценка разъединителя на наличие дефектов ножей по шкале от 1 до 10 баллов.

Экспертная шкала оценок приведена в таблице 2.

Поскольку разъединитель выйдет из строя при предельном проявлении хотя бы одного из механических дефектов, то общая вероятность аварии определится по формуле:

$$P_{\text{мех}} = A_{\text{мех}} \cdot [1 - (1 - (1 - P_{\text{деф}}) \cdot (1 - P_{\text{нож}}))], \quad (6)$$

где $A_{\text{мех}} = 0,1861$ – поправочный коэффициент, учитывающий статистику дефектов разъединителя при возникновении механических повреждений.Таблица 2
Table 2Экспертная шкала оценки дефектов ножей разъединителя
Expert scale for evaluation of disconnecter blades defects

Качественная шкала оценки элемента электрической сети	Качественное описание оценки элемента электрической сети
10 «хорошее»	1) Во всех испытаниях амплитуда движения контактов одинаковая; 2) Соприкосновение поверхностей контактов полное и плотное; 3) Все элементы обладают чистой и ровной поверхностью без дефектов, деформаций и изменения цвета; 4) Нож движется полностью параллельно зажимам.
6 «удовлетворительное»	1) В одном или двух испытаниях движение контактов неполное; 2) Соприкосновение поверхностей контактов стало менее полным, сила прижатия элементов снизилась; 3) На поверхности ножа наблюдаются незначительные неровности, нож незначительно искривлен, возможно изменение цвета контакта (хотя бы один признак); 4) Нож движется незначительно непараллельно зажимам.
2	1) В трех и более испытаниях движение контактов неполное;

«неудовлетворительное»	2) Хотя бы в одном испытании контакты не сжались или всегда имеют очень малую поверхность соприкосновения и силу сжатия; 3) На поверхности наблюдаются существенные неровности, присутствуют раковины от электрической дуги и/или трещины, следы плавления, поверхность ножа сильно искривлена (хотя бы один признак); 4) Нож движется значительно непараллельно зажимам.
------------------------	---

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вероятность выхода из строя разъединителя в целом определяется на основании теории надежности технических систем как для элементов электрической цепи, соединенных последовательно:

$$P_{раз} = 1 - (1 - P_{из}) \cdot (1 - P_{конт}) \cdot (1 - P_{мех}). \tag{7}$$

По получившемуся значению вероятности выхода из строя достаточно сложно определить реальное техническое состояние электроустановки. Поэтому важно знать соотношение величины вероятности, получившейся в результате расчетов, и качественного состояния элемента, по которому уже можно делать вывод о степени его изношенности. Для разъединителя такое соотношение было получено и приведено в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Соотношение величины вероятности выхода из строя и качественной шкалы состояния разъединителя

Ratio of the probability of failure and failure and the qualitative scale of the disconnector state

хорошо	удовлетворительно	неудовлетворительно
менее 0,012	от 0,012 до 0,072	0,072 и более

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Аналогично элементу электрической сети, определяется вероятность выхода из строя объекта электросетевого хозяйства. Под объектом электросетевого хозяйства понимается совокупность оборудования, находящегося на подстанции, и соединенного друг с другом по определенным правилам электротехники, либо линии электропередачи (кабельные и/или воздушные), отходящие от подстанции, и пролегающие непосредственно до потребителя. Говоря об оборудовании подстанций следует заметить, что оно может соединяться между собой по самым разнообразным и порой очень сложным схемам. В качестве наглядного примера рассмотрим одну из простейших схем соединения элементов на подстанции (рис. 2).

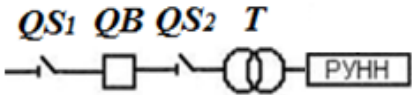


Рис. 2. Схема электрических соединений объекта электросетевого хозяйства

Fig. 2. Electrical connection diagram of power grid facility

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для такого объекта электросетевого хозяйства вероятность выхода из строя определится следующим образом:

$$P = 1 - [1 - P_{QS1}] \cdot [1 - P_{QB}] \cdot [1 - P_{QS2}] \cdot [1 - P_T]. \tag{8}$$

Обсуждение (Discussions)

В качестве примера реализации разработанной методики рассмотрим два объекта электросетевого хозяйства, расположенных в селе Кулунда Алтайского края: это оборудование двух подстанций КТП-18 и КТП-497, и отходящих от них воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ. Определим для каждого элемента сети значения вероятностей выхода из строя (табл. 4).

Проанализировав полученные показатели вероятностей выхода из строя можно заключить, что приоритет технических воздействий необходимо отдать тому электрооборудованию, которое имеет наибольшие значения вероятностей выхода из строя. Из силовых трансформаторов для технического воздействия необходимо выбрать трансформатор КТП-18, из разъединителей – разъединитель № 1 КТП-18, из линий электропередачи – ВЛ-0,4 кВ от КТП-18, для объекта электросетевого хозяйства – КТП-18 в целом, а для группы объектов электросетевого хозяйства – КТП-18 – ВЛ-0,4 кВ.

Пример реализации разработанной методики оценки вероятностей выхода из строя электрических сетей

Example of implementation of the developed methodology for assessing the probability of failure of electrical networks

Элемент сети	Исходные данные			P (расчетная величина)	Приоритет воздействия
	$R_{из}$, МОм	$R_{конт}$, мкОм	$B_{мех}$		
Трансформатор КТП-18	779	2,212	«5»	0,01298	✓
Трансформатор КТП-497	2930	3,872	«8»	0,00369	
Разъединитель № 1 КТП-18	4400	120	«6»	0,02631	✓
Разъединитель № 2 КТП-18	4350	115	«5»	0,02413	
Разъединитель № 1 КТП-497	13600	107	«8»	0,01225	
Разъединитель № 2 КТП-497	12700	112	«7»	0,0148	
ВЛ-0,4 кВ от КТП-18	–	–	«5»	0,3927	✓
ВЛ-0,4 кВ от КТП-497	–	–	«7»	0,1587	
КТП-18	–	–	–	0,06215	✓
КТП-497	–	–	–	0,0305	
КТП-18 – ВЛ-0,4 кВ	–	–	–	0,4305	✓
КТП-497 – ВЛ-0,4 кВ	–	–	–	0,1843	

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

По результатам исследований были разработаны вероятностные модели выхода из строя электрических сетей, которые характеризуют их определенное техническое состояние. Данные модели полностью учитывают замечания, предъявляемые к ним Министерством энергетики России, а именно вероятностные модели построены исходя из реальных данных об электрооборудовании и интенсивности его эксплуатации, а также оценка технического состояния производится на основе данных его технической диагностики, статистики дефектов и отказов. Данная концепция была реализована в приведенной работе при разделении возможных аварийных режимов электроустановок на пробой изоляции и разрыв токоведущих частей, диагностические параметры которых периодически аппаратно измеряются. Но, в тоже время, при получении вероятностных моделей выхода из строя вследствие механических повреждений, более целесообразно использовать метод экспертных оценок.

Таким образом, в данной статье показано, что с помощью разработанной методики возможно обоснованно производить расстановку приоритетов технических воздействий на электросетевое оборудование. Это позволит заменять или производить ремонты того оборудования, которое реально исчерпало свой физический ресурс, что снизит частоту возникновения аварийных режимов и уменьшит материальные ущербы как потребителям электроэнергии, так и электросетевым компаниям.

Литература

1. Яценко, А. В. Организация поставок электроэнергии и мощности: опыт и практика реформ отдельного региона / А. В. Яценко // Менеджмент и бизнес-администрирование. – 2021. – № 3. – С. 92-103.
2. Веселов, Ф. В. Условия развития электроэнергетики России в рамках жестких ценовых ограничений в среднесрочной перспективе / Ф. В. Веселов, А. И. Соляник // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 1(178). – С. 88-98.
3. Воропай, Н. И. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология / Н. И. Воропай, В. А. Стенников, Е. А. Барахтенко // Проблемы прогнозирования. – 2017. – № 5(164). – С. 39-49.
4. Яценко, А. В. Экономико-финансовая оценка целесообразности проведения мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций в электроэнергетике / А. В. Яценко, И. М. Казымов, Б. С. Компанеев // Финансовый бизнес. – 2022. – № 2(224). – С. 165-169.
5. Оценка уровня надежности функционирования филиалов ПАО Россети России / И. В. Наумов, С. В. Подъячих, М. Н. Полковская [и др.] // Надежность. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 38-51.
6. ПАО «Россети Сибирь»: официальный сайт компании [Электронный ресурс] // Годовой отчет за 2023 год : URL : <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (дата обращения 25.06.2024).

7. Боярков, Д. А. Алгоритм риск-ориентированного управления техническим состоянием электрических сетей / Д. А. Боярков, А. В. Яценко // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 56-60.
8. Голубев, П. В. Без обновления сети дальше существовать не могут / П. В. Голубев // Энергоэксперт. – 2011. – № 1 (24). – С. 12–16.
9. Грабчак, Е. П. Проблемы замены изношенного оборудования в электроэнергетике России: приоритеты модернизации в контексте обеспечения надежности и безопасности / Е. П. Грабчак, Е. Л. Логинов, Ю. А. Романова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 5. – С. 38-43.
10. Попов, Г. В. Экспертная система оценки состояния электрооборудования «Диагностика+» / Г. В. Попов, Е. Б. Игнатьев, Л. В. Виноградова, Ю. Ю. Рогожников, Д. А. Ворошина // Электрические станции. – 2011. – № 5. – С. 36-45.
11. Хальясмаа, А. И. Автоматизированная система принятия решений для оценки фактического состояния электрооборудования / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Сборник трудов V международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» – 2014». – 2014. – С. 187-193.
12. Майоров, А. В. Методология принятия решений при оценке технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей с учётом фактора риска повреждения / А. В. Майоров, Ю. Н. Львов // Электрические станции. – 2019. – №. 9. – С. 14-20.
13. Бирюлин, В. И. Применение системы нечеткого вывода для оценки состояния изоляции кабельных линий / В. И. Бирюлин, Д. В. Куделина, А. Н. Горлов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – №. 1 (49). – С. 191-203.
14. Смекалов В. В., Автоматизированная система контроля технического состояния основного оборудования магистральных электрических сетей / В. В. Смекалов, И. А. Назаров, А. С. Мерзляков, К. К. Романов // ЭНЕРГИЯ. – 2022. – №. 1. – С. 32-41.
15. Ившин И. В. Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6 (10) кВ / И. В. Ившин, А. Р. Галяутдинова, О. В. Владимиров, М. Ф. Низамиев, Е. Н. Карпов, Э. П. Мельник // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 24-35.
16. Левин В. М. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов / В. М. Левин, Н. П. Гужов, Н. А. Черненко, А. А. Яхья // Системы анализа и обработки данных. – 2020. – №. 2-3 (79). – С. 139-155.
17. Bao, Y. Impact of human error on electrical equipment preventive maintenance policy / Y. Bao, Y. Wang, G. Huang, J. Xia, J. Chen, C. Guo // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – IEEE, 2015. – P. 1-5.
18. Farzin, N. Transformer Practical Turn-to-Turn Fault Detection Performance using Negative Sequence and Space Vector-Based Methods / N. Farzin, M. Vakilian, E. Hajipour // Proceedings of the International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS). – 2019. – P. 1-6. doi: 10.1109/IPAPS.2019.8641951.
19. Dahiya, R. Review on Condition Monitoring and Maintenance of Electrical Equipment in Power Systems / R. Dahiya, A. Singh // A International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – Vol. 119, 105848.
20. Li, P. An Overview of Condition-Based Maintenance for Power Systems / P. Li, C. Wang, L. Jiang // Energies. – 2022. – Vol. 15(9). – P. 2430.
21. Da Silva, A. M. L. Integrated reliability evaluation of generation, transmission and distribution systems / A. M. L. Da Silva, A. M. Cassula, R. Billinton, L. A. F. Manso // IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, Issue 1, January 2002, P. 1-6.
22. Shpiganovich, A. N. Power-supply systems reliability control / A. N. Shpiganovich, V. I. Zatsepina, A. A. Shpiganovich, V. M. Stepanov // EAI Endorsed Transactions on Energy, Web Vol. 18, Issue 19, 2018, e10.
23. Emecheta S. N. Monitoring and Evaluation of The Reliability of Distribution Network with Distributed Generation / S. N. Emecheta, R. O. Nwajuonye, G. C. Okonkwo // Journal of Engineering Research and Reports. – 2021. – Vol. 12. – P. 29-42.
24. Rivas A. E. L. Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification / A. E. L. Rivas, T. Abrao // Electric Power Systems Research. – 2020. – P. 106602.
25. Leal A. Reliability provision in software defined power substations communication networks

/ A. Leal, M. Durán, J. F. Botero // Computer Networks. – 2020. – P. 107560.

26. Ghiasi M., Ghadimi N., Ahmadiania E. An analytical methodology for reliability assessment and failure analysis in distributed power system / M. Ghiasi, N. Ghadimi, E. Ahmadiania // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1. – P. 44.

27. Грабчак, Е. П. Оценка технического состояния энергетического оборудования в условиях цифровой экономики. // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – №4 (10). – С. 2-16.

28. Калинин, А. Ф. Модель прогнозирования риска безопасности и оценки остаточного ресурса элементов электроустановки / А. Ф. Калинин, Т. В. Еремина // Мичуринский агрономический вестник. – 2018. – № 1. – С. 73-79.

29. Хлебцов, А. П. Анализ состояния износа электрооборудования подстанций и методы диагностирования аварийных режимов / А. П. Хлебцов, Л. Х. Зайнутдинова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2019. – № 2(27). – С. 17-20.

30. Антоненко, И. Н. Риск-ориентированный подход к управлению производственными активами энергетики / И. Н. Антоненко // Энергоэксперт. – 2020. – № 1(73). – С. 26-33.

31. Сошников, А. А. Количественные показатели в технологиях безопасности / А. А. Сошников, Б. С. Компанеец // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – С. 119-123.

32. Kompaneets, B. S. Electric grids technical evaluation method based on their failure probability / B. S. Kompaneets, D. A. Boyarkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 31 октября – 01 2019 года. Vol. 791. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012030.

Авторы публикации

Боярков Дмитрий Андреевич – соискатель при кафедре «Электрификация производства и быта» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия. dmitrij.bojarkov@gmail.com.

Компанеец Борис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрификация производства и быта» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия.

References

1. Jashhenko AV. Organizacija postavok jelektroenergii i moshhnosti: opyt i praktika reform ot del'nogo regiona. *Menedzhment i biznes-administririvanie*. 2021; 3:92-103. (In Russ). doi: 10.33983/2075-1826-2021-3-92-103.

2. Veselov FV, Soljanik AI. Uslovia razvitiya jelektroenergetiki Rossii v ramkah zhestkih cenovyh ograničenij v srednesrochnoj perspective. *Problemy prognozirovaniya*. 2020; 1(178):88-98. (In Russ).

3. Voropaj NI, Stennikov VA, Barahtenko EA. Integrirovannye jenergeticheskie sistemy: vyzovy, tendencii, ideologija. *Problemy prognozirovaniya*. 2017; 5(164):39-49. (In Russ).

4. Jashhenko AV, Kazymov IM, Kompaneec BS. Jekonomiko-finansovaja ocenka celesoobraznosti provedeniya meroprijatij po predotvrashheniju avarijnyh situacij v jelektroenergetike. *Finansovyy biznes*. 2022; 2(224):165-159. (In Russ).

5. Naumov IV, Podjachih SV, Polkovskaja MN et al. Ocenka urovnja nadezhnosti funkcionirovaniya filialov PAO Rosseti Rossii. *Nadezhnost'*. 2024; 24(2):38-51. (In Russ).

6. PAO «Rosseti Sibir»: oficial'nyj sajt kompanii. *Godovoj otchet za 2023 god*. Available at: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/>. Accessed: 25 Jun 2024. (In Russ).

7. Bojarkov DA, Jashhenko AV. Algoritm risk-orientirovannogo upravlenija tehničeskimi sostojanijem jelektricheskij setej. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2022; 1:56-60. (In Russ). doi: 10.25728/avtprom.2022.01.12.

8. Golubev PV. Bez obnovlenija seti dal'she sushhestvovat' ne mogut. *Engergoexpert*. 2021; 1(24):12-16. (In Russ).

9. Grabchak EP, Loginov EL, Romanova JuA. Problemy zameny iznoshennogo oborudovaniya v jelektroenergetike Rossii: prioritety modernizacii v kontekste obespečenija nadezhnosti i bezopasnosti.

Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij. 2019; 5:38-43. (In Russ). dio: 10.36535/0869-4176-2019-05-5.

10. Popov GV, Ignat'ev EB, Vinogradova LV, et al. Jekspertnaja sistema ocenki sostojanija jelektroroborudovanija «Diagnostika+». *Jelektricheskie stancii*. 2011; 5:35-45. (In Russ).

11. Hal'jasmaa AI, Dmitriev SA, Kokin SE. Automated decision-making system to assess the actual condition of electrical equipment. *Sbornik trudov V mezhdunarodnaja molodjozhnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Jeletroenergetika glazami molodezhi"*. 2014. pp. 187-193. (In Russ.).

12. Majorov AV, L'vov JuN. Metodologija prinjatija reshenij pri ocenke tehničeskogo sostojanija silovyh transformatorov i avtotransformatorov jelektricheskijh setej s uchjotom faktora riska povrezhdenija. *Jelektricheskie stancii*. 2019; 9:14-20. (In Russ.).

13. Birjulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Primenenie sistemy nechetkogo vyvoda dlja ocenki sostojanija izoljacji kabel'nyh linij. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergetičeskogo universiteta*. 2021; 1(49):191-203. (In Russ.).

14. Smekalov VV, Nazarov IA, Merzljakov AS, Romanov KK, et al. Avtomatizirovannaja sistema kontrolja tehničeskogo sostojanija osnovnogo oborudovanija magistral'nyh jelektricheskijh setej. *JeNERGIJa*. 2022; 1:32-41. (In Russ.).

15. Ivshin IV, Galjautdinova AR, Vladimirov OV, et al. Intel'ektual'naja sistema ocenki tehničeskogo sostojanija transformatornoj podstancii 35/6 (10) kV. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022; 2:24-35. (In Russ.). dio: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35.

16. Levin VM, Guzhov NP, Chernenko NA, et al. Metodologija upravlenija remontami oborudovanija v jelektricheskijh setjah neftepromyslov. *Sistemy analiza i obrabotki dannyh*. 2020; 2-3(79):139-155. (In Russ.).

17. Bao Y, Wang Y, Huang G, et al. Impact of human error on electrical equipment preventive maintenance policy. In *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015. pp. 1-5.

18. Farzin N, Vakilian M, Hajipour E. Transformer practical turn-to-turn fault detection performance using negative sequence and space vector-based methods. In *2019 International Conference on Protection and Automation of Power System (IPAPS)*, 2019. pp. 1-6.

19. Dahiya R, Singh A. Review on Condition Monitoring and Maintenance of Electrical Equipment in Power Systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020; 119:105848.

20. Li P, Wang C, Jiang L. An Overview of Condition-Based Maintenance for Power Systems. *Energies*. 2022; 15(9):2430.

21. Da Silva A.ML, Cassula AM, Billinton R, Manso LAF. Integrated reliability evaluation of generation, transmission and distribution systems. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2002. pp. 1-6.

22. Shpiganovich AN, Zatsepina VI, Shpiganovich AA, et al. Power-supply systems reliability control. *EAI Endorsed Transactions on Energy*, 2018. p.18(e10).

23. Emecheta SN, Nwajuonye RO, Okonkwo GC. Monitoring and Evaluation of The Reliability of Distribution Network with Distributed Generation. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2021; 12:29-42.

24. Rivas AEL, Abrao T. Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification. *Electric Power Systems Research*. 2020; p. 106602.

25. Leal A, Durán M, Botero JF. Reliability provision in software defined power substations communication networks. *Computer Networks*. 2020; p. 107560.

26. Ghiasi M, Ghadimi N, Ahmadiania E. An analytical methodology for reliability assessment and failure analysis in distributed power system. *SN Applied Sciences*, 2019; 1:44.

27. Grabchak EP. Ocenka tehničeskogo sostojanija jenergetičeskogo oborudovanija v uslovijah cifrovoj jekonomiki. *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki*. 2017; 4(10):2-16.

28. Kalinin AF, Eremina TV. Model' prognozirovaniya riska bezopasnosti i ocenki ostatochnogo resursa jelementov jelektrorustanovki. *Michurinskij agronomičeskij vestnik*. 2018; 1:73-79. (In Russ).

29. Hlebcov AP, Zajnutdinova LH. Analiz sostojanija iznosa jelektroroborudovanija podstancij i metody diagnostirovanija avarijnyh rezhimov. *Jenergo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2019; 2(27):17-20. (In Russ).

30. Antonenko IN. Risk-orientirovannyj podhod k upravleniju proizvodstvennyimi aktivami jenergetiki. *Jenergojeksport*. 2020; 1(73):26-33. (In Russ).

31. Soshnikov AA, Kompaneets BS. Kolichestvennye pokazateli v tehnologijah bezopasnosti. *Polzunovskij vestnik*. 2014; 4:119-123. (In Russ).

32. Kompaneets BS, Boyarkov DA. Electric grids technical evaluation method based on their failure probability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 2020*. p. 012030. (In Russ).

Authors of the publication

Dmitrij A. Boyarkov – Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia. *dmitrij.bojarkov@gmail.com*.

Boris S. Kompaneets – Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **01.07.2024 г.**

Отредактировано **20.08.2024 г.**

Принято **16.09.2024 г.**



УДК 001.891.57:621.315.1:621.3.027.2:621.3.064.1 DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53

КОРРЕКТИРОВКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТОКА ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 кВ

Лансберг А.А., Виноградов А.В.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия
lansbergaa@vk.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в рассмотрении и корректировке результатов расчетов тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ, получаемых с использованием существующих физических, компьютерных и математических методов, которые дают разные результаты. ЦЕЛЬ. Разработка корректировочных коэффициентов для разных методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В ходе расчетов тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ с использованием разных методов были заданы общие исходные условия: питание осуществлялось от трансформатора ТМ-250 и с использованием провода А-35. РЕЗУЛЬТАТЫ. Выявлено, что погрешность между результатами, полученными с использованием разных методов, достигает 35,9%. В работе были предложены корректировочные коэффициенты со значениями от 0,93 до 1,47 относительных единиц с целью повышения достоверности расчетов. Данные коэффициенты позволили повысить достоверность рассмотренных методов определения тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ в 2,9-6,1 раза по сравнению с исходными значениями.

Ключевые слова: моделирование; физическая модель; математическая модель; компьютерная модель; однофазное короткое замыкание; трансформатор; линия электропередачи.

Для цитирования: Лансберг А.А., Виноградов А.В. Корректировка методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 44-53. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53.

CORRECTION OF METHODS FOR CALCULATING THE SINGLE-PHASE SHORT CIRCUIT CURRENT IN A RURAL 0.4 kV ELECTRIC GRID

Lansberg A.A., Vinogradov A.V.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
lansbergaa@vk.com

Abstract: The relevance of the study lies in the consideration and correction of the results of calculations of the single-phase short circuit current in a rural 0.4 kV electric network obtained using existing physical, computer and mathematical methods that give different results. Purpose. Development of correction coefficients for different methods of calculating the single-phase short circuit current in a rural 0.4 kV electrical network. Materials and research methods. During the calculations of the single-phase short circuit current in the 0.4 kV rural electric grid, using different methods, general initial conditions were set: power was supplied from a TM-250 transformer and using A-35 wire. Results. It was revealed that the error between the results obtained using different methods reaches 35.9%. In the work, correction coefficients with values from 0.93 to 1.47 relative units were proposed in order to increase the reliability of calculations. These coefficients made it possible to increase the reliability of the considered methods for determining the current of a single-phase short circuit in a rural 0.4 kV electrical network by 2.9-6.1 times compared with the initial values.

Keywords: modeling; physical model; mathematical model; computer model; single-phase short circuit; transformer; power line.

For citation: Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Correction of methods for calculating the single-phase short circuit current in a rural 0.4 kV electric grid. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 44-53. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53.

Введение (Introduction)

Большое количество работ как зарубежных, так и отечественных ученых направлено на моделирование электрических сетей, которое является одним из наиболее достоверных и относительно недорогих способов изучения процессов, происходящих в них. При этом в большинстве работ используются методы математического и компьютерного моделирования. В работе, на примере определения значений тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ, представлены результаты, полученные с применением компьютерных моделей и математических методов, выполнено их сравнение между собой и с результатами физического моделирования. Показано, что применение разных методов и моделей даёт разные результаты. Выбраны методы, наиболее близкие по результатам к физическому моделированию. Предложены корректировочные коэффициенты.

Литературный обзор (Literature Review)

Одним из наиболее популярных инструментов моделирования электрических сетей является MATLAB Simulink. С его применением производится большое количество моделей, позволяющих анализировать режимы работы сети, рассчитывать необходимые параметры. Например, в работе [1] в MATLAB Simulink рассмотрены режимы параллельной работы распределительной электрической сети напряжением 11 кВ и солнечной электростанции установленной мощностью 1126,5 кВА, подключенной через повышающий трансформатор 0,4/11 кВ, которая выдает в сеть токи до 167 А.

На примере модели синхронного генератора мощностью 37,3 кВт в MATLAB Simulink в работе [2] выявлено, что несимметрия и несинусоидальность в электрической сети приводит к снижению его КПД до 2-4%.

Безусловно, в основе любого инструмента компьютерного моделирования лежат методы математического моделирования. Исследователями используется большой набор методов математического моделирования для решения практических задач. Так, в работе [3] с использованием математического моделирования исследуется распределение потерь в городских сетях 6-10/0,4 кВ Таджикистана. Выявлено, что потери в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ, вызванные составляющей холостого хода, составляют 80% от общих, а короткого замыкания – 20%. В источнике [4] рассмотрены вопросы моделирования режимов работы электрических сетей 0,4 кВ при интеграции в них технических средств, симметрирующих несимметричные потоки, создаваемые трехфазной несимметричной нагрузкой в различных точках их подключения.

Активно используются методы математического и компьютерного моделирования и в работах, посвящённых сетям 0,4 кВ. В работе [5] разработана компьютерная модель для исследования вопросов электробезопасности в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Аналогичная модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ в программном комплексе MATLAB Simulink предложена в работе [6].

В работах [7, 8] рассмотрены проблемы электробезопасности в сельских электрических сетях 0,4 кВ, связанные с обеспечением чувствительности автоматических выключателей к токам однофазного короткого замыкания. На примере автоматических выключателей серии ВА57 предложена методика выбора коммутационного аппарата от рабочего тока и тока короткого замыкания с учетом теплового спада.

Одной из актуальнейших проблем в сетях 0,4 кВ является достоверное получение значений токов однофазных коротких замыканий. Это особенно актуально для сельских электрических сетей 0,4 кВ, максимальные протяжённости до удалённой точки в которых зачастую превышают рекомендованные ПУЭ 500 метров [9]. В свою очередь, это приводит к необеспеченности чувствительности защитных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в начале линии, к токам удалённых однофазных коротких замыканий (УОКЗ) [10] и, как следствие – к их неотключению. Поражение электрическим током в электрических сетях 0,4 кВ часто связано именно с указанной причиной.

Ввиду различия методов моделирования проблемой является выбор наиболее достоверного значения тока однофазного короткого замыкания, для которого должны выставляться уставки автоматического выключателя 0,4 кВ. Это связано с тем, что методы расчета дают разные результаты, а единственно закрепленный законодательно метод согласно ГОСТ 28249-93 не актуализировался более 18 лет.

Рассмотрим методы расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ. Их можно структурировать в несколько групп: натурные (физические), математические, компьютерные.

Первым и наиболее достоверным методом определения тока однофазного короткого замыкания является непосредственное исследование аварийного режима, что выполнено челябинскими учеными в работе [11] на полигоне ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго». Выбранная для испытаний опытная сеть имеет небольшую протяженность (481 м) и включает 2 типа провода: СИП-2 3х30+1х50 и АС-35. Данный полигон реализован в стране в единственном экземпляре.

Вторым физическим методом является замер сопротивления петли фаза-ноль в электрической сети прибором серии MZC с последующим косвенным вычислением ожидаемого тока однофазного короткого замыкания, что рассмотрено в работе [12]. При этом исследовать всю протяженность электрической сети 0,4 кВ при данном подходе ввиду высокой трудоемкости не представляется возможным.

Последним натурным методом является экспериментальное исследование на физической модели. Так, ранее упомянутым коллективом челябинским ученых разработана физическая модель [13], которая не является наглядной и не отвечает требованиям электробезопасности при имитации аварийных режимов ввиду её питания от трансформатора ТС-0,5-380/177 В. Указанная физическая модель также не является универсальной, не позволяет моделировать разные типы питающих трансформаторов, проводников линий электропередачи, не обеспечивает возможность подключения разных типов нагрузок, а также не пригодна для моделирования параллельной работы возобновляемых источников энергии с централизованным источником питания, моделирования работы второго источника питания, в том числе, однофазного, которым может быть, например, бензогенератор. Также актуальным является исследование вопросов электробезопасности и возможности использования средств повышения надежности электроснабжения и их влияние на качество электроэнергии, что можно также исследовать на физической модели.

В настоящее время наиболее часто используются 2 математических метода исследования режима однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ. Первый из них изложен в ГОСТ 28249-93 «Межгосударственный стандарт. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ» и позволяет определить численное значение тока однофазного короткого замыкания (КЗ) с использованием метода симметричных составляющих.

Согласно данному методу ток однофазного короткого замыкания $I_{КЗ}^1$, А, определяется по формуле:

$$I_{КЗ}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ср.нн}}{\sqrt{(2r_1 + r_0)^2 + (2x_1 + x_0)^2}}, \quad (1)$$

где $U_{ср.нн}$ – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло замыкание, В; r_1 , x_1 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи короткого замыкания, Ом; r_0 , x_0 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи короткого замыкания, Ом.

Второй метод также позволяет определить значение тока однофазного КЗ путем алгебраического сложения полных сопротивлений элементов до точки КЗ и называется упрощенным методом петли «фаза-ноль», при этом его значение не более, чем на 5% меньше получаемого по ГОСТ 28249-93 результата. Согласно данного метода, численное значение тока однофазного короткого замыкания $I_{КЗ}^1$, А, определяется по формуле (2) [14]:

$$I_{КЗ}^1 = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\phi-0}}, \quad (2)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В; Z_T – полное сопротивление трансформатора току однофазного замыкания на корпус, Ом; $Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли фаза-ноль от трансформатора до точки КЗ, Ом.

В настоящее время определение тока однофазного короткого замыкания осуществляется на имитационных моделях с использованием компьютерных программ. Например, в источнике [15] представлена компьютерная модель, разработанная коммерческой компанией «Проект РЗА». Она позволяет не только определить значение тока однофазного КЗ, но и исследовать другие электрические параметры: распределение напряжения вдоль линии, напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в разных точках сети. При этом получаемые по ним результаты на 25% меньше, чем расчеты по математическим расчетным методам.

Наиболее популярными являются компьютерные модели в MATLAB Simulink. Так, челябинскими учеными разработана компьютерная модель [16], но её недостатком является то, что она содержит всего 2 измерительных блока в точке короткого замыкания и на выводах 0,4 кВ понижающего трансформатора, что не дает возможности исследования распределения напряжения вдоль линии при установившихся аварийных несимметричных режимах.

В работе [17] представлена компьютерная модель сельской электрической сети 0,4 кВ, предназначенная для исследования несимметричных режимов, вызванных короткими замыканиями. Её упрощенный вид с 1-им участком линий электропередачи 0,4 кВ представлен на рисунке 1.

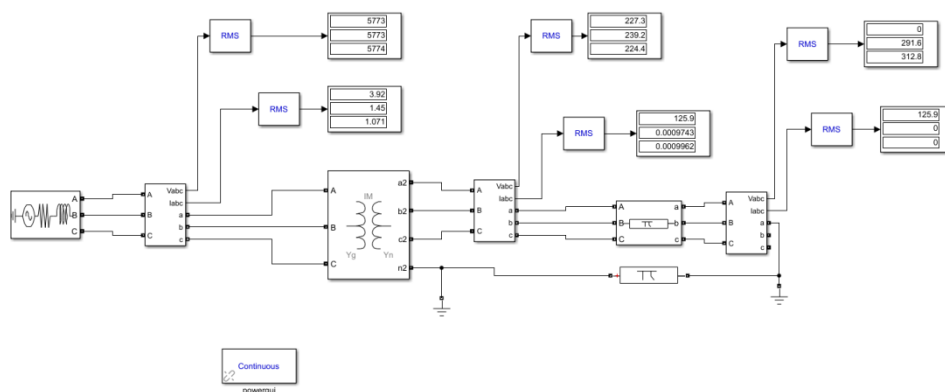


Рис. 1. Компьютерная модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink

Fig. 1. Computer model of rural 10/0.4 kV electrical network in MATLAB Simulink

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выше были перечислены разные методы расчета тока однофазного короткого замыкания в сети 0,4 кВ. Наиболее достоверными из них являются методы физического исследования, среди которых наиболее доступным является натурное экспериментальное исследование. В связи с этим, в данной работе произведено сравнение результатов определения значений тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ математическими методами, методами компьютерного моделирования и с помощью физического моделирования, а также предложены корректировочные коэффициенты для повышения достоверности расчетов.

Цель исследования заключается в разработке корректировочных коэффициентов для разных методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для исследования режима устойчивого однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ в лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ была разработана физическая модель, внешний вид которой представлен на рисунке 2.

Для нее были обоснованы коэффициенты подобия согласно методике, рассмотренной в работе [18]. Коэффициенты подобия позволяют производить пересчет электрических параметров модели на промышленные, то есть получить характеристики действующей сельской электрической сети 0,4 кВ.

Был произведен расчет значений токов однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ с использованием разных методов при одинаковых исходных условиях. Так, в качестве протяженности воздушной линии электропередачи 0,4 кВ было

принято значение 1 км, ввиду того, что в филиалах электросетевых организаций ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» наибольшая средняя протяженность (характерна для филиала Орёлэнерго) составляет 985 метров [9]. В качестве питающего трансформатора был принят понижающий силовой трансформатор ТМ-250-10/0,4 кВ Y/Y_n . Таких в электросетевой организации филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» 13% от общего количества [9]. В качестве провода был принят проводник неизолированного типа и сечения 4А-35 ввиду того, что им выполнено 27% сельских электрических сетей 0,4 кВ Орловского региона.



Рис. 2. Внешний вид физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ *Fig. 2. Appearance of the physical model of the rural 0.4 kV power grid*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет токов разными методами производился для точек, соответствующих расстоянию между участками линии электропередачи на физической модели. При этом расчет на выводе трансформатора без учета линии электропередачи 0,4 кВ не производился, так как данный опыт не был реализован в целях недопущения выхода из строя трансформатора на физической модели.

Результаты расчетов разными методами, а также результаты измерений на физической модели, полученные с помощью коэффициентов пересчета представлены в таблице 1, а также на рисунке 3.

Таблица 1

Table 1

Сравнение результатов расчетов тока однофазного короткого замыкания, полученных разными методами

Comparison of results of single-phase short-circuit current calculations obtained by different methods

№ п/п	Расстояние при замыкании на ВЛ 0,4 кВ, L, м	Расчеты токов однофазного короткого замыкания, I _{кз} , А				
		Физическая модель	ГОСТ 28249-93	Проект РЗА	Метод петли фаза-ноль	MATLAB Simulink
1	186	570	549	407	501	630
2	258	443	419	304	387	471
3	331	362	338	242	314	374
4	402	307	284	202	265	311
5	476	266	244	173	229	265
6	548	234	214	151	201	231
7	621	208	190	134	180	205
8	693	185	172	121	163	184
9	765	169	156	110	148	167
10	838	156	143	100	136	153
11	1023	126	118	83	113	126

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При разработке корректировочных коэффициентов в данной работе предполагается снизить погрешность между результатами расчётов разными методами до приемлемых с инженерной точки зрения, а именно до близкой к 5%. Следует отметить, что ни один из рассматриваемых методов математического и компьютерного моделирования не соответствует предложенной 5% погрешности, что отражено на рисунке 3.

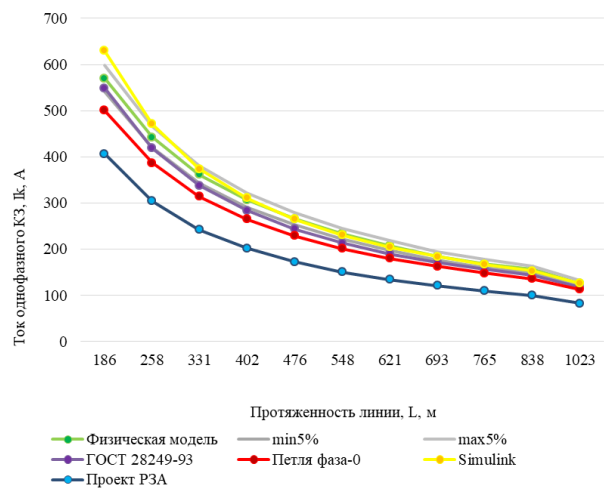


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов тока однофазного короткого замыкания при использовании разных методов для трансформатора ТМ-250 и провода 4А-35

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Погрешность между методами расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ определим по методу расчета относительной погрешности δ , %, согласно формуле (3):

$$\delta = \frac{\Delta a}{a} \cdot 100\%, \tag{3}$$

где Δa – разница между результатами измерения на физической модели и сравниваемым методом, А; а – результат измерения на физической модели, А.

В свою очередь, новое значение тока однофазного короткого замыкания $I_{\text{КЗ}}^{1'}$, А, в сельской электрической сети 0,4 кВ с учетом корректировочных коэффициентов $k_{\text{кор}}$, безразм., предлагается определять по формуле (4):

$$I_{\text{КЗ}}^{1'} = k_I \cdot I_{\text{КЗ}}^1, \tag{4}$$

где k_I – корректировочный коэффициент для расчетного метода, безразм.; $I_{\text{КЗ}}^1$ – значение тока однофазного короткого замыкания, полученное с использованием исходного метода, А.

Результаты (Results)

Погрешности значений токов однофазного короткого замыкания, полученных по методам математического и компьютерного моделирования, по сравнению с результатами натурных измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Погрешности методов расчета тока однофазного КЗ по сравнению с экспериментальными данными физической модели
Errors of methods of single-phase short-circuit current calculation in comparison with experimental data of the physical model

№ п/п	Расстояние при ОКЗ на ВЛ 0,4 кВ, L, м	Погрешности методов расчета, %			
		ГОСТ 28249-93	Проект РЗА	Метод петли фаза-ноль	MATLAB Simulink
1	186	3,7	28,6	12,1	9,5
2	258	5,4	31,4	12,6	5,9
3	331	6,6	33,1	13,3	3,2
4	402	7,5	34,2	13,7	1,3
5	476	8,3	35	13,9	0,4
6	548	8,5	35,5	14,1	1,3
7	621	8,7	35,6	13,5	1,4
8	693	7	34,6	11,9	0,5
9	765	7,7	34,9	12,4	1,2
10	838	8,3	35,9	12,8	1,9
11	1023	6,3	34,1	10,3	0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из результатов, представленных в таблице 2 следует, что погрешность результатов, полученных по методу ГОСТ 28249-93 по сравнению с результатами измерений, полученными на физической модели, составляет 3,8-8,7%, а результатов, полученных методом петли фаза-ноль – 10,3-14,1%. При этом погрешность математической модели в MATLAB Simulink высока только в расчетных токах на расстоянии до 275 метров и составляет 5,9-9,5%, а в остальных не более 3,2%. В свою очередь, достаточно высокие результаты погрешности получились в случае применения математической модели компании Проект РЗА, они составляют 28,6-35,9%.

Для корректировки расчетов предлагается ввести следующие корректировочные коэффициенты (безразм.):

– k_1 для ГОСТ 28249-93 – 1,07;

– k_1 для метода петли фаза-0 – 1,13;

– k_1 для первых 275 м модели MATLAB Simulink – 0,93. При этом результаты для последующей протяженности воздушной линии электропередачи характеризуются высокой степенью достоверности и не нуждаются в корректировке;

– k_1 для модели Проект РЗА – 1,47.

Обсуждение (Discussions)

С учетом предложенных коэффициентов был произведен пересчет значений токов однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ по формуле (4). Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Скорректированные результаты расчетов тока однофазного короткого замыкания, полученных разными методами, с использованием предложенных коэффициентов

Adjusted results of single-phase short-circuit current calculations obtained by different methods using the proposed coefficients

№ п/п	Расстояние при замыкании на ВЛ 0,4 кВ, L, м	Значения токов однофазного короткого замыкания, $I_{кз}$, А			
		ГОСТ 28249-93	Проект РЗА	Метод петли фаза-ноль	MATLAB Simulink
1	186	587	598	566	580
2	258	448	447	437	433
3	331	362	356	355	374
4	402	304	297	299	311
5	476	261	254	259	265
6	548	229	222	227	231
7	621	203	197	203	205
8	693	184	178	184	184
9	765	167	162	167	167
10	838	153	147	154	153
11	1023	126	122	128	126

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Так же как и для значений до использования корректировочных коэффициентов, произведем расчет относительной погрешности по сравнению с экспериментальными данными, измеренными на физической модели, по формуле (3). Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Погрешности методов расчета тока ОКЗ в сельской электрической сети 0,4 кВ с учетом

корректирующих коэффициентов

Errors of methods for calculating RCD current in a 0.4 kV rural power grid with correction factors taken into account

№ п/п	Расстояние при ОКЗ на ВЛ 0,4 кВ, L, м	Погрешности методов расчета, %			
		ГОСТ 28249-93	Проект РЗА	Метод петли фаза-ноль	MATLAB Simulink
1	186	3	5	0,7	1,7
2	258	1,2	0,9	1,3	2,2
3	331	0,1	1,7	2	3,2
4	402	1	3,3	2,5	1,3
5	476	1,8	4,4	2,7	0,4
6	548	2,1	5,1	2,9	1,3
7	621	2,3	5,3	2,2	1,4
8	693	0,5	3,9	0,4	0,5
9	765	1,2	4,3	1	1,2
10	838	1,9	5,8	1,5	1,9
11	1023	0	3,2	1,3	0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из результатов, представленных в таблице 4, можно сделать вывод, что использование предложенных корректировочных коэффициентов позволяет снизить погрешность расчёта методом ГОСТ 28249-93 до 3%, методом петли фаза-ноль – до 2,9%, а с применением компьютерной модели MATLAB Simulink до 3,2%. В свою очередь, для компьютерной модели Проект РЗА удалось добиться снижения погрешности до 5,8%, что в 6,1 раза меньше, чем исходные значения модели.

Заключение (Conclusions)

1. В настоящее время для определения численного значения тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ можно использовать ряд методов математического, компьютерного и физического моделирования. При этом физическое и натурное моделирование сельских электрических сетей 0,4 кВ позволяют исследовать нормальные и аварийные режимы работы и проверять достоверность различных методов математического и компьютерного моделирования.

3. Выявлено, что по сравнению с экспериментальными результатами физического моделирования режима устойчивого однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ погрешность методов математического и физического моделирования достигает от 0 до 35,9%.

4. В работе были предложены корректировочные коэффициенты для разных методов определения расчетного значения тока однофазного короткого замыкания. Так, для метода ГОСТ 28249-93 было предложено значение коэффициента 1,07, для метода петли фаза-ноль – 1,13; для первых 275 м модели MATLAB Simulink – 0,93, для модели Проект РЗА – 1,47.

5. Был произведен пересчет значений с учетом поправочных коэффициентов, его результаты показали, что максимальная погрешность расчёта методом ГОСТ 28249-93 снизилась до 3% (в 2,9 раза), методом петли фаза-ноль – до 2,9% (в 4,9 раза), с применением компьютерной модели MATLAB Simulink до 3,2% (в 3 раза), для компьютерной модели «Проект РЗА» – до 5,8% (в 6,1 раза).

Литература

1. Sudhakar T.D., Raja Rajan M., Srinivasan K.N., Raja Prabu Ramachandran, Narmadha T.V., Mohana Krishnan M. Modeling and Simulation of Distribution Network with the Integration of Distribution Generator using Matlab // Indian Journal of Science and Technology. March 2016. №9(12). DOI:10.17485/ijst/2016/v9i12/89947.
2. Adrián Bolaño Martínez, Isaac Jiménez Navarro, Enrique C. Quispe, Universidad Autónoma de Occidente, Pablo Daniel Donolo. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). October 2022 12(5):4640-4648. DOI:10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
3. Niyoz, S. R. Modeling and calculation of urban electrical networks in Dushanbe-Republic of Tajikistan for the analysis and assessment of power losses / S. R. Niyoz, S. R. Chorsanbiev, A. M. Ashurov // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. №1(53). Р. 18-24. EDN CJZHVG.
4. Наумов И.В., Багаев А.А. Моделирование режимов несимметричного электропотребления в сельских распределительных электрических сетях 0,38 кВ при многоступенчатом отборе мощности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. №6(212). С. 90-104. DOI 10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104. EDN SKBGVV.
5. Комаров В.И., Кит Ю.В., Стэц Р.Е. Использование компьютерного моделирования для анализа электробезопасности в электрических сетях до 1 кВ // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. №2-1(46). С. 37-41.
6. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н. Моделирование низковольтных сельских электрических сетей 10/0,4 кВ // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. 2018. №4(9). С. 37-42.
7. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П. Выбор автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ с учетом допустимого времени отключения // Вестник КрасГАУ. 2007. №5. С. 191-196.
8. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П., Кунгс Я.А. Учет допустимого времени отключения при выборе автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ // Промышленная энергетика. 2009. № 2. С. 25-30.
9. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, №2(47). С. 31-41.
10. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Анализ типов и технических характеристик защитных коммутационных аппаратов электрических сетей 0,4 кВ в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» // Научный журнал молодых ученых. 2022. №4(29). С. 42-51.

11. Млоток А.В., Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. №2(19). С. 96-107.
12. Виноградов А.В., Лансберг А.А. Опыт измерений при однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2022. №3(36). С. 5-15.
13. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13-21.
14. Найфельд М.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности // 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергия, 1971. 311 с.
15. Проект РЗА. Лаборатория РЗА. Доступно по: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/>. Ссылка активна на 27 июня 2024.
16. Валеев Р.Г., Млоток А.В., Ершов А.М., Сидоров А.И. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB-Simulink // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №9-10. С. 116-128.
17. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 14-28.
18. Веников, В.А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. Москва: Вышш. школа, 1966. 487 с.

Авторы публикации

Лансберг Александр Александрович – младший научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. lansbergaa@vk.com

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

References

1. Sudhakar T.D., Raja Rajan M., Srinivasan K.N., Raja Prabu Ramachandran, Narmadha T.V., Mohana Krishnan M. Modeling and Simulation of Distribution Network with the Integration of Distribution Generator using Matlab // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016;9(12). DOI:10.17485/ijst/2016/v9i12/89947.
2. Adrián Bolaño Martínez, Isaac Jiménez Navarro, Enrique C. Quispe, Universidad Autónoma de Occidente, Pablo Daniel Donolo. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022;12(5):4640-4648. DOI:10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
3. Niyoz, S. R. Modeling and calculation of urban electrical networks in Dushanbe-Republic of Tajikistan for the analysis and assessment of power losses / S. R. Niyoz, S. R. Chorshanbiev, A.M. Ashurov // *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. 2021;1(53):18-24. EDN CJZHGB.
4. Naumov I.V., Bagaev A.A. Modeling of asymmetric power consumption modes in rural distribution electric networks of 0.38 kV with multistage power sampling // *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;6(212):90-104. DOI 10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104.
5. Komarov V.I., Kit Yu.V., Plaintiff R.E. Ispolzovanie kompyuternogo modelirovaniya dlya analiza elektrobezopasnosti v elektricheskikh setyah do 1 kV // *Current scientific research in the modern world*. 2019;2-1(46):37-41.
6. Rakhimov O.S., Mirzoev D.N. Modelirovanie nizkovoltnykh selskikh elektricheskikh setej 10/0,4 kV // *Bulletin of the PITTU named after academician M.S. Osimi*. 2018;4(9):37-42.
7. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P. Vyb,or avtomaticheskikh vyklyuchatelej dlya zashchity selskikh elektricheskikh setej 0,4 kV s uchetom dopustimogo vremeni otklyucheniya // *Bulletin of KrasGAU*. 2007;5:191-196.
8. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P., Kungs Ya.A. Uchet dopustimogo vremeni otklyucheniya pri vyb,ore avtomaticheskikh vyklyuchatelej dlya zashchity selskikh elektricheskikh setej 0,4 kV // *Industrial energy*. 2009;2:25-30.
9. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. Characteristics of electric companies by the number and length of transmission lines and substation capacity // *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2022;2(47):31-41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41.
10. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Analiz tipov i tekhnicheskikh harakteristik zashchitnykh kommutatsionnykh apparatov elektricheskikh setej 0,4 kV v filiale PAO «Rosseti Centr»-«Orelenergo» // *Scientific Journal of Young Scientists*. 2022;4(29):42-51.

11. Molotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. Opytnaya elektricheskaya set napryazheniem 380 V // *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2014;2(19):96-107.
12. Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Opyt izmerenij pri odnofaznom korotkom замыкании v elektricheskoy seti 0,4 kV // *Agrotechnics and energy supply*. 2022;3(36):5-15.
13. Ershov A.M., Khlopova A.V. Fizicheskaya model elektricheskoy seti napryazheniem 10/0,38 kV // *Electrical safety*. 2016;2:13-21.
14. Nyfeld M.R. Grounding, protective measures of electrical safety // 4th ed., reprint. and add. Moscow: Energiya, 1971. 311 p.
15. The RPA project. RZA Laboratory. Available at: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/>. Accessed: 27 June 2024.
16. Valeev R.G., Molotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modelirovanie elektricheskoy seti napryazheniem 380 V s vozdushnymi liniyami v programmnoj srede MATLAB-Simulink // *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2013;9-10:116-128.
17. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Panfilov A.A. Assessment of the reliability of the mathematical model of the 0.4 kV rural electric network in matlab simulink on the example of a study of the steady-state mode of a single-phase short circuit // *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2023;25(6):14-28. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28.
18. Venikov, V.A. Theory of similarity and modeling in relation to problems of electric power industry. Moscow: The highest. school, 1966. 487 p.

Authors of the publication

Alexander A. Lansberg – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. lansbergaa@vk.com

Alexander V. Vinogradov – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 27.06.2024 г.

Отредактировано 30.08.2024 г.

Принято 11.09.2024 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 697.3:696.4

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-54-65

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ УСТАНОВОК ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Ротов П.В.¹, Горшков А.В.², Ротова М.А.¹

¹Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

²ПАО «Т Плюс», филиал «Ульяновский», г. Ульяновск, Россия

p.rotov@rambler.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Статья посвящена актуальной для отечественного централизованного теплоснабжения проблеме. Рассмотрена широко распространенная ситуация, когда к открытой системе теплоснабжения от ТЭЦ переключаются потребители от систем теплоснабжения с закрытой схемой подключения установок горячего водоснабжения. *МЕТОДЫ.* Выполнено исследование режимов работы действующих систем теплоснабжения. Сбор данных осуществлялся при помощи онлайн-системы контроля и коммерческого учета энергоресурсов. Предложена методология расчета сравниваемых режимных параметров. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* На примере действующей системы теплоснабжения показано, что эффект от мероприятия по переключению абонентов неэкономичных котельных на теплоисточники с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергией нивелируется законодательными ограничениями по развитию открытых систем теплоснабжения, а также нормативным методом определения потребления теплоты в системах горячего водоснабжения. Выбраны основные технико-экономические показатели для сравнительного анализа работы централизованной системы теплоснабжения в условиях полного переключения установок горячего водоснабжения по открытой схеме и при наличии некоторого количества установок горячего водоснабжения с закрытой схемой подключения. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определен период неэффективной работы централизованной системы теплоснабжения и рассчитан размер годового экономического ущерба, что позволило доказать необходимость приведения всех схем подключения установок горячего водоснабжения в одной системе теплоснабжения к единому типу.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение; системы горячего водоснабжения; регулирование тепловой нагрузки.

Для цитирования: Ротов П.В., Горшков А.В., Ротова М.А. О целесообразности изменения схемы подключения установок горячего водоснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 54-65. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-54-65.

ABOUT EXPEDIENCY OF CHANGING THE CONNECTION DIAGRAM OF HOT WATER SUPPLY UNITS

Rotov P.V.¹, Gorshkov A.V.², Rotova M.A.¹

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

²PJSC T Plus, Ulyanovsk branch, Ulyanovsk, Russia

p.rotov@rambler.ru

Abstract: *PURPOSE.* The article is devoted to an urgent problem for domestic district heating. A widespread situation is considered when consumers from heat supply systems with a closed connection scheme for hot water supply plants are switched to an open heat supply system from a

thermal power plant. **METHODS.** Study of operating modes of operating heat supply systems was performed. Data collection was carried out using an online system for monitoring and commercial accounting of energy resources. Methodology for calculation of compared mode parameters is proposed. **RESULTS.** Using the example of the existing heat supply system, it is shown that the effect of the measure to switch subscribers of uneconomical boiler houses to heat sources with combined heat and power generation is leveled by legislative restrictions on the development of open heat supply systems, as well as by the regulatory method for determining heat consumption in hot water supply systems. The main technical and economic indicators were selected for comparative analysis of the operation of the centralized heat supply system in conditions of complete switching of hot water supply plants according to an open circuit and in the presence of a certain number of hot water supply plants with a closed connection scheme. **CONCLUSION.** The period of inefficient operation of the centralized heat supply system was determined and the amount of annual economic damage was calculated, which made it possible to prove the need to bring all schemes for connecting hot water supply plants in one heat supply system to a single type.

Keywords: district heating; hot water supply systems; heat load control.

For citation: Rotov P.V., Gorshkov A.V., Rotova M.A. About expediency of changing the connection diagram of hot water supply units. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 54-65. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-54-65.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

В Российском законодательстве в соответствии с требованием Федерального закона от 27.07.2010 г. №190-ФЗ «О теплоснабжении» до 2022 г. существовала норма об обязательном переключении всех установок горячего водоснабжения (ГВС) систем теплоснабжения городов на закрытые схемы. Как показали научно-технические исследования, прогнозируемая эффективность этих мероприятий оказалась недостаточно высокой за счет потенциально больших капитальных затрат в системы теплоснабжения [1-4].

Поскольку единовременного «закрытия» схем не произошло, в российских городах сохранилась структура теплоснабжения, включающая несколько взаимосвязанных или независимых систем от теплоисточников различной мощности и принадлежности с различными схемами подключения установок ГВС.

Анализ разработанных схем теплоснабжения различных городов России подтверждает, что одним из направлений повышения эффективности их работы является вывод из эксплуатации неэкономичных котельных путем переключения тепловой нагрузки на тепловые электрические станции [5-8]. И если системы теплоснабжения от ТЭС могут быть открытыми или закрытыми, то системы теплоснабжения, подключенные к котельным, как правило, проектируются закрытыми.

При переключении потребителей от котельной в объединенной системе теплоснабжения могут одновременно оказаться установки ГВС, подключенные по открытой и закрытой схемам. Согласно нормативным требованиям минимальная температура теплоносителя в закрытых системах теплоснабжения в переходный период отопительного сезона и в межотопительный период должна быть не ниже 70 °С, что существенно выше минимально необходимой температуры для работы открытых систем в этих же периодах равной 60 °С.

Таким образом, возникает практическая задача качественного обеспечения потребителей горячим водоснабжением в системах, подключенных к одному теплоисточнику по разным схемам.

Материалы и методы (Materials and methods)

В системе теплоснабжения г. Ульяновска за последние годы выполнен комплекс мероприятий по переключению тепловой нагрузки ряда ведомственных котельных на тепловые электрические станции. В результате в одной системе теплоснабжения оказались потребители, подключенные по открытой и закрытой схемам обеспечения нагрузки систем ГВС. Сведения о тепловой мощности теплоисточников и о присоединенной нагрузке приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1Производительность котельных и присоединенная нагрузка
Boiler house capacity and connected load

Наименование	Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	Присоединенная суммарная тепловая нагрузка, Гкал/ч	Тип системы ГВС
ООО «РТС «Репино»	96,0	39,2	закрытая
АО «Комета»	120,0	57,8	закрытая

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Наличие центральных тепловых пунктов (ЦТП), подключенных по закрытой схеме, обусловлено плановым переводом существующих тепловых нагрузок от ведомственных котельных на Ульяновские ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 в рамках мероприятий, приведенных в программе утвержденной схемы теплоснабжения муниципального образования «город Ульяновск». Переключение нагрузки котельной АО «Комета» на ТЭЦ-2 осуществлено в 2017 г., нагрузки котельной ООО «РТС «Репино» на ТЭЦ-1 – в 2022 г. Доля переведенных тепловых нагрузок на ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 не превышает 3% нагрузок отпускаемого ТЭС тепла. Квартала с закрытой схемой теплоснабжения находятся на удалении более 7,5 км от теплоисточников. На наш взгляд, переключение существующих тепловых нагрузок не следует рассматривать как новое подключение.

До переключения нагрузки на ТЭС в межотопительный и переходные периоды отопительного сезона в этих кварталах происходило снижение качества ГВС в связи с недостаточными параметрами теплоносителя для нормальной работы теплообменного оборудования. Кроме того, в этих кварталах зафиксировано неоднократное ухудшение качества горячей воды из-за физико-химических показателей исходной водопроводной воды, поступающей в подогреватели для нагрева.

Одним из возможных и наиболее экономичных решений этой проблемы является «открытие» схемы теплоснабжения в переключенных кварталах. Преимуществами в этом случае является то, что переключение ЦТП на открытую схему не потребует материально-технических ресурсов и позволит оптимизировать тепловой и гидравлический режим работы системы теплоснабжения путем выдерживания оптимальной температуры теплоносителя. Показатели качества горячей воды не ухудшатся, т.к. для обеих систем действуют одни и те же санитарные нормы и правила [9]. Кроме того, «открытие» схемы затрагивает сравнительно небольшое количество потребителей.

Другой вариант решения проблемы недостаточной температуры ГВС у небольшого количества абонентов, подключенных по закрытой схеме, путем повышения температуры теплоносителя на теплоисточнике для всех потребителей существенно повлияет на эффективность работы всей централизованной системы теплоснабжения за счет перерасхода топливно-энергетических ресурсов.

Минимально необходимая температура сетевой воды на выходе ТЭЦ для выдерживания минимально необходимой температуры теплоносителя на вводе в дома, подключенные по закрытой схеме ГВС составит:

$$t_{\text{ТЭЦ}i}^{\text{зак}} = t_{\text{ГВС}i} + \Delta t_{\text{кв}i} + \Delta t_{\text{маг}i} + \Delta t, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ГВС}i}$ – минимальная температура ГВС на вводе в дом, $^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{кв}i}$ – понижение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе на участке от ЦТП до многоквартирного дома с наибольшим снижением температуры ГВС, $^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{маг}i}$ – понижение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе на участке теплосети от ТЭЦ до ЦТП, $^\circ\text{C}$; Δt – изменение температуры на ЦТП, $^\circ\text{C}$; i – номер теплоисточника.

Наибольшее изменение температуры теплоносителя на ЦТП происходит в теплообменном оборудовании, поэтому за величину Δt принимается разность между начальной температурой греющего теплоносителя и конечной температурой нагреваемой воды [10, 11]. Схематичное изображение изменения температуры воды на различных участках системы теплоснабжения приведено на рисунке 1.

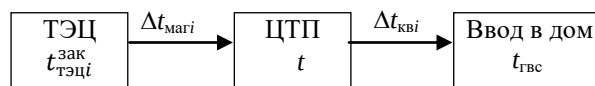


Рис. 1. Изменение температуры воды в системе теплоснабжения Fig. 1. Change of water temperature in the heating system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходные данные для расчета приняты на основе фактических режимных параметров работы обеих систем теплоснабжения и приведены в таблице 2. С учетом этих данных температура теплоносителя на выходе с теплоисточника, определенная по уравнению (1), составит $t_{\text{ТЭЦ1}}^{\text{зак}} = 74^\circ\text{C}$ на ТЭЦ-1, на ТЭЦ-2 – $t_{\text{ТЭЦ2}}^{\text{зак}} = 73^\circ\text{C}$.

Таблица 2

Table 2

Исходные данные для расчета режимных параметров
Initial data for calculation of mode parameters

Наименование	Обозначение	ТЭЦ-1	ТЭЦ-2
Отпуск теплоты в межотопительный период, Гкал	$Q_{\text{ГВС}}$	231874	128846
Расход теплоносителя для ГВС, т	$G_{\text{ГВС}}$	1765220	793800
Температура теплоносителя в подающем/обратном трубопроводах теплосети от ТЭЦ в межотопительном периоде (МОП) на основе разработанных энергетических характеристик, $^\circ\text{C}$	$t_1^{\text{отк}}/t_2^{\text{отк}}$	70/52,3	68/55,6
Расчетные тепловые потери в МОП, Гкал	$Q_{\text{ТП}}$	141728	37353
Цена тепловой энергии, руб./Гкал	$\Pi_{\text{ТЭ}}$	1970,24	1970,24
Стоимость условного топлива, руб./т.у.т.	$\Pi_{\text{Т}}$	4987	4383
Минимальная температура ГВС на вводе в дом, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{ГВС}}$	62	62
Разность температуры греющего и нагреваемого теплоносителя в теплообменнике ГВС, $^\circ\text{C}$	Δt	5	5
Минимальная температура ГВС в точке водоразбора, $^\circ\text{C}$	t^{h}	60	60
Понижение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе на участке теплосети от ТЭЦ до ЦТП, $^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{мар}}$	5,3	2,2
Понижение температуры воды в подающем трубопроводе на участке от ЦТП до многоквартирного дома с наибольшим снижением температуры ГВС, $^\circ\text{C}$	Δt_{KB}	1,9	5,1
Температура холодной воды, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{ХВС}}$	18,4	8,8
Удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии, кг/Гкал	$b_{\text{Т}}$	152,7	139,3
Температура внутреннего воздуха, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{в}}$	20	20
Расчетная температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$	$t_{\text{н.о}}$	-33	-33

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Таким образом, при сохранении закрытой схемы ГВС в некоторых кварталах, у всех остальных потребителей, подключенных по открытой схеме, температура теплоносителя вырастет на $\Delta t_{\text{ГВС1}} = 4^\circ\text{C}$ для системы теплоснабжения от ТЭЦ-1 и на $\Delta t_{\text{ГВС2}} = 5^\circ\text{C}$ – для ТЭЦ-2. Это приведет к повышению разности температур между теплоносителем и окружающей средой, и, как следствие, к росту сверхнормативных тепловых потерь в системах теплоснабжения.

Основными факторами формирования дополнительных тепловых потерь в системах ГВС является наличие постоянной круглосуточной, практически нерегулируемой, циркуляции в системах ГВС и нормативный метод определения потребления теплоты на нужды ГВС [12, 13].

Технико-экономическое обоснование перевода с закрытой на открытую схему осуществляется путем сравнения следующих эксплуатационных показателей при различных значениях минимально необходимой температуры на выводах ТЭЦ:

- тепловых потерь во внутридомовых системах ГВС, обусловленных повышенным циркуляционным расходом;
- объема реализованной теплоты на нужды ГВС в межотопительный период;
- технологических потерь теплоты в тепловых сетях;
- объема нереализованной теплоты, потребленной в переходный период;
- объема снижения выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Тепловые потери во внутридомовых системах ГВС, обусловленные повышенным циркуляционным расходом.

Тепловые потери внутридомовых трубопроводов ГВС средним диаметром 32 мм в открытой схеме при разности температур трубопровода ГВС и окружающей среды равной $(t_{\text{ГВС}} - t_{\text{в}}) = 42^\circ\text{C}$ составляют $q_{\text{ГВС}}^{\text{отк}} = 63 \text{ ккал}/(\text{ч}\cdot\text{м})$.

В условиях отключения автоматического регулирования температуры ГВС в межотопительный и переходный периоды вынужденное повышение температуры теплоносителя на $4\text{--}5^\circ\text{C}$ у остальных потребителей приведет к росту тепловых потерь во

внутридомовых системах ГВС до значения $q_{\text{ГВС1}}^{\text{закр}} = 70$ ккал/(ч·м) в системе теплоснабжения от ТЭЦ-1, $q_{\text{ГВС2}}^{\text{закр}} = 71,5$ ккал/(ч·м) в системе от ТЭЦ-2, более чем на 10 %.

Соотношение тепловых потерь можно описать через коэффициент изменения тепловых потерь

$$K_{\text{теплотп}i} = q_{\text{ГВС}i}^{\text{закр}} / q_{\text{ГВС}i}^{\text{откр}}. \quad (2)$$

На основании анализа режима работы системы теплоснабжения г. Ульяновска в межотопительном сезоне фактический расход теплоты на нагрев единицы объема горячей воды определен по выражению

$$q_{\text{уд.отк}i} = Q_{ti}^h / q_{ti}^h, \quad (3)$$

где Q_{ti}^h – тепловой поток на нужды горячего водоснабжения в течение среднего часа водопотребления в i -ой системе теплоснабжения, Гкал/ч; q_{ti}^h – среднечасовой расход горячей воды в i -ой системе теплоснабжения, м³/ч.

Для системы теплоснабжения от ТЭЦ-1 фактический расход теплоты на нагрев единицы объема горячей воды составит $q_{\text{уд.отк}1} = 0,13$ Гкал/м³, для ТЭЦ-2 – $q_{\text{уд.отк}2} = 0,12$ Гкал/м³, при нормативном значении $q_{\text{уд.норм}} = 0,067$ Гкал/м³ [12-14].

В соответствии с требованиями нормативно-технической документации¹ тепловой поток на нужды горячего водоснабжения с учетом тепловых потерь можно определить из выражения

$$Q_{ti}^h = q_{ti}^h \cdot c \cdot (t^h - t_{\text{хвс}i}) \cdot 10^{-3} + Q_i^{\text{ht}} = q_{ti}^h \cdot c \cdot (t^h - t_{\text{хвс}i}) \cdot 10^{-3} (1 + K_{\text{тп}i}), \quad (4)$$

где Q_i^{ht} – тепловые потери в трубопроводах ГВС, Гкал/ч; $K_{\text{тп}i}$ – коэффициент, учитывающий тепловые потери трубопроводами ГВС; t^h – температура горячей воды в точке водоразбора, °С; $t_{\text{хвс}i}$ – температура холодной воды, °С; c – теплоемкость воды, ккал/(кг·°С).

Решая совместно уравнения (3) и (4) получим уравнение для определения коэффициента, учитывающего тепловые потери трубопроводами горячего водоснабжения

$$K_{\text{тп}i} = \frac{q_{\text{уд.отк}i} - (t^h - t_{\text{хвс}i}) \cdot c \cdot 10^{-3}}{(t^h - t_{\text{хвс}i}) \cdot c \cdot 10^{-3}}. \quad (5)$$

С учетом расхода теплоты, определенного по уравнению (3) и данных таблицы 2, фактический коэффициент тепловых потерь, учитывающий потери трубопроводами горячего водоснабжения, для системы теплоснабжения от ТЭЦ-1 в 6,1–21,3 раза превысит нормативное значение² равное $K_{\text{тп}} = 0,1 \div 0,35$, для системы от ТЭЦ-2 – в 3,8–13,4 раза.

Следует отметить, что повышение температуры теплоносителя приведет к пропорциональному росту тепловых и коммерческих потерь, обусловленных теплопередачей и невозможностью продажи потребителям открытой системы теплоснабжения избыточной теплоты. Это увеличение характеризуется приведенным коэффициентом тепловых потерь, $K_{\text{пр}i}$, определяемым по уравнению:

$$K_{\text{пр}i} = K_{\text{тп}i} \cdot K_{\text{теплотп}i}. \quad (6)$$

Результаты расчетов величин по уравнениям (2), (5) и (6) для различных систем теплоснабжения приведены в таблице 3. Как следует из таблицы 3, изменение режима приведет к значительному росту технологических и коммерческих потерь.

Решая систему уравнений (3)-(4) с учетом приведенного коэффициента тепловых потерь из таблицы 3 и величины повышения температуры теплоносителя у потребителей с открытой схемой подключения, определим удельный расход теплоты на нагрев единицы объема ГВС для системы теплоснабжения, функционирующей при повышенной температуре ГВС у всех потребителей, Гкал/м³.

$$q_{\text{уд.закр}i} = c \cdot (t^h + \Delta t_{\text{ГВС}} - t_{\text{хвс}i}) \cdot (1 + K_{\text{пр}i}) \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Определенные по уравнению (7) значения составляют $q_{\text{уд.закр}1} = 0,15$ Гкал/м³ для системы теплоснабжения от ТЭЦ-1, $q_{\text{уд.закр}2} = 0,14$ Гкал/м³ для системы теплоснабжения от ТЭЦ-2.

Дополнительные ежегодные затраты на тепловые потери внутридомовых систем ГВС, $\Pi_{\text{кп}i}$, руб., определяются по уравнению

$$\Pi_{\text{кп}i} = G_{\text{ГВС}i} \cdot (q_{\text{уд.закр}i} - q_{\text{уд.отк}i}) \cdot b_{ti} \cdot \Pi_{ti}. \quad (8)$$

где $G_{\text{ГВС}i}$ – расход теплоносителя на нужды ГВС, м³/ч; b_{ti} – удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии, кг/Гкал; Π_{ti} – стоимость условного топлива, руб./т.у.т.

Результаты расчета по уравнению (8) приведены в таблице 3.

¹ СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий

² Постановление Правительства Российской Федерации от 23.05.2006 г. №306

Таблица 3
Table 3Показатели тепловых потерь
Heat loss indicators

Наименование показателя	Система теплоснабжения ТЭЦ-1	Система теплоснабжения ТЭЦ-2
Коэффициент изменения тепловых потерь, $K_{\text{теплотот}}$	1,11	1,14
Коэффициент тепловых потерь, учитывающий потери трубопроводами горячего водоснабжения, $K_{\text{тп}}$	2,13	1,34
Приведенный коэффициент тепловых потерь, $K_{\text{пр}}$	2,36	1,53
Дополнительные затраты на тепловые потери внутридомовых систем ГВС $\Pi_{\text{кп}}$, млн.руб.	31,1	10,8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Объем нереализованной теплоты на нужды ГВС в межотопительный период.

В настоящее время расчет потребления в системах горячего водоснабжения осуществляется с использованием норматива расхода тепловой энергии, используемой на подогрев холодной воды, величина которого варьируется в регионах России от 0,057 до 0,069 Гкал/м³ [12-14]. Вынужденное повышение температуры теплоносителя на 4-5 °С у потребителей с открытой схемой ГВС приведет к дополнительному отпуску теплоты в эти системы, которое при нормативном методе расчета потребления ГВС не будет реализовано и приведет к росту так называемых «коммерческих» потерь.

Одним из характерных показателей эффективной работы системы теплоснабжения является удельный расход теплоносителя на единицу потребленной теплоты, $g_{\text{ГВС}}^{\text{отк(закр)}}$, м³/Гкал. Очевидно, что этот показатель, определенный по уравнениям (9, 10), будет меняться с изменением способа приготовления горячей воды:

– для открытой системы теплоснабжения:

$$g_{\text{ГВСi}}^{\text{отк}} = 1000 / (t_{\text{ГВС}} - t_{\text{хвси}}), \quad (9)$$

– для системы, функционирующей при повышенной температуре ГВС:

$$g_{\text{ГВСi}}^{\text{закр}} = 1000 / (t_{\text{ГВС}} + \Delta t - t_{\text{хвси}}). \quad (10)$$

Соотношение удельных расходов воды в различных системах, определенных по уравнениям (9)-(10), характеризуется коэффициентом изменения расхода воды:

$$K_{\text{объемi}} = g_{\text{ГВСi}}^{\text{закр}} / g_{\text{ГВСi}}^{\text{отк}}. \quad (11)$$

Результаты расчета удельных расходов воды во внутриквартальных трубопроводах ГВС и их соотношения в различных системах ГВС с учетом исходных данных из таблицы 2 по уравнениям (9)-(11) приведены в таблице 4.

Объем теплопотребления системами ГВС с учетом норматива расхода тепловой энергии на подогрев холодной воды для предоставления коммунальной услуги ГВС, которое можно реализовать потребителям, Гкал, определяется из уравнений:

– в открытой системе теплоснабжения:

$$Q_{\text{отки}} = G_{\text{ГВСi}} \cdot q_{\text{уд.норм}}, \quad (12)$$

– в системе, функционирующей при повышенной температуре ГВС:

$$Q_{\text{закри}} = G_{\text{ГВСi}} \cdot q_{\text{уд.норм}} \cdot K_{\text{объемi}}. \quad (13)$$

Изменение объема реализации коммунальной услуги по горячему водоснабжению $\Delta \Pi_i$, руб., составит

$$\Delta \Pi_i = [G_{\text{ГВСi}} \cdot q_{\text{уд.норм}} \cdot (1 - K_{\text{объемi}})] \cdot \Pi_{\text{тэi}}. \quad (14)$$

где $\Pi_{\text{тэi}}$ – стоимость тепловой энергии, руб./Гкал.

Результаты расчета по уравнениям (9)-(14) приведены в таблице 4.

Таблица 4
Table 4Удельные режимные параметры в различных системах теплоснабжения
Specific mode parameters in different heat supply systems

Наименование показателя	Система теплоснабжения ТЭЦ-1	Система теплоснабжения ТЭЦ-2
Удельный расход ГВС в открытой системе, $g_{\text{ГВС}}^{\text{откр}}$ м ³ /Гкал	22,94	18,80
Удельный расход ГВС в системе, функционирующей при повышенной температуре, $g_{\text{ГВС}}^{\text{закр}}$ м ³ /Гкал	21,01	17,18
Коэффициент изменения расхода воды, $K_{\text{объем}}$	0,916	0,913
Изменение объема реализации коммунальной услуги по ГВС $\Delta \Pi_i$, млн.руб.	19,6	9,1

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Технологические потери теплоты в тепловых сетях.

Повышение температуры сетевой воды в подающем трубопроводе на $\Delta t_{гвс} = 4 \div 5$ °С приведет к пропорциональному изменению температуры обратной сетевой воды на ТЭЦ $t_{2i}^{закр}$, °С, определяемой по уравнению

$$t_{2i}^{закр} = t_{2i}^{закр} - (t_{1i}^{отк} - t_{2i}^{отк}) \cdot \frac{q_{гвсi}^{отр}}{q_{гвсi}^{закр}} \quad (15)$$

Определим изменения технологических потерь тепла при транспортировке теплоносителя по тепловым сетям в межотопительный и переходный периоды при повышении $t_{2i}^{закр}$. Для системы теплоснабжения г. Ульяновска межотопительный период длится с мая по сентябрь. Нормативная продолжительность переходного периода составляет два месяца. Изменение температуры в системе теплоснабжения пропорционально изменению тепловых потерь в трубопроводах системы ГВС.

Расчетное количество тепловых потерь в системе теплоснабжения определено по методике Приказа Минэнерго России от 30.12.2008 N 325 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя», результаты расчетов сведены в таблицах 5, 6.

Увеличение тепловых потерь в межотопительном периоде, обусловленное повышением температуры теплоносителя в подающем трубопроводе теплосети, составит, Гкал

$$Q_{тпi}^{ув} = \sum_{j=1}^n (Q_{jтп}^{закр} - Q_{jтп}^{отк}), \quad (16)$$

где $Q_{jтп}^{закр}$, $Q_{jтп}^{отк}$ – тепловые потери в j-ом месяце межотопительного и переходного периодов соответственно в закрытой и открытой системах, Гкал; n – количество месяцев переходного и межотопительного периода.

Увеличение тепловых потерь в межотопительном периоде, обусловленное повышением температуры теплоносителя в подающем трубопроводе теплосети, составит, Гкал

$$Q_{тпi}^{ув} = \sum_{j=1}^n (Q_{jтп}^{закр} - Q_{jтп}^{отк}), \quad (17)$$

где $Q_{jтп}^{закр}$, $Q_{jтп}^{отк}$ – тепловые потери в j-ом месяце межотопительного и переходного периодов соответственно в закрытой и открытой системах, Гкал; n – количество месяцев переходного и межотопительного периода.

Дополнительный ежегодный убыток от повышенных тепловых потерь трубопроводами теплосети, $\Pi_{тпi}$, руб., определяется по уравнению

$$\Pi_{тпi} = Q_{тпi}^{ув} \cdot b_{тi} \cdot \Pi_{тi}. \quad (18)$$

Результаты расчетов по уравнениям (17) и (18) приведены в таблицах 5, 6.

Таблица 5
Table 5

Потери тепловой энергии в тепловых сетях от ТЭЦ-1

Heat losses in heat networks from CHPP-1

месяц	открытая схема			закрытая схема			Изменение тепловых потерь $Q_{тп}^{ув}$, Гкал
	$t_1^{отк}$, °С	$t_2^{отк}$, °С	потери тепла, $Q_{тп}^{отк}$, Гкал	$t_1^{зак}$, °С	$t_2^{зак}$, °С	потери тепла, $Q_{тп}^{закр}$, Гкал	
май	70	52,3	21477	74	54,3	22389	912
июнь	70	52,3	20166	74	54,3	21047	881
июль	70	52,3	20213	74	54,3	21125	912
август	70	52,3	20176	74	54,3	21088	912
сентябрь	70	52,3	20129	74	56,3	21011	881
октябрь	67	43,5	21644	74	47	23303	1 659
апрель	67	43,5	21887	74	47	23490	1 603
Итого за год			145692			153453	7 761
Дополнительный убыток от тепловых потерь, $\Pi_{тп}$, млн. руб.							5,9

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Таблица 6
Table 6Потери тепловой энергии в тепловых сетях от ТЭЦ-2
Heat losses in heat networks from CHPP-2

месяц	открытая схема			закрытая схема			Изменение тепловых потерь $Q_{\text{тп}}^{\text{ув}}$, Гкал
	$t_1^{\text{отк}}$, °C	$t_2^{\text{отк}}$, °C	потери тепла, $Q_{\text{тп}}^{\text{отк}}$, Гкал	$t_1^{\text{зак}}$, °C	$t_2^{\text{зак}}$, °C	потери тепла, $Q_{\text{тп}}^{\text{закр}}$, Гкал	
май	68	55,6	12183	73	58,9	12769	586
июнь	68	55,6	14359	74	58,9	15062	703
июль	68	55,6	14548	74	58,9	15275	727
август	68	55,6	10204	74	58,9	10702	499
сентябрь	68	55,6	14415	74	58,9	15118	703
октябрь	67	43,5	14147	74	44,3	14749	602
апрель	67	43,5	14026	74	44,3	14607	581
Итого за год			93882			98282	4400
Дополнительные убыток от тепловых потерь, $\Pi_{\text{тп}}$, млн. руб.							2,7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Расчет объемов нереализованной теплоты, потребленной в переходный период.

Потребители, у которых погодозависимое регулирование в индивидуальном тепловом пункте отсутствует, в переходный период (в зоне действия «излома» температурного графика) получают избыточное количество тепла [15, 16]. Потребителям, не оснащенными узлами коммерческого учета тепловой энергии, плата за теплоснабжение определяется по нормативу без учета фактического, в том числе сверхнормативного, потребления.

Количество потребленного тепла в системе теплоснабжения за месяц, определенное расчетно-приборным методом, приведено в таблице 7.

Таблица 7
Table 7Количество потребленной тепловой энергии
Quantity of consumed heat energy

Месяц	ТЭЦ-1		ТЭЦ-2	
	Отпуск теплоты $Q_{\text{от1}}$, Гкал	Доля не оборудованных приборами учета абонентских систем отопления δ_1	Отпуск теплоты $Q_{\text{от2}}$, Гкал	Доля не оборудованных приборами учета абонентских систем отопления δ_2
окт.22	150082	8,2%	103370	1,3%
апр.23	122305	7,9%	77998	1,9%

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Относительный тепловой поток определяют в зависимости от расчетной и текущей температуры внутреннего воздуха, соответствующей температуры наружного воздуха и температуры наружного воздуха, расчетной для проектирования отопления, по формуле

$$q_{\text{оij}}^{\text{откр(закр)}} = (t_{\text{вij}} - t_{\text{н.фj}}) / (t_{\text{в.р}} - t_{\text{н.о}}), \quad (19)$$

где $t_{\text{вij}}$ – текущая температура внутреннего воздуха, °C; $t_{\text{н.фj}}$ – фактическая температура наружного воздуха при определенной температуре теплоносителя, °C; $t_{\text{в.р}}, t_{\text{н.о}}$ – расчетная температура соответственно внутреннего и наружного воздуха, °C.

При расчете относительного теплового потока учитывалось повышение температуры внутреннего воздуха в переходный период отопительного сезона в помещениях зданий с неавтоматизированными системами отопления.

Согласно температурному графику для системы теплоснабжения г. Ульяновска точка излома с параметрами теплоносителя в подающем трубопроводе равными 67, 73 и 74 °C должна выдерживаться при температуре наружного воздуха равной соответственно 2,96; 0,5 и 0,09 °C. С повышением температуры теплоносителя очевидно будет изменяться и фактическое теплопотребление абонентами, которое не будет оплачиваться потребителями с системами отопления, не оборудованными приборами учета тепловой энергии и теплоносителя. В этом случае определение потребленной тепловой энергии производится расчетным способом на основании утвержденных нормативов потребления тепловой энергии на отопление помещений, зданий и сооружений.

Расчет избыточно поставленного и нереализованного количества теплоты $\Pi_{\text{пер1}}$, руб., выполнен по уравнению (20)

$$P_{\text{пер}i} = \sum_{ij} Q_{\text{от}ij} \cdot \delta_{ij} \cdot (q_{\text{от}ij}^{\text{закр}} - q_{\text{от}ij}^{\text{откр}}) b_{\text{ти}} \cdot \Pi_{\text{ти}}, \quad (20)$$

где $Q_{\text{от}ij}$ – отпуск теплоты, Гкал; $q_{\text{от}ij}^{\text{закр}}, q_{\text{от}ij}^{\text{откр}}$ – соответственно относительный расход теплоты на отопление в закрытой и открытой системах; δ_{ij} – доля не оборудованных приборами учета абонентских систем отопления.

Результаты расчета по уравнениям (19) и (20) приведены в таблице 8.

Таблица 8
Table 8

Расход теплоты на отопление
Heat consumption for heating

Месяц переходного периода	Температура наружного воздуха, °С	Относительный расход теплоты на отопление		
		Открытая	Закрытая	
			ТЭЦ-1	ТЭЦ-2
окт.22	6,3	0,305	0,343	0,338
апр.23	9,1	0,289	0,327	0,321
Увеличение объемов нереализованного потребленного тепла в переходный период, $\Pi_{\text{пер}}$, млн.руб.			0,63	0,06

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Объем снижения выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Изменение температуры обратной сетевой воды приводит к пропорциональному изменению выработки электроэнергии на тепловом потреблении. При расчете изменения мощности теплофикационной турбины за счет изменения температуры обратной сетевой воды по методике [12, 17], изменение мощности турбины $\Delta N_{\text{тур}}$, кВт/МВт, можно определить в расчете на 1 МВт тепловой нагрузки отборов турбин

$$\Delta N_{\text{тур}} = 4 \cdot \Delta t_{\text{ос}} \cdot a \cdot \eta_{\text{эм}}, \quad (21)$$

где $\Delta t_{\text{ос}} = |t_{\text{ос}}^{\text{баз}} - t_{\text{ос}}^{\text{изм}}|$ – разность между базовой $t_{\text{ос}}^{\text{баз}}$ и измененной $t_{\text{ос}}^{\text{изм}}$ температурой обратной сетевой воды, °С; a – термодинамический коэффициент, учитывающий связь между температурой насыщения и теплоперепадом в точках адиабатического процесса расширения пара в турбине, кВт/(кг·°С). При параметрах свежего пара $P_{\text{п}}=12,8$ МПа и $t_{\text{п}}=565$ °С – $a = 0,95$; $\eta_{\text{эм}}=0,98$ – электромеханический КПД турбогенератора.

С учетом изменения температуры обратной сетевой воды в переходный период согласно таблицам (5)-(6), уменьшение выработки электроэнергии на тепловом потреблении, определенное по уравнению (21) составит 13,03 кВт на МВт мощности отборов для ТЭЦ-1 и 3 кВт/МВт – для ТЭЦ-2.

При мощности нижнего отбора 56,08 Гкал/ч (65,22 МВт) уменьшение мощности турбины Т-100-130 на ТЭЦ-1 составит 849,8 кВт. За переходный период потенциальная недовыработка электроэнергии на тепловом потреблении составит 1223712 кВт·ч. При равновесной цене на электроэнергию 4,5 руб./кВт·ч коммерческий ущерб от недовыработки электроэнергии составит 5,5 млн. руб.

При мощности нижнего отбора 135 Гкал/ч (157 МВт) уменьшение мощности турбины Т-185-130 на ТЭЦ-2 составит 471 кВт. За переходный период потенциальная недовыработка электроэнергии на тепловом потреблении составит 678240 кВт·ч. При равновесной цене на электроэнергию 4,5 руб./кВт·ч коммерческий ущерб от недовыработки электроэнергии составит 3,1 млн. руб.

Суммарный годовой объем потенциальных убытков от сохранения закрытой схемы ГВС на 5-ти ЦТП в системе теплоснабжения от ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 составляет более 88 млн. руб. Итоговые данные приведены в таблице 9.

Таблица 9
Table 9

Размер экономического убытка по каждому технико-экономическому показателю

Size of economic loss for each technical and economic indicator

Наименование технико-экономического показателя	Размер убытка, млн. руб. в год	
	ТЭЦ-1	ТЭЦ-2
Увеличение коммерческих потерь, обусловленных применением нормативного коэффициента на подогрев ГВС, $\Pi_{\text{кп}}$	31,1	10,8
Снижение объемов реализации в летний период, $\Delta \Pi$	19,6	9,1
Увеличение тепловых потерь трубопроводами теплосети, $\Pi_{\text{тп}}$	5,9	2,7
Увеличение объемов нереализованного потребленного тепла в переходный период, $\Pi_{\text{пер}}$, млн. руб.	0,63	0,06
Коммерческий ущерб от снижения выработки электроэнергии на тепловом потреблении	5,5	3,1
Итого	62,8	25,8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Следует отметить, что в отечественном теплоснабжении в соответствии с требованием федерального законодательства продолжает действовать норма о необходимости подключения систем ГВС вновь построенных зданий и сооружений к действующим тепловым сетям только по закрытой схеме. Одним из преимуществ закрытых систем ГВС обозначается более высокое качество горячей воды по сравнению с открытыми системами. Личный опыт авторов по эксплуатации открытых и закрытых систем ГВС и опыт других специалистов [1-4] свидетельствует об отсутствии каких-либо преимуществ закрытых систем перед открытыми.

На наш взгляд, в одной системе теплоснабжения схема подключения систем ГВС должна быть одинаковой у всех существующих и вновь подключаемых или переключаемых потребителей. Это позволит избежать множества проблем, которые уже сейчас возникают из-за этого в действующих системах теплоснабжения, особенно в условиях широко распространенной точечной застройки в городах, и повысить экономическую привлекательность централизованного теплоснабжения.

Заключение (Conclusions)

1. В отечественных системах теплоснабжения содержится значительный энергосберегающий потенциал, который возможно реализовать путем вывода из эксплуатации неэффективных котельных и переключения тепловой нагрузки на тепловые источники с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии.

2. Существенной особенностью, влияющей на экономическую эффективность такого переключения, является необходимость одновременно обеспечивать коммунальной услугой горячего водоснабжения в единой системе теплоснабжения потребителей, подключенных по открытой и закрытой схемам, в то время как режимные требования к этим системам различны.

3. В случае сохранения различных схем подключения потребительских систем горячего водоснабжения в системе теплоснабжения произойдет рост тепловых потерь во внутридомовых системах ГВС, обусловленный повышенным циркуляционным расходом; увеличатся технологические потери теплоты в тепловых сетях; уменьшится объем нереализованной теплоты в системах горячего водоснабжения в переходный период; снизятся объемы выработки электроэнергии на тепловом потреблении и реализованной теплоты на нужды горячего водоснабжения в межотопительный период.

4. Результаты выполненного технико-экономического исследования применительно к действующей открытой системе теплоснабжения г. Ульяновска свидетельствуют о ежегодных убытках в размере более 88 млн. руб., обусловленных переключением потребителей от котельных с закрытой схемой ГВС к централизованной открытой теплофикационной системе теплоснабжения, что подтверждает необходимость приведения всех схем подключения систем ГВС в одной системе теплоснабжения к одному типу.

Литература

1. Колесников А.Н. О переходе от открытых систем теплоснабжения и ГВС к закрытым (в трактовке 190-ФЗ) // Новости теплоснабжения. 2014. № 11.
2. Шарапов В.И. Проблемы трансформации открытых систем теплоснабжения в закрытые // СОК. 2019. № 7. С. 43-47.
3. Шарапов В.И., Орлов М.Е., Замалеев М.М., Чаукин П.Е. Модернизация теплофикационных систем городов: цели и практика. Надежность и безопасность энергетики. № 3. 2018. С. 184-191.
4. Зубанов А.А. Оценка эффективности перевода системы теплоснабжения с открытой схемы на закрытую в реальных условиях // Новости теплоснабжения. 2019. № 3. С. 8-14.
5. Дыскин А.В., Хараим А.А. Переключение нагрузки с котельных на ТЭЦ как эффективный способ оптимизации системы теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2020. № 1. С. 22-26.
6. Гашо Е.Г., Пузаков В.С., Гужов С.В. Анализ проблем и тенденции развития систем теплоснабжения крупных городов России // Теплоэнергетика. 2021. № 3. С. 75-88.
7. Гашо Е.Г., Пузаков В.С. Схемы теплоснабжения российских городов и реальная жизнь // Новости теплоснабжения. 2020. № 2. С. 8-22.
8. Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №5. С. 71-82.
9. Газизов Ф.Н., Ахметова И.Г. Разработка методики и программы анализа вариантов перевода на закрытую схему ГВС системы теплоснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2019. №3. С. 126-134.
10. Rafalskaya T.A. Modeling of variable operating modes of water-to-water heat exchangers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Science and Technology Conference. 2021. 1079. 022085.

11. Рафальская Т.А. Определение оптимального температурного перепада теплоносителей в теплообменниках систем теплоснабжения // Безопасность-2022. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Чита, 2022. С. 111-116.
12. Ротов П.В., Сивухин А.А., Ротова М.А., Гафуров Р.А., Горшков А.В. Об эффективности управления циркуляцией горячей воды // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 117-129.
13. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Gafurov R. A., Rotova M.A. About standards for hot water heating // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1683. 042017.
14. Rotov P.V., Rotova M.A., Gafurov R. A., Sivukhin A.A., Gorshkov A.V. Circulation management in hot water supply systems // Journal of Physics: Conference Series. 12. Сеп. "XII All Russian Conference "Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers", TPEAC 2021" 2022. С. 012034.
15. Горинов Ю.А., Анисимов П.Н., Егшин Е.В. Модернизация городских индивидуальных тепловых пунктов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 43-53.
16. Ротов П.В. О зонировании температурного графика центрального регулирования нагрузки теплофикационных систем // Промышленная энергетика. 2013. № 6. С. 21-25.
17. Яковлев Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б.В. Яковлев. – М. : Новости теплоснабжения, 2008. – 448 с.

Авторы публикации

Ротов Павел Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова», Ульяновский государственный технический университет. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6228-6401>, p.rotov@rambler.ru

Горшков Алексей Викторович – руководитель группы режимов и наладки филиала «Ульяновский» ПАО «Т Плюс».

Ротова Марина Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова», Ульяновский государственный технический университет.

References

1. Kolesnikov A.N. On the transition from open heat supply and hot water supply systems to closed ones (as interpreted 190-FZ) // Heat Supply News. 2014. № 11.
2. Sharapov V.I. Problems of transformation of open heat supply systems into closed // Plumbing. Heating. Conditioning. 2019. № 7. p. 43-47.
3. Sharapov V.I., Orlov M.E., Zamaleev M.M., Chaukin P.E. Modernization of heating systems of cities: goals and practices. Energy reliability and safety. № 3. 2018. P. 184-191.
4. Zubanov A.A. Assessment of the efficiency of the transfer of the heat supply system from an open scheme to a closed one in real conditions//Heat Supply News. 2019. № 3. p. 8-14.
5. Dyskin A.V., Kharaim A.A. Switching the load from boiler houses to thermal power plants as an effective way to optimize the heat supply system//Heat Supply News. 2020. № 1. p. 22-26.
6. Gasho E.G., Puzakov V.S., Guzhov S.V. Analysis of problems and trends in the development of heat supply systems in large cities of Russia//Teploenergetika. 2021. № 3. p. 75-88.
7. Gasho E.G., Puzakov V.S. Heat supply schemes of Russian cities and real life//Heat Supply News. 2020. № 2. p. 8-22.
8. Kikot E. A., Gazizov F. N. Choosing the structure of thermal generation in Russian cities when updating heat supply schemes // News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2020. T22(5). p. 71-82. <http://doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82>
9. Gazizov F.N., Akhmetova I.G. Development of a methodology and program for analyzing options for transferring to a closed hot water supply system scheme. News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2019. №3. p. 126-134. <http://doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-126-134>.
10. Rafalskaya T.A. Modeling of variable operating modes of water-to-water heat exchangers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference. 2021. 1079. 022085.
11. Rafalskaya T.A. Determination of the optimal temperature difference of coolants in heat exchangers of heat supply systems//Safety-2022. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Chita, 2022. p. 111-116.
12. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Rotova M.A., Gafurov R.A., Gorshkov A.V. On the effectiveness of hot water circulation management// News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2020. VOL. 22. № 6. p. 117-129. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-117-129>

13. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Gafurov R. A., Rotova M.A. About standards for hot water heating // Journal of Physics: Conference Series . 2020. 1683. 042017.
14. Rotov P.V., Rotova M.A., Gafurov R. A., Sivukhin A.A., Gorshkov A.V. Circulation management in hot water supply systems // Journal of Physics: Conference Series. 12. Сер. "XII All Russian Conference "Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers", TPEAC 2021" 2022. С. 012034.
15. Gorinov Yu.A., Anisimov P.N., Egoshin E.V. Modernization of urban individual heating points// News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2023. VOL. 25. № 6. S. 43-53. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-43-53>
16. Rotov P.V. On the zoning of the temperature schedule of the central regulation of the load of heating systems//Industrial power engineering. 2013. № 6. S. 21-25.
17. Yakovlev B.V. Improving the efficiency of heating and heat supply systems/B.V. Yakovlev. - М.: Heat supply news. 2008. 448 p.

Authors of the publication

Pavel V. Rotov – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-6228-6401>, p.rotov@rambler.ru

Alexey V. Gorshkov – PJSC T Plus, Ulyanovsk branch, Ulyanovsk, Russia.

Marina A. Rotova – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено	23.05.2024 г.
Отредактировано	30.05.2024 г.
Принято	02.09.2024 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Брагин Д.М., Мустафин Р.М., Попов А.И., Зинина С.А., Еремин А.В.

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

dimabragin2204@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ работы заключается в исследовании новых пористых материалов для применения в компактных высокоэффективных теплообменных устройствах. ЦЕЛЬ. Изучить гидро-аэродинамические свойства потоков, проходящих через пористые вставки на основе топологий трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП). Разработать методику исследования пористых материалов с упорядоченной пространственной структурой. Определить потенциально пригодные для применения в теплообменном оборудовании пористые материалы на основе ТПМП. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач были использованы численные (CFD) и экспериментальные методы. Для численного моделирования использовалось программное обеспечение Ansys Fluent 2019 R3. Опытные образцы для натурного эксперимента, проводимого на лабораторной установке ВЕНТ-08-7ЛР-01, были изготовлены при помощи аддитивных технологий SLA. Пористость образцов варьировалась от 0,73 до 0,89. Эксперимент проводился при скорости на входе в трубку от 0,3 до 4,5 м/с. РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам исследования получены новые эмпирические зависимости потерь давления от скорости потока для вставок на основе поверхностей: Primitive (P), Fischer Koch S (FKS), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP). Воздушный поток при прохождении через структуру N демонстрировал наибольшие потери давления, в то время как через структуру P потери при той же скорости были меньше в 8 раз. В пористых вставках выявлены застойные области, которые могут оказывать отрицательное воздействие на теплопередачу. Определены изменения локальной скорости потока в пористых вставках, коррелирующие с просветностью вставки. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования могут быть использованы для проектирования систем охлаждения с оребрением на основе ТПМП. Исходя из проведенного анализа распределения векторного поля скоростей и потерь давления, структуры FKS и IWP могут потенциально быть использованы в теплообменном оборудовании.

Ключевые слова: потери давления; пористый материал; оребрение; Primitive; Fischer Koch S; Neovius; Schoen's I-WP; трижды периодические минимальные поверхности.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-10044, rscf.ru/project/23-79-10044/.

Для цитирования: Брагин Д.М., Мустафин Р.М., Попов А.И., Зинина С.А., Еремин А.В. Исследование аэродинамических процессов в пористых материалах на основе трижды периодических минимальных поверхностей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 66-78. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-66-78.

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC PROCESSES IN POROUS MATERIALS BASED ON TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACES

Bragin D.M., Mustafin R.M., Popov A.I., Zinina S.A., Eremin A.V.

Samara State Technical University, Samara, Russia

dimabragin2204@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE:* The relevance of this work lies in the study of new porous materials for use in compact, highly efficient heat exchange devices. *PURPOSE:* To investigate the hydro-aerodynamic properties of flows passing through porous inserts based on triply periodic minimal surface (TPMS) topologies. To develop a methodology for studying porous materials with ordered structures. To identify potentially suitable TPMS-based porous materials for application in heat exchange equipment. *METHODS:* Numerical (CFD) and experimental methods were used to address the research objectives. Ansys Fluent 2019 R3 software was utilized for numerical modeling. Experimental samples for the physical experiments conducted on the VENT-08-7LR-01 laboratory setup were fabricated using SLA additive technologies. The porosity of the samples ranged from 0.73 to 0.89. The experiment was conducted with inlet velocities ranging from 0.3 to 4.5 m/s. *RESULTS:* New empirical dependencies of pressure drop on flow velocity were obtained for inserts based on the surfaces: Primitive (P), Fischer Koch S (FKS), Neovius (N), and Schoen's I-WP (IWP). The airflow through the N structure showed the highest pressure drop, while the P structure had 8 times less pressure drop at the same velocity. Stagnation zones, which can negatively impact heat transfer, were identified in the porous inserts. Changes in local flow velocity in the porous inserts were determined to correlate with the insert's transparency. *CONCLUSION:* The research results can be used for designing cooling systems with TPMS-based ribbing. Based on the analysis of the velocity vector field distribution and pressure drops, the FKS and IWP structures have potential applications in heat exchange equipment.

Keywords: Pressure Drop; Porous Material; Ribbing; Primitive; Fischer Koch S; Neovius; Schoen's I-WP; Triply periodic minimal surface.

Acknowledgments: This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 23-79-10044, rscf.ru/project/23-79-10044/.

For citation: Bragin D.M., Mustafin R.M., Popov A.I., Zinina S.A., Eremin A.V. Investigation of aerodynamic processes in porous materials based on triply periodic minimal surfaces. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 66-78. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-66-78.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

Компактное теплообменное оборудование находит применение в различных областях энергетики, машиностроения и т. д. Переход к компактным теплообменным аппаратам вызван необходимостью снижения их веса, объема и повышения мощности. Несмотря на развитие традиционного теплообменного оборудования, достижение оптимальных массогабаритных характеристик, низкого гидравлического сопротивления при высокой мощности ограничено их конструктивными особенностями [1]. В этой связи активно разрабатываются конструкции высокопроизводительных теплообменных устройств на основе новых методов проектирования теплообменных трактов [2]. В частности, для интенсификации теплообмена в теплообменных устройствах используются пористые материалы. Внедрение таких материалов повышает интенсивность теплообмена [3] и энергоэффективность [4, 5] с увеличением пористости.

Одними из наиболее перспективных пористых материалов для применения в теплообменных устройствах являются структуры на основе ТПМП (трижды периодических минимальных поверхностей). По сравнению с традиционными пористыми материалами структуры ТПМП обладают большей площадью поверхности [6], коэффициентами теплопередачи [7] и структурной прочностью [8] при аналогичных массогабаритных характеристиках. Так, например, тепловые свойства гироидной решетки на 55-136% превосходили аналогичные характеристики оребренного теплообменника [9].

По сравнению с другими пористыми структурами ТПМП также имеет ряд преимуществ. Структуры ТПМП описываются строгими математическими уравнениями, что позволяет регулировать теплопередающие свойства, изменяя геометрические параметры структуры, включая размер конструкций, период поверхности уровня, толщину стенки, пористость, площадь поверхности. Кривизна ТПМП равна нулю, что исключает резкие изменения направлений потока внутри структуры и соответственно снижает потери давления [10]. Особенность ТПМП делить пространство на два и более непересекающихся объема/лабиринта позволяет использовать такую структуру в рекуперативных теплообменниках с большой площадью теплообмена [11].

Наиболее перспективными среди исследованных на данный момент структур ТПМП являются поверхности Primitive (P), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP) и Fischer Koch S (FKS). Использование структуры «Р» в системе управления температурой аккумулятора с жидкостным охлаждением увеличивает рассеивания тепла на 25,2%, по сравнению с однородными листовыми конструкциями [12]. Структуры «N» и «IWP» интенсифицирует теплообмен за счет периодического ускорения и замедления потока, сопровождаемого вихрями, генерируемыми для улучшения перемешивания жидкости [13]. Структура «FKS» обладает наибольшей удельной площадью поверхности среди других ТПМП, описанных выше [14]. Конвективная составляющая теплопередачи в «FKS» больше, чем в «IWP» и «Р» на 78% и 96% соответственно.

Предыдущие исследования демонстрируют значительное увеличение эффективности при сокращении массы и объема тепломассообменного оборудования. Однако на данный момент не в полной мере исследованы гидродинамические процессы в ТПМП структурах, в частности, остаются неопределенными потери давления при прохождении через пористую вставку. Более того, любое изменение структурных параметров (пористость, размер и геометрия пор) оказывают влияние на гидродинамические процессы [15].

Определение потерь давления является одной из важнейших задач расчета теплообменного оборудования. Цель настоящего исследования заключается в определении потерь давления потока при прохождении через пористую вставку на основе четырех ТПМП топологии Primitive (P), Neovius, Schoen's I-WP и Fischer Koch S (FKS). Исследование выполнялось на основе численного моделирования и натурных экспериментов. Научная значимость исследования заключается в определении зависимостей потерь давления в пористых вставках на основе ТПМП и выявлении застойных зон. Практическая значимость заключается в определении потенциально пригодных для применения в теплообменном оборудовании пористых материалов на основе ТПМП. Ожидается, что данное исследование станет основой для будущей разработки компактных и эффективных теплообменников для прикладного применения в системах терморегулирования.

Материалы и методы (Materials and methods)

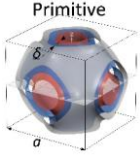
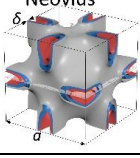
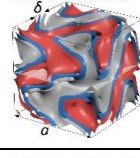
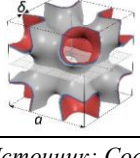
Формирование каналов и стенки ТПМП.

Таблица 1

Table 1

Уравнения ТПМП

TPMP equations

Название и изображение ТПМП	Общее уравнение нулевой поверхности уровня [16]	Частное уравнения поверхностей уровня $f(x, y, z, a) = \delta$ при $a = 10$ мм и $\delta = 0,5$ мм
	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0$	$\cos(2\pi x/10) + \cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi z/10) = \pm 0,25$
	$3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4\cos(x)\cos(y)\cos(z) = 0$	$3[\cos(2\pi x/10) + \cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi z/10)] + 4\cos(2\pi x/10)\cos(2\pi y/10)\cos(2\pi z/10) = \pm 0,25$
	$\cos(2x)\sin(y)\cos(z) + \cos(x)\cos(2y)\sin(z) + \sin(x)\cos(y)\cos(2z) = 0$	$\cos(4\pi x/10)\sin(2\pi y/10)\cos(2\pi z/10) + \cos(2\pi x/10)\cos(4\pi y/10)\sin(2\pi z/10) + \sin(2\pi x/10)\cos(2\pi y/10)\cos(4\pi z/10) = \pm 0,25$
	$2[\cos(x)\cos(y) + \cos(y)\cos(z) + \cos(z)\cos(x)] - [\cos(2x) + \cos(2y) + \cos(2z)] = 0$	$2[\cos(2\pi x/10)\cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi y/10)\cos(2\pi z/10) + \cos(2\pi z/10)\cos(2\pi x/10)] - [\cos(4\pi x/10) + \cos(4\pi y/10) + \cos(4\pi z/10)] = \pm 0,25$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Решетка ТПМП описывается поверхностями уровня, представленными в таблице 1. Величина δ является параметром смещения эквидистантных поверхностей от нулевой поверхности уровня ТПМП. Область, ограниченная эквидистантными поверхностями, образует стенку. Такие конструкции с конечной толщиной стенок δ из однородного материала известны как «листовые конструкции ТПМП» или «структуры ТПМП». Таким образом, вся геометрия структуры ТПМП с жидкостью в межпоровом пространстве может быть описана выражением:

$$f(x, y, z, a) = \begin{cases} f > \delta/2 \forall f \in \Omega_1(\text{жидкость}) \\ |f| \leq \delta/2 \forall f \in \Omega_2(\text{стенка}) \\ f < \delta/2 \forall f \in \Omega_3(\text{жидкость}) \end{cases}$$

где $\delta/2$ – константа уровня, определяющая параметр смещения эквидистантной поверхности и, соответственно, область Ω пористой вставки. Области Ω_1 и Ω_3 соответствуют полному набору извилистых путей в пористой вставке. Далее эти области будут называться каналами. Таким образом в ТПМП пористой вставке формируются два отдельных непересекающихся канала разделенных структурой ТПМП.

Размеры стенки и каналов могут быть изменены путем регулировки периода a , а также значения параметра смещения δ . Эти параметры напрямую влияют на другие характерные размеры, например, гидравлический диаметр, пористость. Для исследования пористых вставок на основе различных топологий ТПМП были выбраны постоянные одинаковые периоды $a = 10$ мм, а также одинаковые смещения $\delta = 0,5$ мм.

CFD моделирование.

В статье падение давления и форма течения в пористых вставках на основе ТПМП исследовалась с применением численного моделирования в программном комплексе Ansys Fluent 2019 R3. Воздушный поток внутри пористой вставки является турбулентным из-за высокого числа Рейнольдса и постоянного изменения сечения канала потока [17]. Для моделирования выбрана широко используемая модель турбулентности k-omega SST, поскольку она позволяет точно прогнозировать перепад давления. Чтобы поддерживать равный массовый расход на входе и выходе модели, уравнение неразрывности решается для установившегося потока:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

Уравнение сохранения импульса в декартовой тензорной форме записывается как:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i' u_j')$$

В этой модели не исследовались теплопередающие свойства структур ТПМП. Однако уравнение энергии было использовано для реализации свойств воздуха (вязкости и плотности) со значениями, соответствующими рабочей температуре 301 К. Уравнение энергии для турбулентного потока имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)](\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right)$$

Скорость на входе варьировалась от 0,9 м/с до 5 м/с. Температура воздуха выбрана постоянной и составляет 301 К.

Сетка для геометрий создается в модуле Ansys Fluent и представлена на рисунке 16. Выбор вида сетки был основан на исследованиях теплообменных аппаратов с оребрением [18]. Сетка состоит из многогранных элементов с пограничным слоем вблизи структур ТПМП. Анализ чувствительности сетки проводился для измерения точности моделирования в отношении количества ячеек сетки. Были приняты и сравнены пять размеров ячеек для каждой геометрии ТПМП. Перепад давления, полученный на самой мелкой сетке, сравнивался с результатами, полученными на других сетках, и оценивалась процентная разница. Результаты исследования независимости сетки представлены на рисунке 2. Таким образом, для расчета использовались модели, процентное расхождение потерь давления которых было меньше 1% для экономии вычислительного времени и сохранения точности расчета.

Натурный эксперимент.

Для проведения натурных экспериментов были использованы опытные образцы, представленные на рисунке 2а.

Изготовление экспериментальных образцов структур ТПМП возможно с

использованием аддитивных технологий селективного лазерного плавления (SLM), а также стереолитографии (SLA) [9]. Для текущего исследования были изготовлены 4 опытных образца с параметрами, представленными в таблице 2. После изготовления каждого опытного образца выполняются этапы последующей обработки с удалением остатков материалов, поддержек для 3D-печати, и т. д.

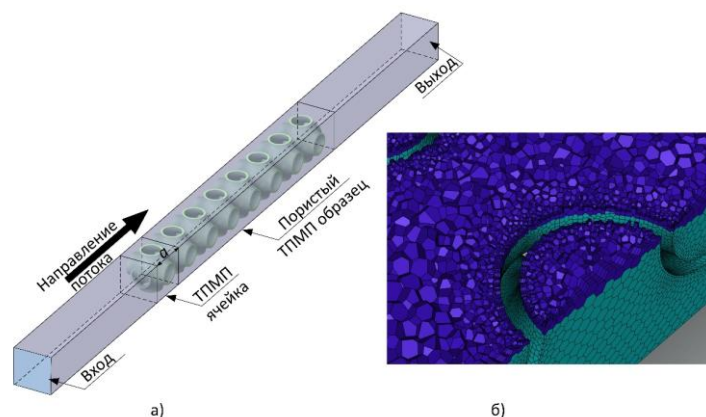


Рис. 1. а) схема проводимого эксперимента; Fig. 1. a) schematic of the conducted experiment;
б) расчетная сетка для CFD моделирования b) computational mesh for CFD modeling

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2
Table 2

Опытные образцы
Test samples

Наименование	Количество ячеек, шт	Размеры образца, мм	Пористость	Площадь поверхности, мм ²	Толщина стенки, мм
Primitive	5x5x10	50x50x100	0,89	457	0.5
Neovius	5x5x10	50x50x100	0.83	649	0.5
Schoen's I-WP	5x5x10	50x50x100	0.83	671	0.5
Fischer Koch S	5x5x10	50x50x100	0,73	984	0.5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эксперимент проводился на Лабораторной установке ВЕНТ-08-7ЛР-01 (рис. 3). Установка состоит из следующего оборудования: воздухозаборник, осевой вентилятор № 1, сотовый выпрямитель потока № 2, воздушонагреватель № 3, воздуховод № 4, переходник воздуховода с квадратного на круглый № 5, опытный образец № 6, манометр дифференциального давления № 7, трубка Пито № 8 и панель управления № 9. Сотовый выпрямитель используется для подавления осевой составляющей потока, нагнетаемого осевым вентилятором. Постоянная температура, а соответственно, постоянная плотность и вязкость поддерживается воздушонагревателем. В квадратном воздуховоде размещен опытный образец на базе ТПМП таким образом, чтобы весь поток проходил через внутреннее пространство образца. Расстояние между опытным образцом и переходником № 5 составляет 400 мм, чтобы исключить влияние переходных процессов. При прохождении воздушного потока через опытный образец поток теряет давление из-за высокого местного сопротивления. Манометр дифференциального давления измеряет падение давления. Скорость потока измеряется трубкой Пито рядом с выходным отверстием воздуховода. Дифференциальный манометр и трубка Пито подключены к панели управления, которая преобразует данные в цифровой формат и отображает их на дисплее. Частота вращения вентилятора варьировалась от 700 до 3000 об/мин, изменяя скорость воздушного потока от 0,3 до 4,5 м/с. Каждый эксперимент повторялся пять раз при одних и тех же рабочих и граничных условиях для определения диапазона неопределенности.

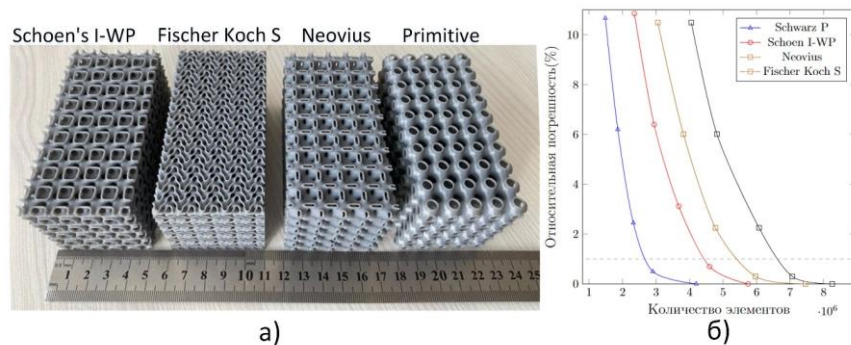


Рис. 2. а) фото опытных образцов структур Primitive (P), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP) и Fischer Koch S (FKS) б) анализ независимости сетки

Fig. 2. a) photos of test samples with Primitive (P), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP), and Fischer Koch S (FKS) structures; b) grid independence analysis

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

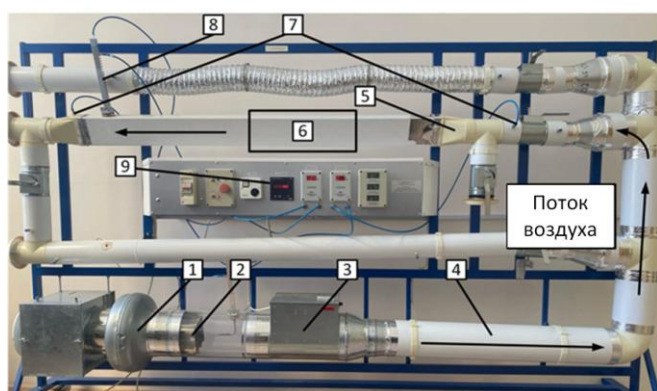


Рис. 3. Лабораторная установка ВЕНТ-08-7ЛР-01

Fig. 3. Laboratory setup VENT-08-7LR-01

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результаты численного моделирования потока, проходящего через структуры ТПМП, представлены на рисунке 4.

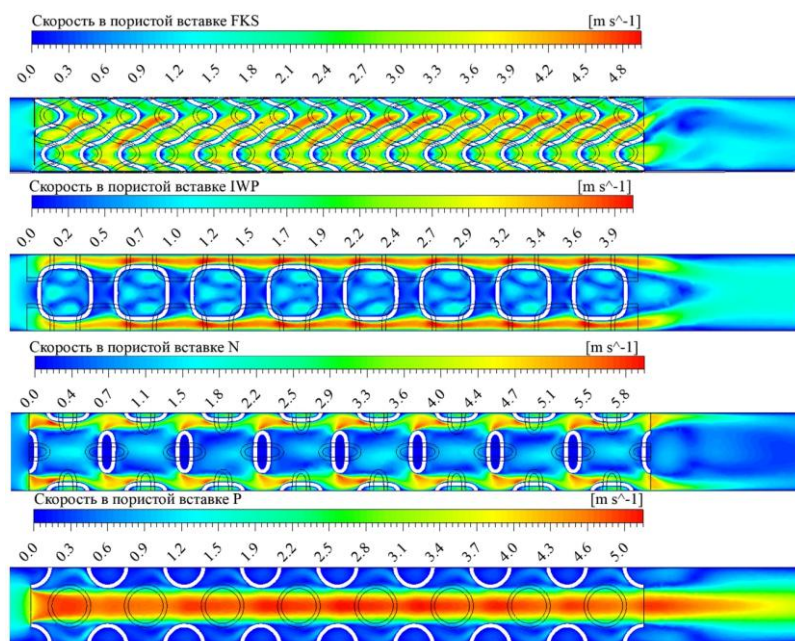


Рис. 4. Векторное поле распределения скорости потока в пористых вставках ТПМП при скорости на входе 0,9 м/с

Fig. 4. Vector field distribution of flow velocity in TPMS porous inserts at an inlet velocity of 0.9 m/s

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из распределения скорости, выявлены застойные (мертвые зоны), которые могут оказывать отрицательное влияние на теплоотдачу в пористых вставках. Форма потока во всех пористых вставках для первых двух ячеек незначительно отличается от последующих, что может увеличивать интенсивность теплообмена на начальной области пористой вставки [19]. У вставки FKS застойные области между ячейками практически отсутствуют, распределение скорости равномернее по сравнению с другими рассмотренными вставками. Важно отметить, что основной поток контактирует практически со всей поверхностью пористой вставки FKS, что важно для интенсификации теплоотдачи. Площадь теплообмена структуры FKS больше, чем у структуры Р [14], N [20], IWP на 186,52 и 46% соответственно.

Во вставке IWP и N внутри ячеек наблюдаются зоны обратного течения и, соответственно, дополнительная турбулизация потока, что согласуется с аналогичным исследованием [13]. Обратные течения и турбулентность потока играют доминирующую роль в усилении теплоотдачи, что необходимо учитывать при расчете теплообменных аппаратов [21]. Обратные течения вызваны ударами основного потока в стенку ячейки, что приводит к дополнительным потерям давления. В пористой вставке IWP по краям ячейки имеются области со скоростью до 4 раз выше, чем средняя скорость потока. В пористой вставке Р основной поток имеет трубчатую форму. На выходе из ячейки поток имеет форму сопла с максимальной скоростью до 5 раз выше, чем средняя по сечению. Вне трубчатого потока наблюдаются незначительные завихрения и застойные области. Площадь контакта основного потока и структуры Р имеет минимальное значение по сравнению с другими рассмотренными ТПМП.

Кроме изменений направлений потока во всех ТПМП вставках также наблюдается локальная изменчивость скорости, которая коррелируется с просветностью структуры (рис. 5). У вставки Primitive количество экстремумов локальной скорости и средняя скорость (1,08 м/с) по сравнению с другими вставками минимальны. Изменение локальной скорости более плавны/сглажены. У вставок IWP и N наблюдаются наибольшие максимумы производной локальной скорости, а графики изменения скорости схожи. Максимальное количество экстремумов (16) и наибольшая средняя скорость (1,25 м/с) наблюдаются во вставке FKS.

На рисунке 6 представлены контуры падения давления в различных пористых вставках. Для всех пористых вставок наблюдается дифференциация потерь давления при переходе из одной ячейки в другую. Соответственно, целесообразно рассматривать падение давления в пористой вставке как сумму потерь в каждой ячейке по ходу движения потока (рис. 7). Таким образом, общее уравнение потерь давления потока в пористой вставке может быть представлено эмпирической зависимостью:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{c v^{1.75}}{a}, \quad (1)$$

где L – длина пористой вставки; c – коэффициент, зависящий от заданной температуры потока, вязкости, плотности, размера пор и пористости, представлен в таблице 3. В дальнейших работах планируется определить коэффициент « c » как функцию от этих параметров.

Таблица 3
Table 3

Коэффициент « c » для уравнения потерь давления (1)
Coefficient “ c ” for pressure loss equation (1)

Primitive	Neovius	Schoen's I-WP	Fischer Koch S
3.9	32	6	13.8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

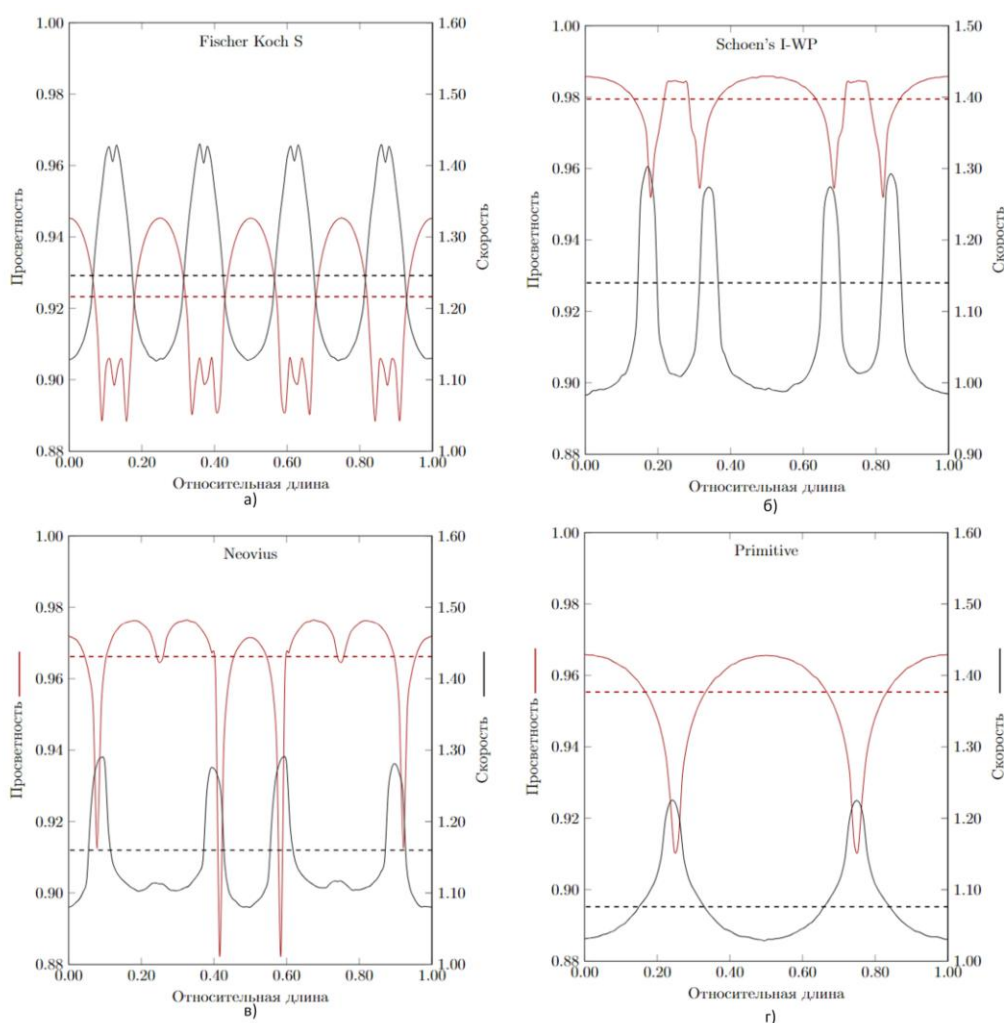


Рис. 5. Локальная изменчивость средней скорости в направлении движения потока в ячейке ТПМП в зависимости от просветности: а) вставка FKS; б) вставка IWP; в) вставка N; г) вставка P

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Воздушный поток, проходящий через пористую вставку Primitive, теряет наименьшее давление среди исследуемых структур. Это объясняется наибольшей пористостью, минимальной средней скоростью потока и прямолинейной трубчатой формой основного потока с минимальным количеством сужений/расширений, что препятствует возникновению обратных течений, снижает влияние ударов основного потока о структуру. Также трубчатая форма потока в пористых материалах сокращает извилистость течения, что приводит к сокращению пути и, соответственно, снижению потерь давлений [22].

Поток воздуха, проходящий через пористую вставку IWP, теряет давление на 54% больше, чем через вставку P. Это связано с большей извилистостью, средней скоростью и количеством экстремумов изменений локальной скорости по сравнению с вставкой P. Несмотря на схожесть форм пористых вставок IWP и N, потери в последней больше в 5 раз. Это объясняется тем, что во вставке N основной поток ударяется в стенку, что способствует возникновению значительных обратных течений по всему объему ячейки и соответственно дополнительным потерям давления. Более того, у вставки N наблюдается четыре области с максимальным, среди рассмотренных вставок, изменением просветности (0,05-0,085), что приводит к изменениям локальной скорости и направлению потока.

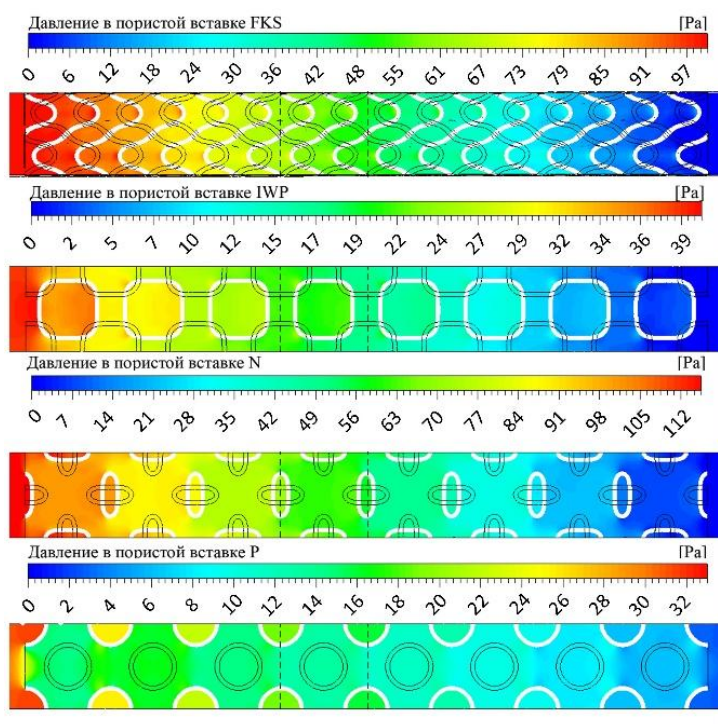


Рис. 6. Падение давления в пористой вставке при скорости 0,9 м/с Fig. 6. Pressure drop in the porous insert at a velocity of 0.9 m/s

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

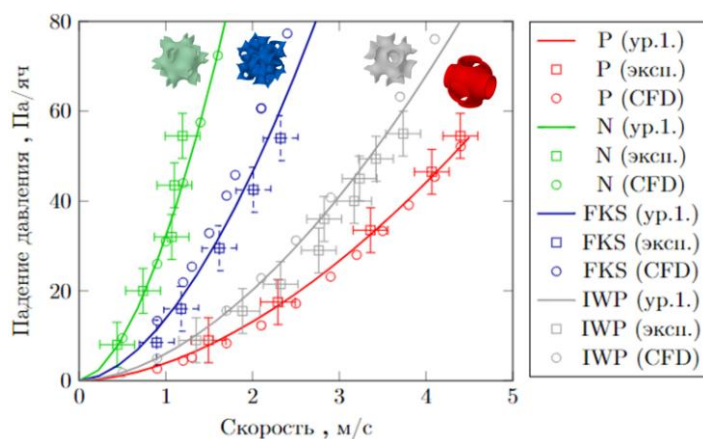


Рис. 7. Падение давления на 1 ячейку ТПМП от скорости. Численные (CFD) и натурные (эксп.) эксперименты, эмпирическая зависимость (ур. 1) Fig. 7. Pressure drop per unit TPMS cell as a function of velocity. Numerical (CFD) and experimental results, empirical relationship (Eq. 1)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Несмотря на наибольшую извилистость потока и максимальное количество экстремумов во вставке FKS, потери давления в ней меньше, чем в N на 130%. Это объясняется плавными поворотами основного потока и минимальными застойными областями по сравнению с другими пористыми вставками. Также у вставки FKS большинство экстремумов просветности не приводят к значительным изменениям скорости и направления потока, что согласуется с другими аналогичными исследованиями [13].

Закключение (Conclusions)

В настоящей работе были исследованы характеристики воздушного потока в пористых вставках на основе четырех поверхностей ТПМП: Primitive, Neovius, Schoen I-WP, Fischer Koch S. Численный и экспериментальный методы были использованы для определения эмпирического уравнения потерь давления от скорости в различных пористых вставках при различных граничных условиях.

Основные результаты, следующие:

1. Определены формы воздушного потока, проходящего через пористые вставки.

Выявлены застойные области, которые могут отрицательно сказываться на теплопередачу в пористых вставках.

2. Представлены графики изменения локальной скорости потока в пористых вставках, коррелирующие с просветностью. Минимальные изменения локальной скорости по сравнению с другими пористыми вставками наблюдаются в вставке Primitive.

3. Получено эмпирическое уравнения потерь давления потока от скорости при прохождении через различные пористые вставки.

4. Максимальное падение давления потока демонстрирует вставка Neovius, в то время как вставка Primitive при этой же скорости имеет падение давления в 8 раз меньше.

Результаты исследования могут стать основой для будущей разработки компактных и эффективных теплообменников. Структура Primitive имеет ряд недостатков для применения в теплообменном оборудовании, в частности обширные (более 30% объема) застойные области и меньшая по сравнению с другими ТПМП площадь контакта основного потока со структурой. Структура N может потенциально быть использована в тепломасообменном оборудовании, однако потери давления, вызванные ударами потока и обратными течениями, снижают безразмерный коэффициент Кольберна. Исходя из проведенного анализа распределения векторного поля скоростей и потерь давления, структуры FKS и IWP могут потенциально быть использованы в теплообменном оборудовании. Вставка FKS имеет максимальные среди рассмотренных площадь контакта и минимальные застойные области. Вставка IWP обладает большей площадью поверхности и меньшими потерями давления в 5 раз по сравнению с вставкой N.

В дальнейшем планируется проведение расширенного исследования структур FKS и IWP, в которых будет учтено влияние переменной вязкости, пористости и других факторов, влияющих на безразмерный коэффициент Кольберна.

Литература

1. Gürel B. et al. Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern //Applied Thermal Engineering. – 2020. – Т. 175. – С. 115309. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115309
2. Attarzadeh R., Attarzadeh-Niaki S. H., Duwig C. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery //Applied Thermal Engineering. – 2022. – Т. 212. – С. 118448. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118448
3. Рыдалина Н.В., Аксенов Б.Г., Степанов О.А., Антонова Е.О. Применение пористых материалов в теплообменных аппаратах системы теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3 С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13
4. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Талипова А.Р., Шакурова Р.З., Гилязов А.И. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). С. 56-64.
5. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Ваньков Ю.В., Ахметова И.Г., Шакурова Р.З., Талипова А.Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 55-69. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-69
6. Yeranee K., Rao Y. A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS) //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 23. – С. 8994. doi.org/10.3390/en15238994
7. Alteneiji M. et al. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers //Energy Storage and Saving. – 2022. – Т. 1. – №. 3. – С. 153-161. doi.org/10.1016/j.enss.2022.04.005
8. Qiu N. et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures //International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Т. 261. – С. 108657. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108657
9. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 82-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104.
10. Qian C. et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of copper heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2024. – Т. 152. – С. 107292. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107292
11. Dharmalingam L. K., Aute V., Ling J. Review of triply periodic minimal surface (TPMS) based heat exchanger designs. – 2022.

12. Fan Z., Gao R., Liu S. A novel battery thermal management system based on P type triply periodic minimal surface //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Т. 194. – С. 123090. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123090
13. Wang J. et al. Investigation on flow and heat transfer in various channels based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) //Energy Conversion and Management. – 2023. – Т. 283. – С. 116955. doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116955
14. Knödler P., Dreissigacker V. Fluid Dynamic Assessment and Development of Nusselt Correlations for Fischer Koch S Structures //Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 3. – С. 688. doi.org/10.3390/en17030688
15. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Обзор применения высокопористых ячеистых теплообменников // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.
16. Hsieh M. T., Valdevit L. Minisurf–A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing //Software Impacts. – 2020. – Т. 6. – С. 100026. doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100026
17. Yeranev K. et al. Turbulent Flow Heat Transfer and Thermal Stress Improvement of Gas Turbine Blade Trailing Edge Cooling with Diamond-Type TPMS Structure //Aerospace. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 37. doi.org/10.3390/aerospace11010037
18. Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 176-186. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.
19. Соловьева О. В., Яфизов Р. Р., Соловьев С. А. Определение эффективной длины пористой структуры при конвективном теплообмене //Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. №. 3 (47). С. 113-122.
20. Iyer J. et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces //Applied Thermal Engineering. – 2022. – Т. 209. – С. 118192. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118192
21. Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Моделирование температурных профилей и эффективности теплообменных аппаратов с интенсификаторами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 12-18. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-12-18
22. Sauermoser-Yri M. et al. On the porosity-dependent permeability and conductivity of triply periodic minimal surface based porous media //Journal of materials research and technology. – 2023. – Т. 27. – С. 585-599. doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.242

Авторы публикации

Брагин Дмитрий Михайлович – мл. науч. сотр. кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: dimabragin2204@yandex.ru.

Мустафин Равиль Мансурович – ст. преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика». Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-3784-2829>. Email: ravil-bk211@mail.ru.

Попов Андрей Игоревич – ст. преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: popov.ai@samgtu.ru.

Зинина Софья Алексеевна – мл. науч. сотр. кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0002-9104-1336>. Email: sofazinina4@gmail.com.

Еремин Антон Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2614-6329>. Email: a.v.eremin@list.ru.

References

1. Gürel B. et al. Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern //Applied Thermal Engineering. – 2020. – Т. 175. – С. 115309. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115309

2. Attarzadeh R., Attarzadeh-Niaki S. H., Duwig C. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – Т. 212. – С. 118448. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118448
3. Rydalina NV, Aksenov BG, Stepanov OA, Antonova EO. Application of porous materials in heat exchangers of heat supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.
4. Soloveva OV, Solovev SA, Talipova AR, Shakurova RZ, Gilyazov AI. Study of the influence of the porosity of a fibrous material on the energy efficiency value. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022;14;1(53):56-64.
5. Soloveva OV, Solovev SA, Vankov YuV, Akhmetova IG, Shakurova RZ, Talipova AR. Determination of the effect of the open cell foam material geometry on the value of energy efficiency. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):55-69. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-69
6. Yeranee K., Rao Y. A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS) // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – №. 23. – С. 8994. doi.org/10.3390/en15238994
7. Alteneiji M. et al. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers // *Energy Storage and Saving*. – 2022. – Т. 1. – №. 3. – С. 153-161. doi.org/10.1016/j.enss.2022.04.005
8. Qiu N. et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2024. – Т. 261. – С. 108657. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108657
9. Soloveva OV, Solovev SA., Shakurova RZ. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(1): 82-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104.
10. Qian C. et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of copper heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Т. 152. – С. 107292. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107292
11. Dharmalingam L. K., Aute V., Ling J. Review of triply periodic minimal surface (TPMS) based heat exchanger designs. – 2022.
12. Fan Z., Gao R., Liu S. A novel battery thermal management system based on P type triply periodic minimal surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Т. 194. – С. 123090. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123090
13. Wang J. et al. Investigation on flow and heat transfer in various channels based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Т. 283. – С. 116955. doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116955
14. Knödler P., Dreissigacker V. Fluid Dynamic Assessment and Development of Nusselt Correlations for Fischer Koch S Structures // *Energies*. – 2024. – Т. 17. – №. 3. – С. 688. doi.org/10.3390/en17030688
15. Solovev SA., Soloveva OV., Shakurova RZ., Golubev YaP. OVERVIEW OF THE APPLICATION OF OPEN CELL FOAM HEAT EXCHANGERS. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (1): 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.
16. Hsieh M. T., Valdevit L. Minisurf–A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing // *Software Impacts*. – 2020. – Т. 6. – С. 100026. doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100026
17. Yeranee K. et al. Turbulent Flow Heat Transfer and Thermal Stress Improvement of Gas Turbine Blade Trailing Edge Cooling with Diamond-Type TPMS Structure // *Aerospace*. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 37. doi.org/10.3390/aerospace11010037
18. Badretdinova GR, Kalimullin IR, Zinurov VE, Dmitriev AV. Evaluation of turbulence models in the external flow around the heated pipe. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(2): 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.
19. Soloveva OV, Yafizov RR, Solovev SA. THE POROUS STRUCTURE EFFECTIVE THICKNESS DETERMINATION IN THE CASE OF CONVECTIVE HEAT EXCHANGE // *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. – 2020;12;3(47):113-122.
20. Iyer J. et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – Т. 209. – С. 118192. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118192
21. Farakhov TM, Laptev AG. Modeling of temperature profiles and efficiency of heat transfer equipment with intensifiers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):12-18. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-12-18.
22. Sauermoser-Yri M. et al. On the porosity-dependent permeability and conductivity of triply

Authors of the publication

Dmitry M. Bragin – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: dimabragin2204@yandex.ru.

Ravil M. Mustafin – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3784-2829>. Email: ravil-bk211@mail.ru.

Andrey I. Popov – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: popov.ai@samgtu.ru.

Sofia A. Zinina – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9104-1336>. Email: sofazinina4@gmail.com.

Anton V. Eremin – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2614-6329>. Email: a.v.eremin@list.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **01.07.2024 г.**

Отредактировано **29.08.2024 г.**

Принято **02.09.2024 г.**



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Иванов И.А., Котин Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
i.a.ivanov@corp.nstu.ru, d.kotin@corp.nstu.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке алгоритма управления преобразователем постоянного напряжения, обеспечивающего качественный переходной процесс при широком изменении входных параметров объекта управления, влияющих на его нелинейные свойства. ЦЕЛЬ. Рассмотреть методы разработки непрерывных и дискретных систем управления повышающим преобразователем постоянного напряжения и получить аналитическую зависимость учета нелинейных свойств объекта управления, влияющих на качество регулирования выходного напряжения стабилизатора напряжения. МЕТОДЫ. В качестве метода расчёта коэффициентов системы управления преобразователем постоянного напряжения был выбран метод разделения движения, причем контур тока настраивается на технический оптимум, а контур напряжения на симметричный оптимум. Сравнение полученных аналитических решений математических моделей и имитационных моделей производилось в программной среде SimInTech. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты моделирования показывают, что аналитическое решение математической модели системы стабилизации напряжения имеет меньшее время переходного процесса, чем результаты имитационного моделирования. Это объясняется тем, что в математической модели, по которой синтезировался непрерывный алгоритм управления, не учитывается наличие силового входного фильтра, а также степень предзаряда силовых конденсаторов. Из-за чего время переходного процесса в имитационных моделях протекает медленнее, примерно в 4 раза, чем в математической модели. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При сравнении алгоритмов управления между собой видно, что алгоритм, полученный путем переоборудования непрерывного алгоритма методом Тустена имеет наименьшее время переходного процесса, чем остальные разработанные алгоритмы. Непрерывный алгоритм и алгоритм, полученный методом обратного преобразования Эйлера, имеют близкое к друг другу быстродействие, а самым медленным является алгоритм, полученный прямым преобразованием Эйлера.

Ключевые слова: синтез регулятора; ПИД-регулятор; самоподстройка; boost преобразователь; SimInTech; DC/DC преобразователь.

Для цитирования: Иванов И.А., Котин Д.А. Разработка алгоритма управления повышающим преобразователем с возможностью динамической коррекции параметров системы управления // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 5. С. 79-91. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-79-91.

DEVELOPMENT OF A CONTROL ALGORITHM FOR A BOOST CONVERTER WITH THE POSSIBILITY OF DYNAMIC CORRECTION OF CONTROL SYSTEM PARAMETERS

Ivanov I.A., Kotin D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
i.a.ivanov@corp.nstu.ru, d.kotin@corp.nstu.ru

Abstract: RELEVANCE of the study lies in the development of an algorithm for controlling a DC voltage converter capable of providing a high-quality transient process with a wide

change in the input parameters of the control object, affecting its nonlinear properties. purpose. THE PURPOSE. To consider methods for the development of continuous and discrete control systems for a step-up DC voltage converter and to obtain an analytical dependence of accounting for the nonlinear properties of the converter that affect the quality of regulation of the output voltage of the voltage stabilizer METHODS. The method of the average geometric root was chosen as a method for calculating the coefficients of the DC voltage converter control system, and the current circuit is adjusted using the technical optimum method, and the voltage circuit using the symmetric optimum method. The obtained analytical solutions of mathematical models and simulation models were compared in the SimInTech software environment. results. RESULTS. The simulation results show that the analytical solution of the mathematical model of the voltage stabilization system has a shorter transition time than the simulation results. This is due to the fact that in the mathematical model according to which the continuous control algorithm was synthesized, the presence of a power input filter, as well as the degree of their precharge, is not taken into account. Because of this, the transition time on simulation models is slower, applied 4 times than in the mathematical model. conclusion. CONCLUSION. When comparing the algorithms with each other, it can be seen that the algorithm obtained by converting a continuous algorithm by the Tusten method has the shortest transition time than all other algorithms. The continuous algorithm and the algorithm obtained by the inverse Euler transformation method have a speed close to each other, and the algorithm obtained by the direct Euler transformation turns out to be the slowest.

Keywords: controller synthesis; PID controller; self-tuning; boost converter; SimInTech; DC/DC converter.

For citation: Ivanov I.A., Kotin D.A. Development of a control algorithm for a boost converter with the possibility of dynamic correction of control system parameters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 79-91. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-79-91.

Введение (Introduction)

Современные тенденции развития энергетики диктуют активное внедрение в систему электроснабжения принципов распределённой генерации с использованием возобновляемых источников энергии [1–5]. Системы электроснабжения выстроенные по выше озвученным признакам способны обеспечить высокую степень автономности и надежности функционирования системы электроснабжения. За счет использования принципа распределённой генерации и локального управления энергосистемой, выстроенной по принципу microgrid, данные комплексы могут иметь разную архитектуру. Применение возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения вызывает необходимость в обеспечении синхронизации напряжения в узлах агрегации нескольких источников энергии [5, 6]. Наиболее популярной архитектурой microgrid является комплекс с общей шиной постоянного напряжения, пример структурной схемы которой представлен на рисунке 1.

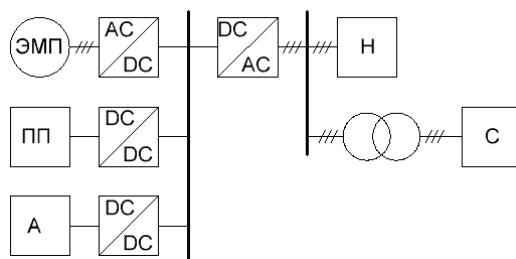


Рис. 1. Система электроснабжения с промежуточной шиной постоянного напряжения: ЭМП – электромеханический преобразователь, ПП – полупроводниковый преобразователь, А – аккумуляторная батарея, AC/DC – выпрямитель, DC/DC – преобразователь постоянного напряжения, DC/AC – инвертор, Н – нагрузка, С – сеть

Fig. 1. Power supply system with intermediate DC bus: EMF – electromechanical converter, PP – semiconductor converter, A – battery, AC/DC – rectifier, DC/DC – direct voltage converter, DC/AC – inverter, N – load, C – network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно рисунку 1, за счет того, что данная схема имеет общую шину постоянного тока, отсутствует необходимость в наличии систем управления, отвечающих за синхронизацию частоты, фазовой автоподстройки частоты. Данное решение позволяет объединять в единую энергетическую систему большое количество различных источников энергии и перераспределять между ними нагрузку, за счет чего происходит выравнивание значения выпрямленного напряжения на шине постоянного напряжения. Одной из задач при проектировании, создании и эксплуатации электротехнических комплексов, возникающей при создании энергетических агрегации, является стабилизация уровня напряжения, например, его повышение до требуемого значения.

В такого рода задачах используют стабилизатор напряжения, которым, например, может выступать преобразователь постоянного напряжения, выполненный по схеме boost преобразователя, представленной на рисунке 2 [7, 8].

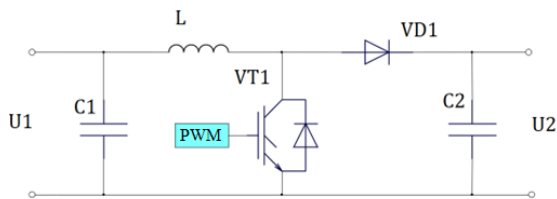


Рис. 2. Повышающий DC/DC преобразователь Fig. 2. Boost DC/DC converter

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Преимущество данной схемы перед другими схемами повышающих преобразователей заключается в простоте схемы, за счет чего упрощается организация управления полупроводниками и снижаются потери в системе [9, 10].

Литературный обзор (Literature Review)

Главной трудностью при использовании преобразователя постоянного напряжения является не топология схемы преобразователя, а метод выбора синтеза системы управления. Существует большое разнообразие методов синтеза системы управления преобразователем, но многие из них являются недостаточным в функциональном плане, с точки зрения организации качественных переходных процессов, а другие избыточными с точки зрения соотношения сложности расчета системы управления и требуемых вычислительных мощностей микропроцессора. Рассмотрим ряд методов синтеза систем управления для повышающего преобразователя, для более глубокого понимания степени развития методов синтеза. В большинстве случаев система управления для boost преобразователя основывается на применении ПИД регулятора, а именно, на ПИ-регуляторе [7, 11-15]. Главным отличием рассмотренных работ [7, 8, 11-15] является использование различных методик определения параметров регуляторов системы управления или обеспечение адаптивности системы управления. Так в работе [11] описана методика использования нечеткой логики для определения параметров регулятора алгоритма управления, что позволяет обеспечить работу регулятора в широком диапазоне изменений входного напряжения. В [12, 13] авторам предлагаются более традиционные способы определения коэффициентов регуляторов системы управления. В данных работах предлагается синтезировать регулятор классическим способом с использованием различных подходов к линеаризации объекта управления. А в работах [7, 11-15] рассматриваются более сложные методики, предполагающие наличие адаптивных подсистем в системе управления, определяющих режимы работы всей системы для корректировки параметров регулятора, например, функцией Ляпунова. Также в большом количестве работ рассматриваются разработки дискретных регуляторов [16-23]. Так, например, в работах [24-28] предлагаются к рассмотрению дискретные адаптивные регуляторы, полученные путем переоборудования линейного регулятора и его модификации.

Существует большое разнообразие вариантов синтеза регуляторов для систем стабилизации напряжения, начиная от простых одноконтурных систем, имеющих только контур стабилизации уровня напряжения, до многоконтурных с дополнительными подсистемами самонастройки, коррекции и контурами оптимизации.

В данной работе целью исследования предлагается рассмотреть разработку контура тока и контура напряжения boost преобразователя. Научной и практической значимостью работы являются анализ функционирования цифровых регуляторов, полученных путем переоборудования непрерывного регулятора, а также методика и

алгоритмы самонастройки регулятора для учета влияние нелинейного характера поведения стабилизатора.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для реализации структурного и параметрического синтеза алгоритмов управления компонента электротехнического комплекса был произведен анализ поведения системы, а именно, проведя анализ поведения тока от соотношения длительности промежутков времени и величин напряжений была получена регулировочная характеристика, описывающая среднее значение тока, протекающего через дроссель [7, 8, 29-31]:

$$I_2 = \frac{1}{2lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2 - U_1} D^2, \quad (1)$$

где l – значение индуктивности дросселя,
 $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ сигнала,
 D – скважность.

Из формулы (1) видно, что среднее значение тока имеет нелинейную зависимость от значения скважности транзистора. Для того чтобы учесть нелинейность в параметрах регулятора, можно использовать метод линеаризации малым приращением, который заключается в определении производной функции в рабочей точке:

$$K_{\text{лин}} = \left. \frac{dI_2}{dD} \right|_{D_0} = \frac{1}{lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2 - U_1} D_0, \quad (2)$$

где D_0 – значение скважности рабочей точки.

С учётом (2) и зависимостей, определяющих рабочую точку [2, 3], передаточная функция объекта управления будет представлять из себя пропорциональное звено:

$$W_{I_2}(s) = \frac{I_2(s)}{D(s)} = \frac{D_0}{lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2 - U_1} = \frac{1}{lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2}. \quad (3)$$

Для расчета системы управления произведём настройки по желаемой передаточной функции. Так как объект управления представлен в виде коэффициент пропорциональности, то для реализации астатический системы управления достаточно, чтобы регулятор представлял из себя только И-регулятор. На основании выше сказанного построим структурную схему контура тока (рис. 3).

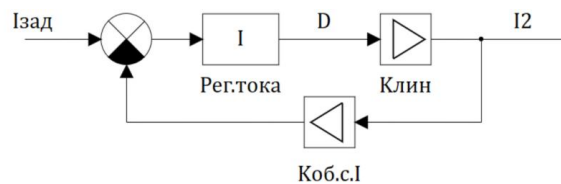


Рис. 3. Структурная схема регулятора тока

Fig. 3. Block diagram of the current regulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Помимо этого, так как данная система является дискретной системой регулирования, за счет использования в системе ШИМ, то необходимо выполнить условие теоремы Котельникова, или теоремы отсчёта, которая определяет соотношение постоянных времени системы регулирования с частотой ШИМ сигнала. Выполнение данной теоремы позволяет произвести расчет коэффициентов регуляторов, считая, что вся система линейна.

Передаточная функция контура имеет вид:

$$W_I(s) = \frac{K_{I2}^{-1}}{(K_{\text{лин}} K_{\text{ИИ}} K_{I2})^{-1} s + 1}, \quad (4)$$

где K_{I2} – коэффициент обратной связи по току,

$K_{\text{ИИ}}$ – коэффициент интегральной части регулятора.

Для выполнения теоремы отсчета определим новую частоту сопряжения системы управления:

$$\omega_{\text{ШИМ}} = 2\pi f_{\text{ШИМ}}, \quad (5)$$

$$\omega_I = \omega_{\text{ШИМ}} K_I^{-1} \quad (6)$$

где $\omega_{\text{ШИМ}}$ – циклическая частота ШИМ,

ω_I – частота сопряжения контура управления,

K_I – коэффициент разделения частот сопряжения, выбираемый при настройке регулятора.

После определения новой частоты сопряжения определим желаемую передаточную функцию:

$$W_I(s) = \frac{1}{\omega_I^{-1}s + 1}. \quad (7)$$

Приравняв соответствующие друг другу коэффициенты из (4) и (7), определим коэффициент интегрального звена

$$K_{II} = \omega_I (K_{I2} K_{\text{лин}})^{-1}. \quad (8)$$

Для определения $K_{\text{лин}}$, можно как произвести расчет его значения из функции, так и построить регулировочную характеристику и определить тангенс угла наклона касательной, используя уравнения (1) – (3).

Опираясь на все вышеописанные принципы и условия синтеза контура регулирования, проведем анализ данного контура. Так как постоянная времени у передаточной функции выходного фильтра (C2) преобразователя значительно больше постоянной времени контура тока, то исключив влияние аperiodической составляющей контура тока, можно оставить только пропорциональную часть данного звена, а именно значение коэффициента передачи звена.

В получившейся системе при использовании настройки на желаемую передаточную функцию можно воспользоваться ПИ-регулятором. С учётом этого получим структурную схему контура напряжения (рис. 4).

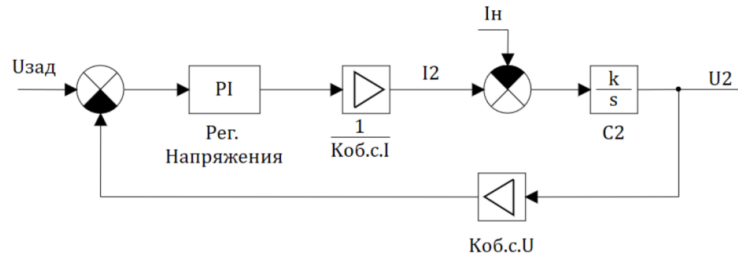


Рис. 4. Структурная схема контура напряжения Fig. 4. Block diagram of the voltage circuit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Тогда передаточная функция контура напряжения имеет вид:

$$W_U(s) = \frac{K_{\text{УП}}(C_2 K_{I2})^{-1}s + K_{\text{УИ}}(C_2 K_{I2})^{-1}}{s^2 + K_{\text{УП}}K_{U2}(C_2 K_{I2})^{-1}s + K_{\text{УИ}}K_{U2}(C_2 K_{I2})^{-1}}, \quad (9)$$

где K_{U2} – коэффициент обратной связи по напряжению.

Для определения значения коэффициентов регулятора напряжения приравняем знаменатель передаточной функции (11) к нормированному полиному:

$$N(s) = s + A\omega_n s + \omega_n^2, \quad (10)$$

где A – коэффициент формы переходного процесса.

При использовании стандартной биномиальной настройки:

$$\omega_n = \omega_I K_U^{-1}, \quad (11)$$

$$A = 2. \quad (12)$$

На основании (9) – (12) производится расчет коэффициентов регулятора, приравниванием коэффициентов стоящий при s с одинаковыми степенями, получим:

$$K_{\text{УИ}} = K_{I2} C_2 \omega_n^2 K_{U2}^{-1}, \quad (13)$$

$$K_{\text{УП}} = A K_{I2} \omega_n K_{U2}^{-1}. \quad (14)$$

На основе зависимостей (13) и (14) произведём разработку регулятора напряжения.

Для компенсации возникновения нуля в системе, воспользуемся фильтром, где постоянная времени рассчитывается следующим образом:

$$K_\phi = K_{\text{УП}} K_{\text{УИ}}^{-1}. \quad (15)$$

Согласно описанной методике и зависимостям (9) – (15) был разработан регулятор уровня напряжения.

Для получения цифрового регулятора с учётом выше сказанного достаточно воспользоваться методом переоборудования. Данный метод заключается в том, что производится аппроксимация непрерывной функции, для получения точек решётчатой функции. В таблице 1 представлены формулы для расчёта параметров исследуемых регуляторов.

Таблица 1
Table 1Параметры регуляторов
Parameters of regulators

Тип системы	Регулятор тока	Регулятор напряжения	
	И	П	И
Непрерывный регулятор	$\omega_I (K_{I2} K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2 K_{I2} \omega_n K_{U2}^{-1}$	$K_{I2} C_2 \omega_n^2 K_{U2}^{-1}$
Прямой метод Эйлера	$T_{\text{ШИМ}} \omega_I (K_{I2} K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2 K_{I2} \omega_n K_{U2}^{-1}$	$T_{\text{ШИМ}} K_{I2} C_2 \omega_n^2 K_{U2}^{-1}$
Обратный метод Эйлера	$T_{\text{ШИМ}} \omega_I (K_{I2} K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2 K_{I2} \omega_n K_{U2}^{-1}$	$T_{\text{ШИМ}} K_{I2} C_2 \omega_n^2 K_{U2}^{-1}$
Метод Тустена	$0,5 T_{\text{ШИМ}} \omega_I (K_{I2} K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2 K_{I2} \omega_n K_{U2}^{-1}$	$0,5 T_{\text{ШИМ}} K_{I2} C_2 \omega_n^2 K_{U2}^{-1}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Для того чтобы минимизировать ошибки измерения, вызванные наличием помех в канале обратной связи, было принято решение использовать усреднённое восьмикратное значение АЦП. Усреднение позволяет исключить как системную ошибку, так и псевдослучайную. Дискретная передаточная функция АЦП примет вид:

$$W_{\text{АЦП}} = 0,125 \times (1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + z^{-5} + z^{-6} + z^{-7}), \quad (16)$$

Использование дискретной передаточной функции АЦП (16) можно и в линейной системе, для достижения той же цели.

Проведя анализ синтеза системы управления для полупроводникового преобразователя, видно, что отсутствуют свойственный данным системам ограничивающие элементы, представленные виде звена насыщения. Наличие таких звеньев в системах с интегральными составляющими регулятора могут вызвать накопление ошибки на входе нелинейного звена, что в свою очередь может вызвать значительное ухудшение быстродействия системы. Поэтому было принято решение разработки компенсирующих и исключающих связей интегрального насыщения.

С учетом модификации регуляторов методами компенсирующих и исключающих связей интегральной составляющей, получим структуру регулятора, представленную на рисунке 5.

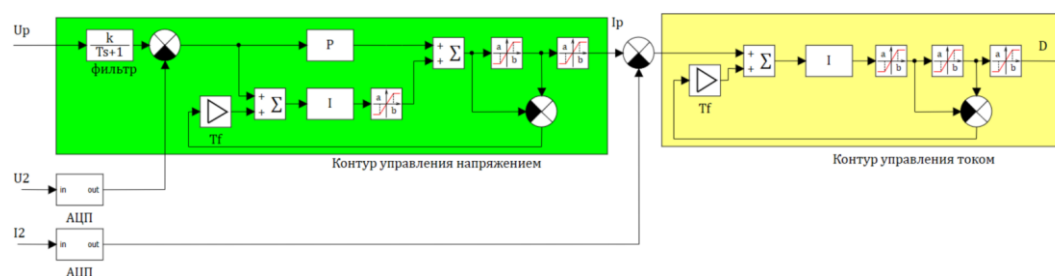


Рис. 5. Модифицированная система управления стабилизатором напряжения Fig. 5. Modified voltage stabilizer control system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Для исследования работоспособности и качества функционирования компонента электротехнического комплекса, в различных режимах. работы предложенных алгоритмов управления в системе с повышающим стабилизатором напряжения была произведена разработка имитационной (математической) модели в программной среде SimInTech. Имитационная модель, представленная на рисунке 2, имеет следующие параметры: индуктивность дросселя равна 10 мкГн, ёмкости входного и выходного силовых фильтров равны 6000 мкФ, частота ШИМ 6 кГц, а номинальная активная мощность 60 кВт.

Рассмотрим работу системы с идеальным источником напряжения. Задача данного стабилизатора напряжения при значениях напряжения нижней стороны равных 140 В, 200 В, 260 В, 320 В, 380 В, 440 В поддерживать на вторичной стороне преобразователя 540 В при настройке длительности переходного процесса на 0,005 секунды. Предлагается рассмотреть два варианта функционирования преобразователя. Первый случай, система запускается с минимального значения напряжения нижней стороны равному 140 В и повышается с шагом в 60 В каждые 0.2 секунды с начального значения до максимального при величине полной нагрузки. Второй вариант

осуществляется при тех же условиях, но на каждом участке напряжения система вначале функционирует при мощности нагрузки равной половине от номинальной мощности (30 кВт), а спустя 0.1 секунды ступенчато переключается на полную мощность (60 кВт)

Результаты моделирования переходных процессов параметров системы представлены на рисунках 6-8.

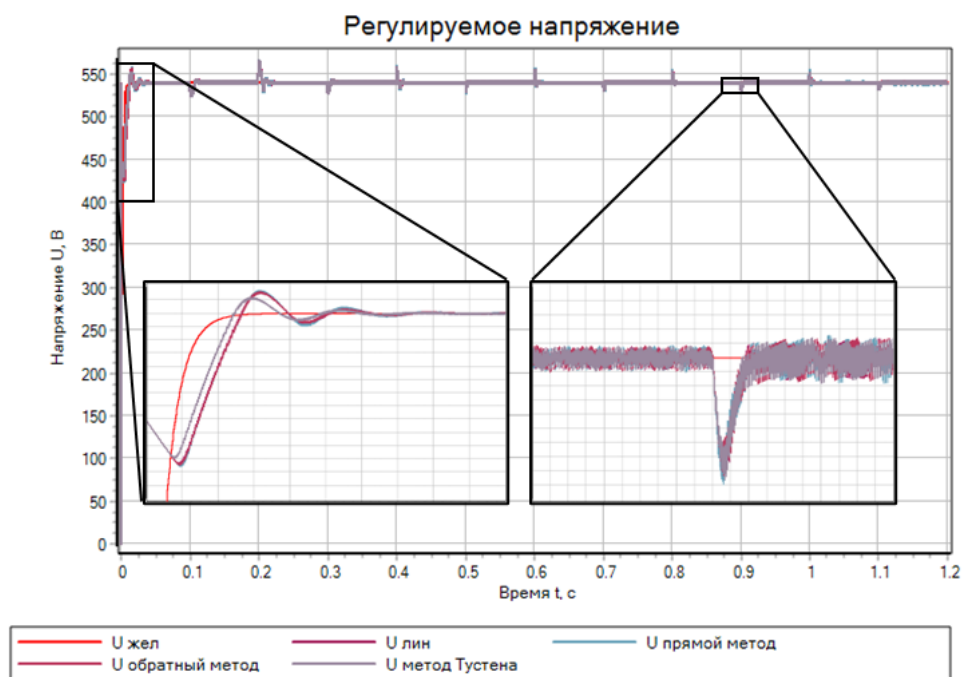
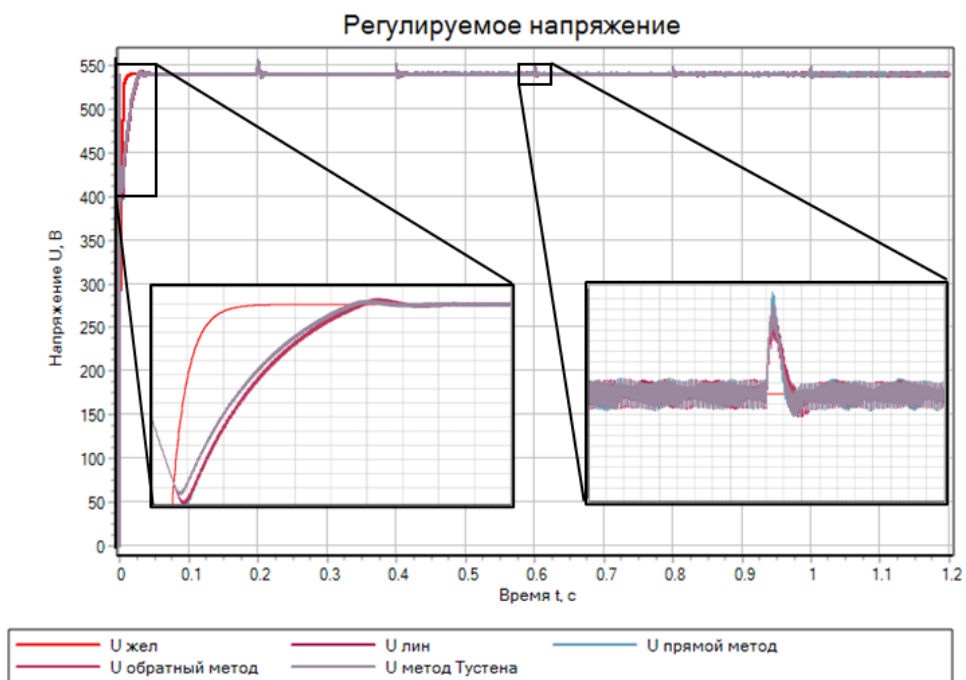


Рис 6. Выходное напряжение преобразователя
а) первый случай, б) второй случай

Fig.6 Converter output voltage
a) first case, b) second case

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

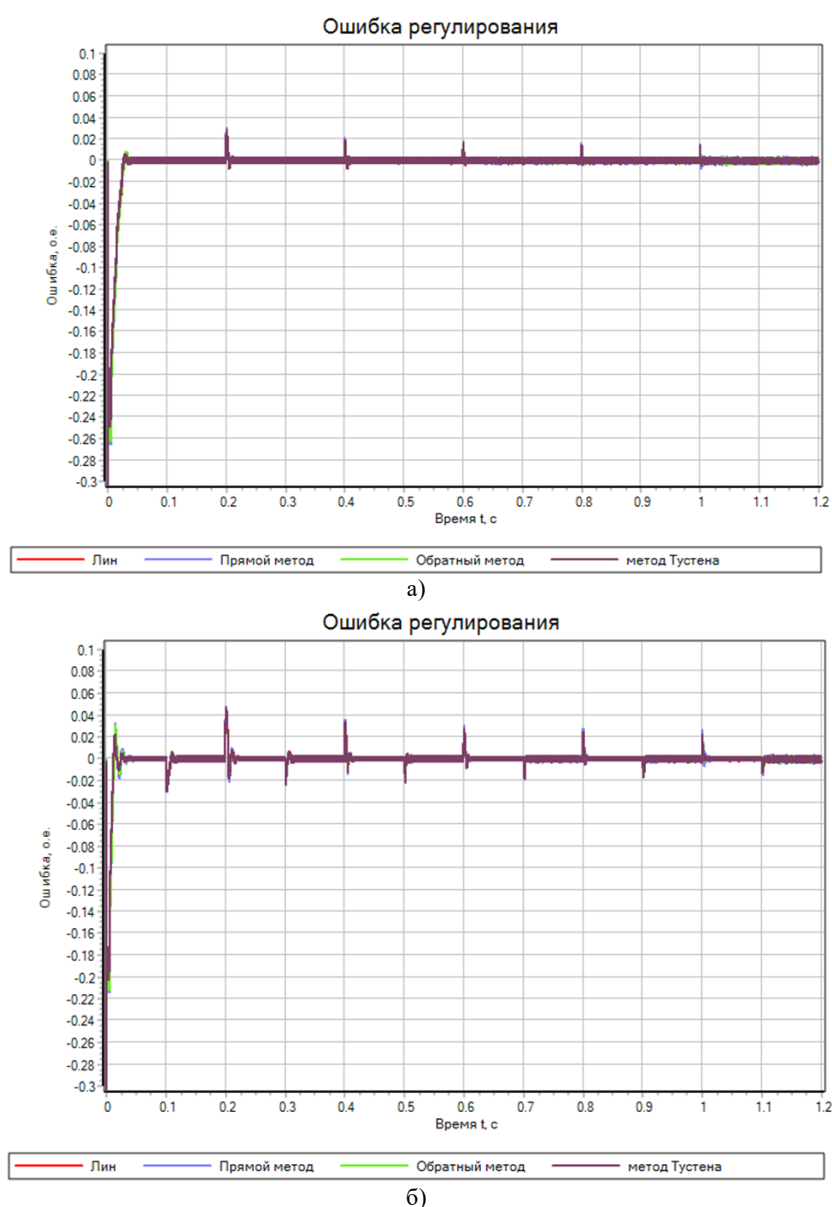


Рис 7. Ошибка регулирования
а) первый случай, б) второй случай

Fig. 7. Regulation Error
a) first case, b) second case

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунков 6-8, время переходного процесса увеличилось в четыре раза относительно настроенного времени и стало достигать примерно 0.02 секунды. Это вызвано необходимостью системы обеспечить заряд как входного, так и выходного фильтра. Но в дальнейшем, когда система переходит в режим стабилизации напряжения, время переходного процесса стало стремиться к выбранному при настройке, согласно рисунку 6б, 7б, 8б.

Обеспечение одинакового быстродействия системы достигается тем, что происходит коррекция значения регулятора напряжения. Оно пересчитывается в зависимости от значений входного и выходного напряжения. Данная модификация системы управления позволяет использовать предложенные регуляторы в системах стабилизации напряжения, в которых присутствуют значительные колебания напряжений на входе преобразователя. Причем данный эффект достигается путем использования типового регулятора, без использования специфических сложных алгоритмов, которые приводят к усложнению системы.

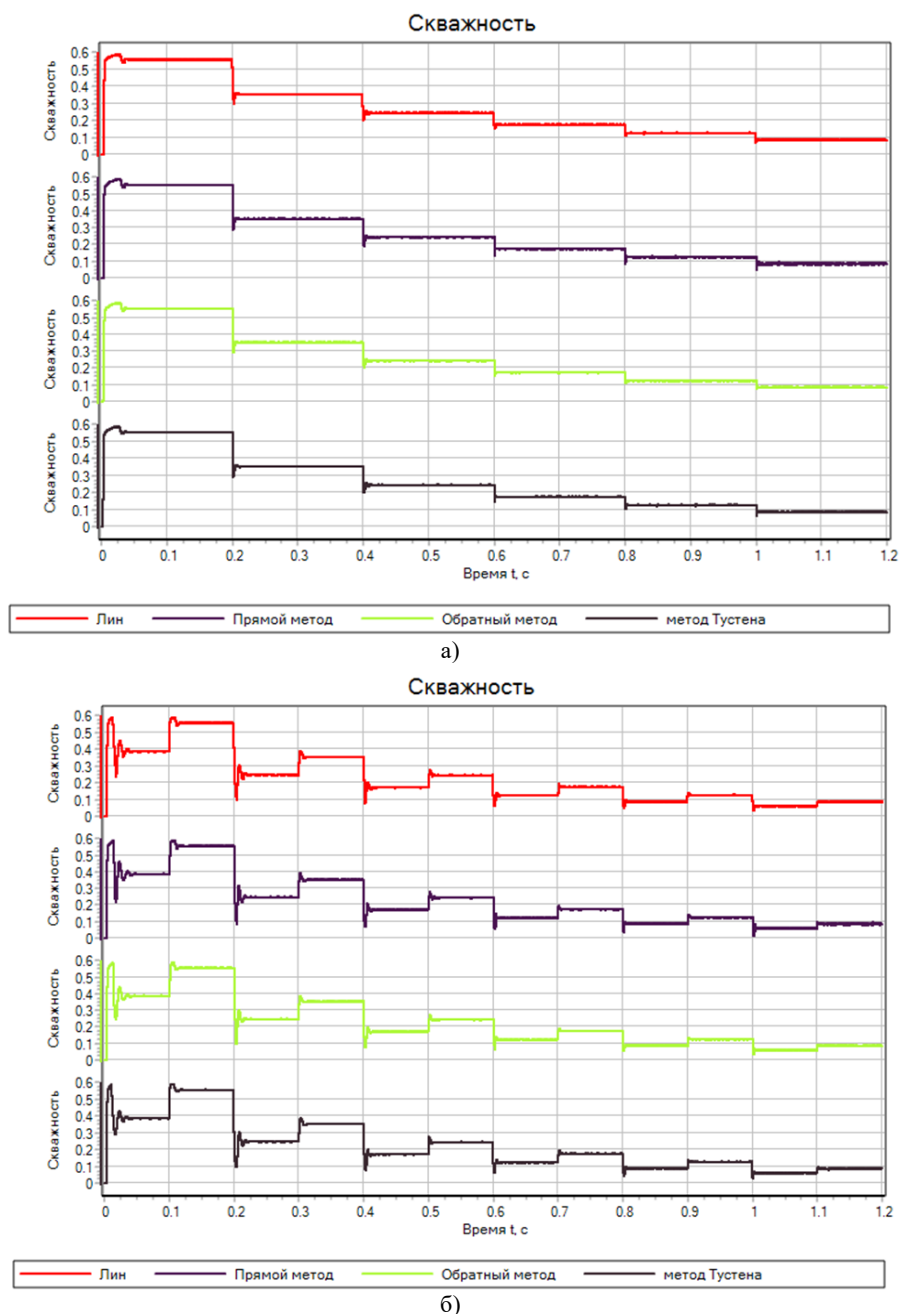


Рис 8. Задание на сквозность транзистора

а) первый случай, б) второй случай

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 8. Duty cycle of the transistor

a) first case, b) second case

Заключение (Conclusions)

В данной работе предлагается методика синтеза двухконтурной системы управления для обеспечения стабилизации уровня напряжения на выходе повышающего преобразователя, выполненного по схеме boost преобразователя. Разработанный регулятор имеет в своей структуре две подсистемы. Первая подсистема отвечает за стабилизацию значения тока, вторая за стабилизацию значение напряжения на выходе преобразователя. Также реализована функция позволяющая учесть изменения значений входного и выходного напряжений для определения нового значения коэффициента линеаризации системы. За счет этого возможно применение данного регулятора в широком диапазоне изменения входного напряжения при обеспечении схожей динамики переходного процесса. Также рассмотрены дискретные модели регуляторов, полученные путём переоборудования непрерывного регулятора методом прямого и обратного преобразования Эйлера, а также методом Тустена. Было получено, что данные регуляторы глобально обеспечивают схожий переходной процесс по форме и по быстродействию, но, в частности, с точки зрения быстродействия, наилучшим результатом обладает регулятор, рассчитанный методом Тустена.

Литература

1. Olivares D.E. et al. Trends in Microgrid Control // IEEE Trans. Smart Grid. 2014. Vol. 5, № 4. P. 1905–1919.
2. Rezkallah M. et al. Microgrid: Configurations, Control and Applications // IEEE Trans. Smart Grid. 2019. Vol. 10, № 2. P. 1290–1302.
3. El-Shahat A., Sumaiya S. DC-Microgrid System Design, Control, and Analysis // Electronics. 2019. Vol. 8, № 2. P. 124.
4. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией // ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ. 2020. Vol. 331, № 6. P. 184–196.
5. Муровский С.П., Курзо А.Н. Система Автономного Электроснабжения Удаленных Потребителей На Базе Возобновляемых Источников Энергии // УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ. 2017. Vol. 6, № 3. P. 54–57.
6. Бычков О.В., Степанов Е.Е., Васенин С.Е. Стабилизированные энергоисточники для линейных потребителей нефтегазопроводов // ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ ПОДГОТОВКА ПЕРСОНАЛА И ПОДДЕРЖАНИЕ ЕГО КВАЛИФИКАЦИИ. 2021. № 5. P. 25–36.
7. M. S. Simoiu, V. Calofir, S. S. Iliescu, I. Fagarasan and N. Arghira, "BOOST converter modelling as a subsystem of a photovoltaic panel control system," 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129963.
8. D. P. Nam, B. M. Thang and N. T. Thanh, "Adaptive Tracking Control for a Boost DC – DC Converter: A Switched Systems Approach," 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2018, pp. 702-705, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595580.
9. Gadekar S.D., Murali M. Optimizing Electric Vehicle Charging with Moth Flame Control Algorithm of Boost-KY Converter // Probl. Reg. Energ. 2023. № 4 (60). P. 126–140.
10. Hamasaki S., Mukai R., Tsuji M. Control of power leveling unit with super capacitor using bidirectional buck/boost DC/DC converter // 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). 2012. P. 1–6.
11. M. Zerouali, A. El Ougli, B. Tidhaf and H. Zroui, "Fuzzy logic MPPT and battery charging control for photovoltaic system under real weather conditions," 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS), Kenitra, Morocco, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECOCS50124.2020.9314531.
12. Y. I. Son and I. H. Kim, "Complementary PID Controller to Passivity-Based Nonlinear Control of Boost Converters With Inductor Resistance," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 20, N 3, pp. 826-834, May 2012, doi: 10.1109/TCST.2011.2134099.
13. J. Wang, S. Li, J. Fan and Q. Li, "Nonlinear disturbance observer based sliding mode control for PWM-based DC-DC boost converter systems," The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), Qingdao, China, 2015, pp. 2479-2484, doi: 10.1109/CCDC.2015.7162338.
14. L. Roggia, F. Beltrame, J. E. Baggio and J. R. Pinheiro, "Digital control system applied to a PFC boost converter operating in mixed conduction mode," 2009 Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 2009, pp. 698-704, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347724.
15. M. Mosin, N. Popov, V. Anibroev, M. Vilberger, E. Domakhin, Engine power distribution system for four-wheel drive autonomous electric vehicle, Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 115-122, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.388>.
16. M. Jang, M. Ciobotaru and V. G. Agelidis, "Design and Implementation of Digital Control in a Fuel Cell System," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, N 2, pp. 1158-1166, May 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2221724.
17. S. -K. Kim and C. K. Ahn, "Proportional-Derivative Voltage Control With Active Damping for DC/DC Boost Converters via Current Sensorless Approach," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 68, no. 2, pp. 737-741, Feb. 2021, doi: 10.1109/TCSII.2020.3008432.
18. D. Maksimovic and R. Zane, "Small-Signal Discrete-Time Modeling of Digitally Controlled PWM Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, N 6, pp. 2552-2556, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.909776.
19. L. V. Bellinaso, H. H. Figueira, M. F. Basquera, R. P. Vieira, H. A. Gründling and L. Michels, "Cascade Control With Adaptive Voltage Controller Applied to Photovoltaic Boost Converters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, N 2, pp. 1903-1912, March-April 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2884904.
20. Сафарзода, А. Х. Система управления напряжением автономной микросети

постоянного тока / А. Х. Сафарзода // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – N 6. – С. 26-32. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-69-6-26-32. – EDN XBSVTL.

21. Морозов, В. П. Система стабилизации постоянного напряжения для источника питания высотной привязной платформы-носителя / В. П. Морозов // Датчики и системы. – 2019. – N 2(233). – С. 57-64. – EDN VJMFCCG.

22. Красноборов, В. В. Моделирование работы системы вспомогательных машин с устройством стабилизации напряжения / В. В. Красноборов, С. В. Власевский // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – N 3(24). – С. 59-63. – EDN HTXXNU.

23. Маслов, А. Е. Система стабилизации напряжения в вентильном магнитоэлектрическом генераторе с реверсивным вольтодобавочным каналом / А. Е. Маслов, Г. С. Мыцык // Практическая силовая электроника. – 2021. – N 2(82). – С. 2-7. – EDN MZDIKA.

24. Коробко, Г. И. Разработка систем управления преобразователем частоты для дизель-генератора с изменяемой частотой вращения и их сравнительный анализ / Г. И. Коробко, М. П. Шилов, И. Г. Коробко // Вестник Чувашского университета. – 2019. – N 3. – С. 97-109. – EDN ZAQLAP.

25. Джендубаев, А. З. Р. Моделирование автономной электроэнергетической системы постоянного тока с полупроводниковыми трансформаторами / А. З. Р. Джендубаев, Ю. Г. Кононов, Э. А. З. Джендубаев // Электричество. – 2022. – N 7. – С. 24-39. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-7-24-39. – EDN RBEOLN.

26. Автономная электроэнергетическая система на основе синхронного генератора с постоянными магнитами / Ю. Т. Портной, А. С. Авдеев, Е. В. Володин [и др.] // Электричество. – 2023. – N 4. – С. 17-28. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-4-17-28. – EDN ZLHALU.

27. Системы стабилизации выходного напряжения синхронных генераторов / Е. А. Бирюкова, М. А. Подгузова, Д. А. Шевцов [и др.] // Практическая силовая электроника. – 2022. – N 2(86). – С. 26-31. – EDN XOSVFI.

28. Портной, Ю. Т. Регулировочная характеристика активного выпрямителя напряжения в составе автономной электроэнергетической системы при стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами / Ю. Т. Портной, А. С. Абдурагимов, Д. Э. Доброхотов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 182, N 3. – С. 3-6. – EDN WFBGYV.

29. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(5):142-154. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154>

30. Никулин О.В., Шабанов В.А. Компьютерная модель регулятора подачи долота на основе электродвигателя постоянного тока и ферропорошкового тормоза. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(3-4):184-194. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-184-194>

31. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Малацион А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(1):126-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140>

Авторы публикации

Иванов Илья Алексеевич – ассистент кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок (ЭАПУ), Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Котин Денис Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок (ЭАПУ), Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

References

1. Olivares D.E. et al. Trends in Microgrid Control // IEEE Trans. Smart Grid. 2014. Vol. 5, № 4. P. 1905–1919.

2. Rezkallah M. et al. Microgrid: Configurations, Control and Applications // IEEE Trans. Smart Grid. 2019. Vol. 10, № 2. P. 1290–1302.

3. El-Shahat A., Sumaiya S. DC-Microgrid System Design, Control, and Analysis // Electronics. 2019. Vol. 8, № 2. P. 124.

4. Lukutin B.V., Muravyov D.I. Prospects for decentralized DC power supply systems with distributed solar generation // NEWS OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEORESOURCES ENGINEERING. 2020. Vol. 331, no. 6. pp. 184–196. (In Russ.)
5. Murovsky S.P., Kurzo A.N. System of Autonomous Power Supply to Remote Consumers Based on Possible Energy Sources // SUCCESS OF MODERN SCIENCE. 2017. Vol. 6, no. 3. pp. 54–57. (In Russ.)
6. Bychkov O.V., Stepanov E.E., Vasenin S.E. Stabilized energy sources for linear consumers of oil and gas pipelines // OPERATIONAL MANAGEMENT IN ELECTRIC POWER INDUSTRY TRAINING OF PERSONNEL AND MAINTAINING ITS QUALIFICATIONS. 2021. No. 5. pp. 25–36.7. (In Russ.)
7. M. S. Simoiu, V. Calofir, S. S. Iliescu, I. Fagarasan and N. Arghira, "BOOST converter modelling as a subsystem of a photovoltaic panel control system," 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129963.
8. D. P. Nam, B. M. Thang and N. T. Thanh, "Adaptive Tracking Control for a Boost DC – DC Converter: A Switched Systems Approach," 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2018, pp. 702-705, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595580.
9. Gadekar S.D., Murali M. Optimizing Electric Vehicle Charging with Moth Flame Control Algorithm of Boost-KY Converter // Probl. Reg. Energ. 2023. № 4 (60). P. 126–140.
10. Hamasaki S., Mukai R., Tsuji M. Control of power leveling unit with super capacitor using bidirectional buck/boost DC/DC converter // 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). 2012. P. 1–6.
11. M. Zerouali, A. El Ougli, B. Tidhaf and H. Zroui, "Fuzzy logic MPPT and battery charging control for photovoltaic system under real weather conditions," 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS), Kenitra, Morocco, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECOCS50124.2020.9314531.
12. Y. I. Son and I. H. Kim, "Complementary PID Controller to Passivity-Based Nonlinear Control of Boost Converters With Inductor Resistance," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 20, N 3, pp. 826-834, May 2012, doi: 10.1109/TCST.2011.2134099.
13. J. Wang, S. Li, J. Fan and Q. Li, "Nonlinear disturbance observer based sliding mode control for PWM-based DC-DC boost converter systems," The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), Qingdao, China, 2015, pp. 2479-2484, doi: 10.1109/CCDC.2015.7162338.
14. L. Roggia, F. Beltrame, J. E. Baggio and J. R. Pinheiro, "Digital control system applied to a PFC boost converter operating in mixed conduction mode," 2009 Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 2009, pp. 698-704, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347724.
15. M. Mosin, N. Popov, V. Anibroev, M. Vilberger, E. Domakhin, Engine power distribution system for four-wheel drive autonomous electric vehicle, Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 115-122, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.388>.
16. M. Jang, M. Ciobotaru and V. G. Agelidis, "Design and Implementation of Digital Control in a Fuel Cell System," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, N 2, pp. 1158-1166, May 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2221724.
17. S. -K. Kim and C. K. Ahn, "Proportional-Derivative Voltage Control With Active Damping for DC/DC Boost Converters via Current Sensorless Approach," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 68, N 2, pp. 737-741, Feb. 2021, doi: 10.1109/TCSII.2020.3008432.
18. D. Maksimovic and R. Zane, "Small-Signal Discrete-Time Modeling of Digitally Controlled PWM Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, N 6, pp. 2552-2556, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.909776.
19. L. V. Bellinaso, H. H. Figueira, M. F. Basquera, R. P. Vieira, H. A. Gründling and L. Michels, "Cascade Control With Adaptive Voltage Controller Applied to Photovoltaic Boost Converters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, N 2, pp. 1903-1912, March-April 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2884904.
20. Safarzoda, A. Kh. Voltage control system for an autonomous DC microgrid / A. Kh. Safarzoda // International Technical and Economic Journal. – 2019. – N 6. – P. 26-32. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-69-6-26-32. – EDN XBSVTL. (In Russ.)
21. Morozov, V. P. DC voltage stabilization system for the power source of a high-altitude tethered carrier platform / V. P. Morozov // Sensors and systems. – 2019. – N 2(233). – pp. 57-64. – EDN VJMFCG. (In Russ.)
22. Krasnoborov, V.V. Modeling the operation of a system of auxiliary machines with a voltage stabilization device / V.V. Krasnoborov, S.V. Vlasevsky // Transport of the Asia-Pacific Region. – 2020. – N 3(24). – pp. 59-63. – EDN HTXXNU. (In Russ.)

23. Maslov, A. E. Voltage stabilization system in a valve magnetoelectric generator with a reversible voltage boost channel / A. E. Maslov, G. S. Mytsyk // Practical power electronics. – 2021. – N 2(82). – P. 2-7. – EDN MZDIKA. (In Russ.)

24. Korobko, G. I. Development of control systems for a frequency converter for a diesel generator with variable speed and their comparative analysis / G. I. Korobko, M. P. Shilov, I. G. Korobko // Bulletin of the Chuvash University. – 2019. – N 3. – P. 97-109. – EDN ZAQLAP. (In Russ.)

25. Dzhendubaev, A. Z. R. Modeling of an autonomous electric power system of direct current with semiconductor transformers / A. Z. R. Dzhendubaev, Yu. G. Kononov, E. A. Z. Dzhendubaev // Electricity. – 2022. – N 7. – P. 24-39. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-7-24-39. – EDN RBEOLN. (In Russ.)

26. Autonomous electric power system based on a synchronous generator with permanent magnets / Yu. T. Portnoy, A. S. Avdeev, E. V. Volodin [etc.] // Electricity. – 2023. – N 4. – P. 17-28. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-4-17-28. – EDN ZLHALU. (In Russ.)

27. Systems for stabilizing the output voltage of synchronous generators / E. A. Biryukova, M. A. Podguzova, D. A. Shevtsov [et al.] // Practical power electronics. – 2022. – N 2(86). – P. 26-31. – EDN XOSVFI. (In Russ.)

28. Portnoy, Yu. T. Regulating characteristics of an active voltage rectifier as part of an autonomous electric power system when stabilizing the voltage of a synchronous generator with permanent magnets / Yu. T. Portnoy, A. S. Abduragimov, D. E. Dobrokhotov // Issues of Electromechanics. Proceedings of VNIEM. – 2021. – T. 182, N 3. – P. 3-6. – EDN WFBGYV. (In Russ.)

29. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., Chichkov P.V. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. Power engineering: research, equipment, technology. 2020;22(5):142-154. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154>

30. Nikulin O.V., Shabanov V.A. Computer simulation of a drilling bit feed rate regulator comprising of a dc motor. Power engineering: research, equipment, technology. 2017;19(3-4):184-194. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-184-194>

31. Malev N.A., Pogoditsky O.V., Kozelkov O.V., Malacion A.S. Digital algorithm monitoring functioning of electromechanical dc converter. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(1):126-140. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140>

Authors of the publication

Илья А. Иванов – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Денис А. Котин – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **16.05.2024 г.**

Отредактировано **22.07.2024 г.**

Принято **02.09.2024 г.**



МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПГУ-450 С УВЕЛИЧЕНИЕМ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ОТБОРОВ И СОХРАНЕНИЯ СУММАРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

Зверев Л.О.¹, Злобин В.Г.¹, Зверева Э.Р.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологий и энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
6elvira6@list.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Модернизация ПГУ с увеличением тепловой мощности и сохранением электрической мощности с помощью блочного дожигающего устройства (БДУ) в котле - утилизаторе (КУ). МЕТОДЫ. Были проведены сравнительные исследования характеристик ПГУ – 450 без БДУ и с установленным БДУ. РЕЗУЛЬТАТЫ. В результате проведенных сравнительных исследований основных характеристик ПГУ-450 до и после монтажа БДУ в котлах утилизаторах было показано, что применение БДУ эффективно решает проблему покрытия пиковых тепловых нагрузок в переходных периодах ОЗП (весна – лето; осень – зима); показана возможность длительной работы БДУ в течение всего периода работы блока ПГ; выявлено, что наиболее целесообразно внедрение БДУ на блоках ПГУ, по которым истёк срок обязательств по договорам ДПМ. За счёт увеличения электрической мощности на 6% (в теплофикационном режиме) увеличивается оплата мощности в рынке КОМ; увеличение электрической мощности блока ПГУ при работе в конденсационном режиме на 11% позволяет минимизировать недопоставку мощности на ОРЭМ при температурах наружного воздуха выше +15 градусов; несмотря на увеличение УРУТ ээ на 3% до 190 г/кВт*ч, производимая электрическая энергия остаётся конкурентноспособной на ОРЭМ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Таким образом, в результате исследований было показано, что при включении в работу БДУ тепловая мощность ПГУ-450 увеличивается до 320 Гкал/час, что позволяет покрыть недостающую тепловую мощность. Исключается работа Т-250 в режиме близком к конденсационному с УРУТ ЭЭ 350 г/кВт*час, а вся тепловая нагрузка покрывается ПГУ-450, но с несколько ухудшенным УРУТ ээ равным 190 г/кВт*час. Такой состав оборудования ТЭЦ обеспечивает максимально возможную экономическую эффективность работы станции на рынке электроэнергии с полным покрытием теплопотребления.

Ключевые слова: модернизация; котел-утилизатор; ПГУ-450; Т-250; мощность; блочное дожигающее устройство; надстройка; ОРЭМ; топливо; ДПМ; УРУТ ээ.

Для цитирования: Зверев Л.О., Злобин В.Г., Зверева Э.Р. Модернизация тепловой схемы ПГУ-450 с увеличением тепловой мощности отопительных отборов и сохранения суммарной электрической мощности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 92-103. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-92-103.

MODERNIZATION OF THE PGU-450 THERMAL CIRCUIT WITH AN INCREASE IN THE THERMAL POWER OF HEATING SELECTIONS AND PRESERVATION OF THE TOTAL ELECTRIC POWER

Zverev L.O.¹, Zlobin V.G.¹, Zvereva E.R.²

¹St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
6elvira6@list.ru

Abstract: PURPOSE. Modernization of the PGU with an increase in thermal power and preservation of electrical power using a block afterburning device (BDU) in a heat recovery boiler

(CU). **METHODS.** Comparative studies of the characteristics of the PGU-450 without a BDU and with an installed DBU were conducted results. As a result of comparative studies of the main characteristics of the PGU-450 and the main characteristics of the PGU-450 before and after installation of the DBU in recovery boilers, it was shown that the use of the BDU effectively solves the problem of covering peak thermal loads in the transition periods of the OSP (spring – summer; autumn – winter); the possibility of long-term operation of the BDU during the entire period of operation of the PG unit is shown; it is revealed that it is most advisable to implement the BDU on the PGU blocks for which the obligations under the DPM agreements have expired. By increasing the electric power by 6% (in the heating mode), the payment for power in the KOM market increases; an increase in the electric power of the PGU unit when operating in condensation mode by 11% minimizes the under-supply of power to the OREM at outdoor temperatures above + 15 degrees; Despite a 3% increase in URUE to 190 g/kWh, the electric energy produced remains competitive in the OREM. **CONCLUSION.** Thus, as a result of the research, it was shown that when the DBU is switched on, the thermal power of the PGU-450 increases to 320 Gcal/hour, which makes it possible to cover the missing thermal power. Thus, the operation of the T-250 in a mode close to condensation with an URUT ee of 350 g / kWh is excluded, and the entire thermal load is covered by the PGU-450, but with a slightly degraded URUT ee of 190 g / kWh. Such a composition of the CHP equipment ensures the maximum possible economic efficiency of the plant in the electricity market with full coverage of heat consumption.

Keywords: modernization; heat recovery boiler; PGU-450; T-250; power; block afterburning device; superstructure; OREM; fuel; DPM; URUT ee.

For citation: Zverev L.O., Zlobin V.G., Zvereva E.R. Modernization of the PGU-450 thermal circuit with an increase in the thermal power of heating selections and preservation of the total electric power. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (5): 92-103. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-92-103.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

До 1990-х годов в большинстве стран мира электроэнергетика относилась к естественным монополиям. Вертикально-интегрированные компании (совмещавшие производство, передачу и сбыт электроэнергии) имели узаконенную монополию в масштабах страны или отдельных регионов. Тарифы на их услуги устанавливались или ограничивались государством. Такая система долгое время вполне удовлетворительно обеспечивала нужды экономики.

Прошедшая в 2007-2008 годах реформа электроэнергетики в России привела к разделению отрасли на два сегмента:

– Регулируемый, монопольный (электросетевой комплекс, гарантирующие поставщики, системный оператор единой энергетической системы (СО «ЕЭС») и организации инфраструктуры оптового рынка электроэнергии-администратор торговой системы (АТС) и центр финансовых расчетов (ЦФО).

– Нерегулируемый (производители электроэнергии-электростанции и независимые энергосбытовые компании).

Отнесение электростанций к нерегулируемому сегменту рынка электроэнергии привело к конкуренции между генерирующими компаниями и даже между отдельными электростанциями. Следует отметить, что создание шести генерирующих компаний оптового рынка (ОГК) и шестнадцати территориальных генерирующих компаний (ТГК) в 2008 году произошло в условиях нарастающего дефицита производства электроэнергии в стране из-за 3-5%-ого роста потребления и практически полного отсутствия ввода в эксплуатацию нового регулирующего оборудования (рис. 1). Оценочно первоочередные объемы финансирования в генерацию оценивались 6,75 трлн. рублей. С целью получения источника финансирования строительства новой генерации был разработан механизм договоров на поставку мощности (ДПМ). Поскольку на момент формирования первой программы ДПМ существовал дефицит производства электроэнергии, то основные средства по данной программе, предусматривающей повышенные платежи потребителей за поставляемую мощность, позволяющие окупить строительство за 10-15 лет, были направлены на объекты ОГК, при этом строительство новой генерации велось с использованием парогазовой генерации (ПГУ), уже доказавшей к тому времени свою эффективность перед традиционной, на тот момент паросиловой генерацией по себестоимости произведенной электроэнергии (удельные расходы топлива на ПГУ

находится в диапазоне 200-230 г/(кВт·ч) при том, что при паросиловом цикле не всегда удается достигнуть удельных расходов до величины менее 300 г/(кВт·ч) [1-2].

Таким образом, вне основной программы реконструкции осталась значительная часть оборудования ТЭЦ, входящих в состав ТПК, что было обусловлено спецификой работы данного типа станций. Спецификой работы на ТЭЦ следует считать ее зависимость при производстве электроэнергии от фактической тепловой нагрузки – комбинированная выработка электроэнергии, то есть ТЭЦ выполняет две взаимоувязанные функции – производство электроэнергии и теплоснабжение потребителей, в том числе в паре различных параметров от низкого давления, до острого редуцированного пара. В зависимости от объемов полезного отпуска тепла меняется не только объем выработки электроэнергии, но и ее себестоимость. В оптимальном режиме соотношение затрат на производства в комбинированном режиме 60% на 40% между электроэнергией и тепловой энергией. При уменьшении отпуска тепла, затраты будут переноситься на себестоимость выработки электроэнергии с увеличением до 340-380 г/(кВт·ч), что автоматически делает выработанную в конденсационном режиме электроэнергию неконкурентной на рынке электроэнергии. Такая специфика работы изначально ставит ТЭЦ в неравное конкурентное положение по сравнению с ГРЭС и ТЭС. Кроме того ТЭЦ в силу действующего в РФ законодательства, в первую очередь Федеральный Закон (ФЗ) №190 «О теплоснабжении», не имеют юридической возможности отказаться от поставок тепла потребителям, которые, особенно для городских ТЭЦ, носят явно выраженный сезонный характер. В силу такой специфики, в обозримом будущем вывод из работы оборудования, использующего паросиловой цикл, не представляется возможным. Другим негативным моментом паросилового оборудования является то, что существующие на сегодняшний день технологии модернизации турбин типа Р, Т, ПТ не дают значительного снижения удельного расхода топлива и он все равно остается в диапазоне 290-315 г/(кВт·ч) (опять таки от тепловой нагрузки).

Это послужило основанием увеличения объемов по программе ДПМ на ТЭЦ, однозначно не подлежащих выводу из эксплуатации. Однако строительство ПГУ и ГТУ на ТЭЦ не решило в полном объеме всех проблем данного вида станции, что опять-таки связано со спецификой теплоснабжения потребителей. Здесь исключение могут составлять промышленные ТЭЦ, предназначенные в первую очередь для паро- и теплоснабжения крупных промышленных потребителей, в первую очередь нефте- и газохимии. Такие ТЭЦ имеют круглосуточную и круглогодичную равномерную тепловую нагрузку и, соответственно, достаточно низкие удельные расходы топлива на производство электроэнергии, что делает их относительно конкурентными на ОРЭМ.

Для городских ТЭЦ, где тепловая нагрузка из-за специфики подключенных потребителей, крайне неравномерна и в межотопительный период может снижаться до 5% от установленной тепловой мощности, так как основное потребление в горячей воде начинается с началом отопительного периода, основным способом повышения экономической эффективности и получения прибыли от работы на ОРЭМ остаются системные ограничения. С этой целью максимально возможное количество паросилового оборудования заявляются СО «ЕЭС» в летнее ограничение с целью невозможности со стороны СО «ЕЭС» его разворота для покрытия дефицита электрической мощности. В первую очередь в ограничения заявляются турбоагрегаты типа Р, в последнюю-излишние для покрытия тепловой нагрузки тепловой нагрузки турбоагрегаты типа Т.

Однако и эти системные мероприятия не всегда позволяют достичь желаемого экономического эффекта в связи с тем, что остающиеся в работе ПГУ не могут взять на себя весь объем тепловой нагрузки в межотопительный период, и в работе приходится оставлять часть оборудования паросилового цикла. Увеличение тепловой нагрузки на ПГУ приводит к снижению их эффективности на ОРЭМ, в первую очередь из-за снижения электрической мощности, являющейся отдельным товаром на рынке электроэнергии. Кроме того в силу конструктивных особенностей ПГУ они в летней период при температурах наружного воздуха выше 15°C уже теряют часть электрической мощности.

В связи с вышеизложенным важным вопросом является рассмотрение возможности повышения тепловой мощности ПГУ с сохранением конструктивной, заявленной на ОРЭМ, электрической мощности, что сделает возможными исключение из работы паросилового оборудования в период минимальных тепловых нагрузок и как следствие повышение экономической эффективности всей ТЭЦ [2-4].

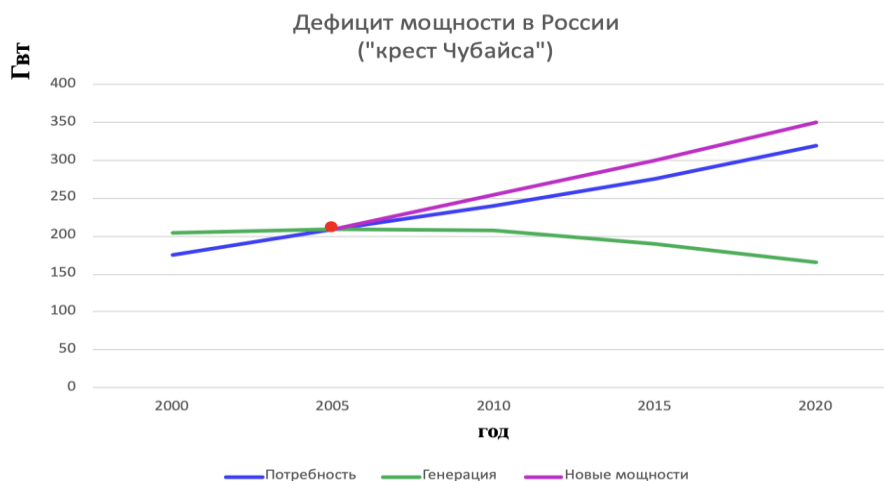


Рис. 1. Дефицит мощности в России. Баланс установленной мощности (с учетом выбытия) и потребности генерации, млн кВт (так называемый «Крест Чубайса»)

Fig. 1. Power shortage in Russia. The balance of installed capacity (including disposal) and generation needs, million kW (the so-called "Chubais Cross")

*Источник: Иванов И. В., Струговец С. А., Чечулин А. Ю. Перспективы использования газотурбинных технологий в энергетике России // Вестник УГАТУ.2009. Т. 13. № 1 (34). С. 26–31
Source: Ivanov I. V., Strugovets S. A., Chechulin A. Yu. Prospects for the use of gas turbine technologies in the energy sector of Russia // Bulletin of UGATU.2009. Vol . 13. No. 1 (34). pp. 26-31.

Целью работы является модернизация ПГУ с увеличением тепловой мощности и сохранением аттестованной электрической мощности с помощью блочного дожигающего устройства (БДУ) в котле – утилизаторе (КУ). Актуальностью работы является покрытия пиков теплотребления без включения в работу дополнительного теплофикационного оборудования. Для решения указанной задачи рассмотрен вариант реконструкции КУ с установкой блочного дожигающего устройства (БДУ).

Проблема дожига топлива в котлах-утилизаторах (КУ) является актуальной для энергетики при реконструкции существующих мощностей с использованием надстроек на базе ПГУ.

Применение БДУ позволяет повысить основные характеристики пара до максимального значения, благодаря чему увеличится установленная тепловая мощность без включения в работу дополнительного теплофикационного оборудования. Таким образом, важным вопросом является рассмотрение возможности повышения тепловой мощности ПГУ с сохранением конструктивной, заявленной на ОРЭМ, электрической мощности, что сделает возможными исключение из работы паросилового оборудования в период минимальных тепловых нагрузок, и как следствие повышение экономической эффективности всей ТЭЦ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для электростанций, работающих на газовом топливе, наиболее эффективным способом реконструкции является надстройка существующей паротурбинной части, которая обеспечивает существенное увеличение выработки тепла, при минимальных капиталовложениях [5].

Центральное место при реконструкции отечественных ТЭЦ в последние два десятилетия отводится внедрению парогазовых установок бинарного типа с котлами-утилизаторами. В Санкт-Петербурге, в частности, в настоящее время функционируют четыре дубль-блока ПГУ-450Т мощностью 450 МВт и некоторое количество теплофикационных ПГУ меньшей мощности. В настоящее время крупные энергетические компании, осуществляющие взаимодействие на оптовом рынке электрической энергии и мощности (ОРЭМ), заинтересованы в осуществлении оптимальной и эффективной загрузки действующего оборудования [6-8].

Объектом исследования выбрана ТЭЦ-22 филиала «Невский» ПАО «ТГК-1», которая имеет следующий состав оборудования: (старая очередь)

- Три паровые турбины Т-250;
- Три энергетических котла (ТГМП), 6 водогрейных котлов и 2 паровых котла для собственных нужд.

Новый блок ПГУ- 450 состоит из:

- 2-х газовых машин ГТЭ -160 производства ЛМЗ;

- 2-х котлов-утилизаторов производства ЗиО Подольск;
- паровой турбины Т-150 (производства УТЗ), электрической мощностью 145 МВт и тепловой мощностью 163 Гкал /ч.

Применение БДУ в ПГУ позволяет маневренным образом обеспечивать необходимые мощности и дополнительный отпуск тепловой энергии в периоды большего потребления [9-12]. БДУ применимо в газотурбинном цикле, где происходит получение продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания ГТУ, затем преобразование тепловой энергии продуктов сгорания в электрическую энергию в паротурбинном цикле (в составе энергоблока ПГУ), дополнительный подвод топлива повышает паропроизводительность КУ (рис. 2).

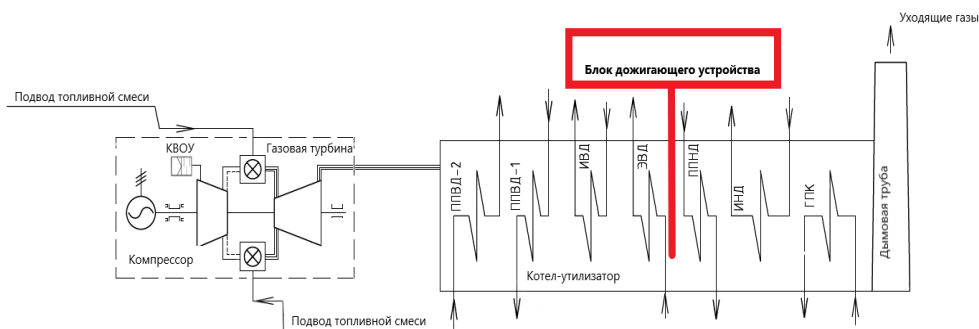


Рис. 2. Схема ПГУ с дожиганием топлива в КУ

Fig. 2. The scheme of the PGU with afterburning of fuel in the CU

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Котел-утилизатор один из важнейших элементов парогазовых установок. Цель котлов заключается в утилизации теплоты выходных газов из энергетической газотурбинной установки.

Котел-утилизатор ПР-228/47, изготовленный Подольским машиностроительным заводом, предназначен для получения перегретого пара высокого и низкого давлений и подогрева конденсата паровой турбины за счет использования тепла горячих выхлопных газов ГТУ. Котлы-утилизаторы Пр-228/47-7,86/0,62-515/230 вертикального профиля, двухбарабанные, с принудительной циркуляцией в испарительных контурах высокого и низкого давления, газоплотный, с собственным несущим каркасом. По ходу газов последовательно расположены: пароперегреватель ВД, испаритель ВД, водяной экономайзер ВД, пароперегреватель НД, испаритель НД, газовый подогреватель конденсата паровой турбины [13].

Существует 2 варианта установки БДУ в КУ:

- 1) На входе в котел-утилизатор, перед пароперегревателем высокого давления
- 2) Между пароперегревателем и испарителем высокого давления.

Второй вариант имеет следующие преимущества:

- снижаются затраты на внешнее охлаждение и на теплозащиту пароперегревателя высокого давления и стенок котла утилизатора;
- установка БДУ перед пароперегревателем высокого давления на входе в котел-утилизатор приводит к увеличению габаритов котла.

В схемах ПГУ конденсационного типа дожигание топлива может применяться с целью увеличения электрической мощности паротурбинной части ПГУ, стабилизации параметров генерируемого пара, эффективной интеграции существующего и вновь устанавливаемого оборудования при реконструкции действующих энергообъектов [11, 14-16].

В ПГУ с дожиганием в котле-утилизаторе сжигается дополнительное количество топлива. В газоходе котла-утилизатора обычно размещаются горелочные элементы дожигания топлива (рис. 3).

На рисунке 3 представлена диффузионно-стабилизаторная горелка камеры дожигания, применяемой на практике. Такие горелки можно установить между ППВД и ИВД.

При данном способе сжигания природного газа осуществляется в камерах дожигания. Для этого природный газ вводится в зону рециркуляции системой струй через специальный трубчатый коллектор на тыльной стороне стабилизатора. Выходные газы ГТУ поступают в зону горения из обтекающего стабилизатор потока. Сюда же рециркуляционным противотоком подается некоторое количество продуктов сгорания,

способствующих стабилизации процесса горения. Такой способ дожигания топлива отличается высокой интенсивностью процесса смесеобразования при малой длине факела по потоку (несмотря на раздельную подачу выходных газов и топлива).

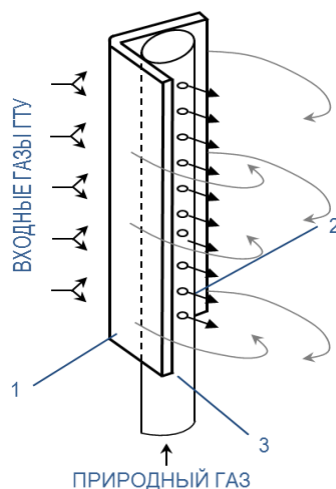


Рис. 3. Диффузионно-стабилизаторная горелка камеры дожигания: 1 – стабилизатор; 2 – ось струи газа; 3 – газовый коллектор

*Источник: https://ozlib.com/867042/tehnika/kamery_dozhiganiya_topлива_srede_vyhodnyh_gazov (дата доступа: 30.07.2024) Source: https://ozlib.com/867042/tehnika/kamery_dozhiganiya_topлива_srede_vyhodnyh_gazov (access date: 30.07.2024).

При сжигании дополнительного топлива в БДУ температура пара высокого давления увеличивается на 3%, а его расход на 35%. Дожигание топлива происходит в среде выходных газов ГТУ, что позволяет повысить их температуру, стабилизировать параметры генерируемого в КУ пара и повысить мощность ПГУ [17-18].

Результаты (Results)

В таблице 1 представлены изменения основных характеристик ПГУ-450 до и после монтажа БДУ в котлах утилизаторах. Данные приведены для теплофикационного режима работы блока.

Таблица 1
Table 1

Сравнительные характеристики ПГУ – 450 без БДУ и с установленным БДУ
Comparative characteristics of the CCGT – 450 without a BDU and with an installed BDU

№ п/п	Параметр	Без БДУ	С БДУ	Изменение (%)
1	Температура пара ВД на выходе из КУ ($^{\circ}\text{C}$)	515	530	+3
2	Давление пара ВД на выходе из КУ (МПа)	7,86	11,16	+42
3	Средняя электрическая нагрузка в теплофикационном режиме (МВт)	450	477	+6
4	Тепловая нагрузка (Гкал*час)	237	320	+35
5	Удельный расход условного топлива по электроэнергии (УРУТ ЭЭ; г/кВт*час)	184	190	+3
6	Удельный расход условного топлива по тепловой энергии (УРУТ тэ; кг/Гкал)	146,2	145,4	-0,5
7	КПД блока по электроэнергии ($\eta_{\text{ЭЭ}}$; %)	38,15	36,3	-5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из приведённой таблицы 1 при использовании БДУ:

- На 3% увеличивается температура пара высокого давления;
- На 42% увеличивается давление пара в контуре высокого давления.
- Увеличение тепловой мощности блока на 35% и рост электрической мощности на 6% [6].

Необходимо отметить, что при этом возрастает удельный расход условного топлива на производство электроэнергии (УРУТ ЭЭ), но удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии (УРУТ тэ) незначительно снижается за счет большого роста

тепловой мощности. В конденсационном (летнем режиме) рост электрической мощности будет больше – до 11%.

Таким образом, решается задача увеличения тепловой мощности ПГУ-450 без снижения электрической мощности [6, 18].

На рисунке 4 приведено изменение температуры пара высокого давления от КУ в зависимости от расхода теплоты газов за ГТУ.

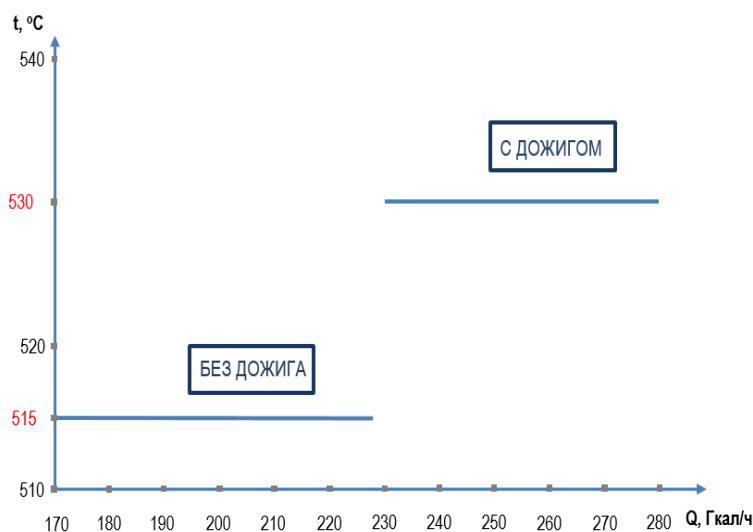


Рис. 4. Зависимость температуры пара от расходов теплоты газов за ГТУ

Fig. 4. Dependence of the steam temperature on the heat consumption of gases per GTU

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно представленной диаграмме наглядно видно, что при включении дожигающего устройства температура пара повышается на 3 % – до 530 °С.

На рисунке 5 представлено изменение расхода пара ВД от КУ без БДУ и с работающим БДУ. Как видно из графика на 35 % вырастает выработка пара ВД и при этом на 35 % растёт тепловая мощность блока ПГУ при включенном дожигающем устройством.

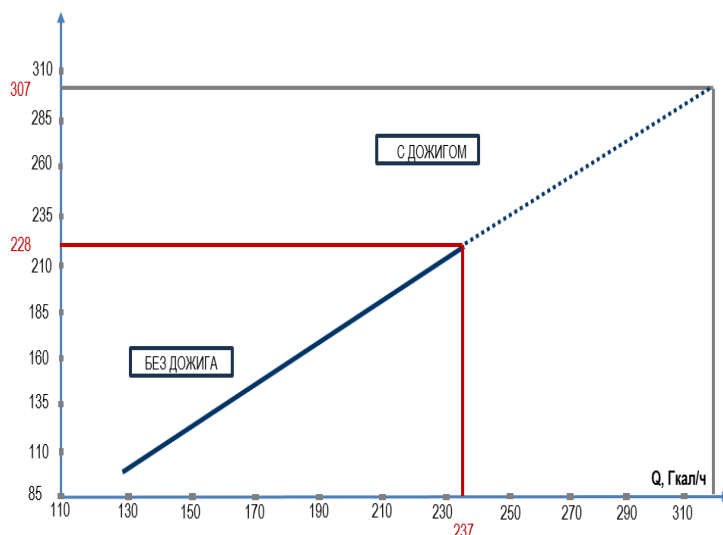


Рис. 5. Зависимость расхода пара высокого давления от расхода теплоты за ГТУ

Fig. 5. Dependence of high-pressure steam consumption on heat consumption per GTU

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При работе БДУ (рис. 6) растёт электрическая мощность за счет включения паровой турбины Т-150. В теплофикационном режиме мы имеем рост электрической мощности 6 % (+27 МВт), а в конденсационном режиме рост мощности составит 8,5 % (+39 МВт).

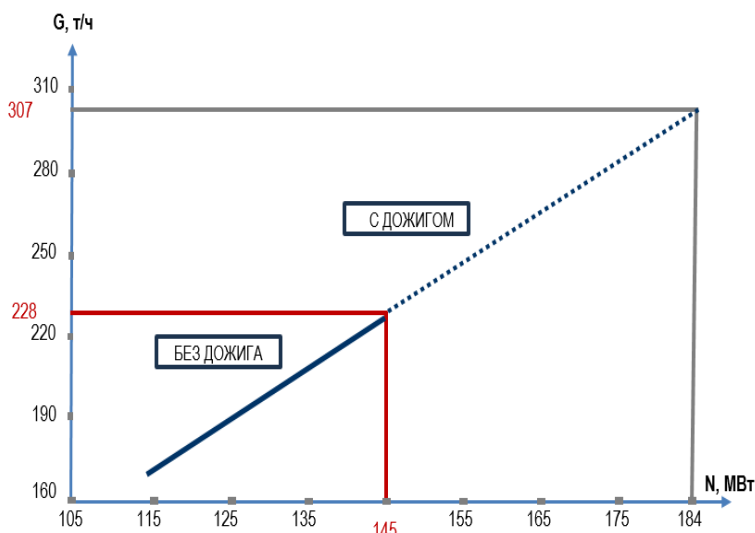


Рис. 6. Зависимость электрической мощности турбины Т-150 от расхода пара высокого давления в конденсационном режиме

Fig. 6. Dependence of the electric power of the T-150 turbine on the consumption of high-pressure steam in the condensation mode

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В итоге баланс тепловой мощности и тепловой нагрузки потребителей изменится (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Баланс тепловой мощности и тепловой нагрузки потребителей
The balance of thermal power and thermal load of consumers

Месяц	Отпуск тепла (Гкал/час)	Тепловая мощность ПГУ, Гкал/ч (без БДУ)	Небаланс (без БДУ)	Тепловая мощность ПГУ (Гкал/час) (с БДУ)	Небаланс (с БДУ)
Апрель	347,6	237	-110,6	320	-27,6
Май	183	237	54	320	+137
Сентябрь	201	237	36	320	+119
Октябрь	356,5	237	-119	320	-36,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Необходимо обратить внимание, что указанные в таблице 2 нагрузки являются среднемесячными приведенными нагрузками потребителей. При этом вторая половина апреля, начало мая, последняя декада сентября и начало октября характеризуются небольшими плюсовыми температурами и сравнительно большими, по отношению к летним месяцам, тепловыми нагрузками потребителей в диапазоне 250-300 Гкал/час. Применение БДУ способно повысить расход и давление пара до максимального значения и благодаря этому увеличить маневренные характеристики ПГУ и увеличить установленную тепловую мощность без включения в работу ПТУ Т-250 или водогрейных котлов [6]. Еще одним преимуществом блочного дожигающего устройства является возможность плавного регулирования тепловой мощности. Неправильный баланс тепловой мощности 8 – 10% возникает в ночные часы кратковременно. В эти часы возможен переход от качественного к количественному регулированию параметров теплосети вместо разворота водогрейного котла КВГМ-180.

Дополнительным обоснованием необходимости применения БДУ в КУ ПГУ-450 являются климатические параметры района расположения Санкт-Петербурга (табл. 3) [6].

Как видно из таблицы 3, максимальное количество дней приходится на температуры близкие к нулевой отметке и соответственно к минимальным тепловым нагрузкам и значительное количество дней данного периода может покрываться тепловой мощностью ПГУ-450 с использованием БДУ. Фактическая тепловая нагрузка потребителей уже при температуре наружного воздуха +3°C не превышает 315 Гкал/час, что обеспечивает ее покрытие работой ПГУ-450 без разворачивания в работу ПТУ-250 или водогрейных котлов КВГ. Из недостатков следует отметить: увеличение УРУТ ЭЭ на 3%; увеличение расхода газа на 15%; снижение КПД блока ПГУ-450 на 5%. Однако данные недостатки полностью перекрываются общим экономическим эффектом от разворота в

работу дополнительного теплофикационного оборудования ТЭЦ (табл. 4).

Таблица 3

Table 3

Климатические параметры Санкт-Петербурга

Climatic parameters of St. Petersburg

Период со среднесуточной температурой воздуха	Средняя температура воздуха (°C)	Продолжительность (сут.)
≤ 0°C	-5,1	139
≤ 8°C	-1,8	220
≤ 10°C	-0,9	239

*Источник: Экологический Портал Санкт-Петербурга <https://www.infoeco.ru/index.php?id=1091>

Source: St. Petersburg Environmental Portal <https://www.infoeco.ru/index.php?id=1091>.

Таблица 4

Table 4

Баланс тепловых мощностей в апреле и октябре при эксплуатации ПГУ-450 с БДУ

The balance of thermal capacities in April and October during operation PSU-450 with BDU

Месяц	Отпуск тепла Гкал/ч	Отпуск тепла Гкал/ч с БДУ	Небаланс	Средняя температура наружного воздуха
Апрель	347,6	320	-27,6	+9
Октябрь	356,5	320	-36,5	+8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Приведенные в таблице 5 температуры наружного воздуха являются среднемесячными. Фактические температуры апреля и октября значительно разнятся в первой и второй половине каждого из рассматриваемых месяцев. В таблице 5 приведены средние температуры первой и второй половины октября 2021 г. и апреля 2022 г. в Санкт-Петербурге.

Таблица 5

Table 5

Средние температуры октября 2021г. и апреля 2022г. (Санкт-Петербург)

Average temperatures in October 2021 and April 2022 (St. Petersburg)

Период	День (t°C)	Ночь (t°C)	Средняя (t°C)
1-15 октября	+8,46	+5,26	+6,9
16-31 октября	+4,9	-0,76	+2,07
1-15 апреля	+4,3	-0,5	+1,9
16-30 апреля	+9,3	+3,53	+6,4

*Источник: Экологический Портал Санкт-Петербурга <https://www.infoeco.ru/index.php?id=1091>

Source: St. Petersburg Environmental Portal <https://www.infoeco.ru/index.php?id=1091>.

Из таблицы 5 видно, что диапазон изменения температуры колеблется в диапазоне 30-31%. Соответственно будет изменяться и нагрузка потребителей: 240,6-249 Гкал/час. Таким образом, максимальная мощность ПГУ-450 (237 Гкал/час) не покрывает фактическую нагрузку (среднесуточную) потребителей и для поддержания нормального режима теплоснабжения возникает необходимость включения в работу Т-250 или водогрейного котла.

При включении в работу БДУ тепловая мощность ПГУ-450 увеличивается до 320 Гкал/час, что позволяет покрыть недостающую тепловую мощность. Таким образом, исключается работа Т-250 в режиме близком к конденсационному с УРУТ ээ 350 г/кВт*час, а вся тепловая нагрузка покрывается ПГУ-450, но с несколько ухудшенным УРУТ ээ равным 190 г/кВт*час [19].

Такой состав оборудования ТЭЦ обеспечивает максимально возможную экономическую эффективность работы станции на рынке электроэнергии с полным покрытием теплоснабжения. Возникающий кратковременный дисбаланс тепловой мощности ПГУ с работающим ПГУ можно покрыть, переходя от качественного к количественному регулированию теплосети.

Заключение (Conclusions)

1. Применение БДУ эффективно решает проблему покрытия пиковых тепловых нагрузок в переходных периодах ОЗП (весна – лето; осень – зима).

2. Возможна длительная работа БДУ в течение всего периода работы блока ПГУ.

3. Наиболее целесообразно внедрение БДУ на блоках ПГУ, по которым истёк срок обязательств по договорам ДПМ. За счёт увеличения электрической мощности на 6% (в теплофикационном режиме) увеличивается оплата мощности в рынке КОМ.

4. Увеличение электрической мощности блока ПГУ при работе в конденсационном режиме на 11% позволяет минимизировать недопоставку мощности на ОРЭМ при температурах наружного воздуха выше + 15 градусов.

5. Несмотря на увеличение УРУТээ на 3% до 190 г/кВт*ч, производимая электрическая энергия остаётся конкурентноспособной на ОРЭМ.

Литература

1. Александров О.И., Радоман Н.В., Жуковская Т.Е. Минимизация дефицита мощности в энергосистеме с учетом межсистемных связей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2013. № 5. С. 18-25.
2. Иванов И. В., Струговец С. А., Чечулин А. Ю. Перспективы использования газотурбинных технологий в энергетике России // Вестник УГАТУ. 2009 Т. 13. № 1 (34). С. 26–31.
3. Будовский В.П. Риск дефицита мощности энергосистемы //Электричество. 2009. № 8. С. 12-17.
4. Теплов Б.Д., Радин Ю.А. Повышение маневренности и экономической эффективности эксплуатации ПГУ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 39-47
5. Верткин М.А., Колпаков С.П., Михайлов В.Е., Сухоруков Ю.Г., Хоменок Л.А. Совершенствование паросиловой части теплофикационных ПГУ с котлами-утилизаторами для ТЭЦ крупных городов РФ // Теплоэнергетика. 2021. №3. С.34-40.
6. Зверев Л.О., Злобин В.Г., Липатов Д.В., Зверева Э.Р. Применение блочного дожигающего устройства в котлах-утилизаторах ПГУ //Современные проблемы теории машин. 2023. № 15. С. 78-80.
7. Малахов С.В., Ольховский Г.Г., Трушечкин В.П., Хомиченко В.Н. Тепловые характеристики газотурбинных установок V-94.2, работающих в составе ПГУ-450Т на Северо-Западной ТЭЦ // Электрические станции. 2004. №5. С. 9-16.
8. Морев В.Г., Любишин Г.А. Некоторые особенности ПГУ с дожигом топлива в утилизаторах теплоты выхлопных газов // Промышленная энергетика. 2019. № 2. С. 21-27.
9. Балашов Ю.А., Березинец П.А., Агеев А.В., Беляков А.В., Тарадай Д.В. Анализ возможности сокращения потерь мощности в охлаждаемой энергетической ГТУ //Теплоэнергетика. 2019. № 9. С. 32-41.
10. Щинников П.А., Корепанова Е.М. сравнительный анализ расходов топлива перспективными энергетическими установками на основе CO₂-циклов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 3 (59). С. 94-106.
11. Менделеев Д. И., Марьин Г. Е., Ахметшин А. Р. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3(43). С. 47-56.
12. Marin G. E., Osipov B. M., Mendelev D. I. Research on the influence of fuel gas on energy characteristics of a gas turbine// E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, Kazan, 18–20 сентября 2019 года. Vol. 124. – Kazan: EDP Sciences, 2019. – P. 05063. – DOI 10.1051/e3sconf/201912405063.
13. Барановский В. В., Короткова Т.Ю., Тененик Н. С. Парогазовые энергетические установки в производстве электрической и тепловой энергии. Расчет тепловой схемы утилизационной парогазовой тепловой электростанции. Учебно-методическое пособие // СПб.:ВШТЭ СПбГУПТД. 2022. 52 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://nizrp.narod.ru/metod/tsuitd/1665105334.pdf>. Дата доступа: 12.05.2024.
14. Garievskii M.V. Optimization of CCGT operating modes at variable loads taking into account equivalent operating hours // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Volume 1683. 042022. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/4/042022
15. Stoppato A., Mirandola A., Meneghetti G., Lo Casto E. On the operation strategy of steam power plants working at variable load: Technical and economic issues // Energy. 2012. Vol. 37. Issue 1. pp. 228-236.
16. Зверева Э.Р., Дмитриев А.В., Шагеев М.Ф., Ахметвалиева Г.Р. Результаты промышленных испытаний карбонатной присадки к мазуту //Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 50-56.
17. Mathioudakis K., Stamatis A., Bonatiki E. Allocating the causes of performance deterioration in combined cycle gas turbine plants // Transactions of the ASME. 2002. Vol. 124. P. 256-262.
18. Smith R.W., Polukort P., Maslak C.E. and other's Advanced Technology Combined Cycles // GE Power Systems, GER-3936A. 2001. P.20. [Электронный ресурс] URL: <https://>

www.governova.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/resources/reference/ger-3936a-advanced-technology-combined-cycles.pdf (дата обращения 21.06.2024 г.).

19. Зверев Л.О., Злобин В.Г., Липатов Д.В., Зверева Э.Р. Модернизация тепловой схемы ПГУ-450 с увеличением тепловой мощности отопительных отборов и сохранения суммарной электрической мощности с помощью блочного дожигающего устройства // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем: сб. науч. тр. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. С. 109-111.

Авторы публикации

Зверев Леонид Олегович – аспирант Высшей школы технологий и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД).

Злобин Владимир Германович – канд. техн. наук, зав. кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологий и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД).

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Alexandrov O.I., Radoman N.V., Zhukovskaya T.E. Minimizing the power deficit in the power system, taking into account intersystem connections // Energy. Izvestia of higher educational institutions and energy associations of the CIS. 2013. No. 5. pp. 18-25.
2. Ivanov I. V., Strugovets S. A., Chechulin A. Yu. Prospects for the use of gas turbine technologies in the energy sector of Russia // Bulletin of UGATU. 2009 Vol. 13. No. 1 (34). pp. 26-31.
3. Budovsky V.P. The risk of power shortage in the power system //Electricity. 2009. No. 8. pp. 12-17.
4. Teplov B.D., Radin Yu.A. Increasing the maneuverability and economic efficiency of CCGT operation in the conditions of the wholesale electricity and capacity market // Thermal power engineering. 2019. No. 5. pp. 39-47
5. Vertkin M.A., Kolpakov S.P., Mikhailov V.E., Sukhorukov Yu.G., Khomenok L.A. Improvement of the steam-powered part of thermal power plants with heat recovery boilers for CHP plants in large cities of the Russian Federation // Teploenergetika. 2021. No.3. pp.34-40.
6. Zverev L.O., Zlobin V.G., Lipatov D.V., Zvereva E.R. Application of a block afterburning device in CCGT waste boilers //Modern problems of the theory of machines. 2023. No. 15. pp. 78-80.
7. Malakhov S.V., Olkhovsky G.G., In Trushechkin.P., In Khomichenko.N. Thermal characteristics of gas turbine units with V-94.2 operating as part of CCGT-450T at the North-Western CHPP // Electric stations. 2004. No.5. pp. 9-16.
8. Morev V.G., Lyubishin G.A. Some features of CCGT with afterburning of fuel in exhaust heat exchangers //Industrial energy. 2019. No. 2. pp. 21-27.
9. Balashov Yu.A., Berezinets P.A., Ageev A.V., Belyakov A.V., Taradai D.V. Analysis of the possibility of reducing power losses in a cooled power GTU //Thermal power engineering. 2019. No. 9. pp. 32-41.
10. Shchinnikov P.A., Korepanova E.M. comparative analysis of fuel consumption by promising power plants based on CO2 cycles // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2023. Vol. 15. No. 3 (59). pp. 94-106.
11. Mendelev D. I., Maryin G. E., Akhmetshin A. R. Indicators of the regime characteristics of the combined-cycle power unit PGU-110 MW at partial loads // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2019. Vol. 11. No. 3(43). pp. 47-56.
12. Marin G. E., Osipov B. M., Mendelev D. I. Investigation of the effect of fuel gas on the energy characteristics of a gas turbine // E3S Web conferences : International Scientific and Technical Conference "Intelligent Energy Systems" 2019, SES 2019, Kazan, September 18-20, 2019. Volume 124. – Kazan: EDP Sciences, 2019. – p. 05063. – DOI 10.1051/e3sconf/201912405063.
13. Baranovsky, V. V., Korotkova T.Yu., Tenenik N. S. Combined-cycle power plants in the production of electric and thermal energy. Calculation of the thermal scheme of the utilization of a combined-cycle thermal power plant. Educational and methodological manual // St. Petersburg:HSE SPbGUPTD. 2022.

52 p. [Electronic resource]. Access mode <https://nizrp.narod.ru/metod/tsuitd/1665105334.pdf> . Access date: 12.05.2024.

14. Garievsky M.V. Optimization of CCGT operating modes under variable loads, taking into account equivalent operating hours // Physical Journal: Conference Series. 2020. Volume 1683. 042022. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/4/042022

15. Stoppato A., Mirandola A., Meneghetti G., Lo Casto E. On the strategy of operation of steam power plants operating with variable load: technical and economic issues // Energy. 2012. Volume 37. Issue 1. pp. 228-236.

16. Zvereva E.R., Dmitriev A.V., Shageev M.F., Akhmetvalieva G.R. Results of industrial tests of a carbonate additive to fuel oil // Thermal power engineering. 2017. No. 8. pp. 50-56.

17. Matiudakis K., Stamatis A., Bonataki E. Determining the causes of deterioration in the performance of combined cycle gas turbine plants // Proceedings of ASME. 2002. Volume 124. pp. 256-262.

18. Smith R.W., Polukort P., Maslak C.E. and other's Advanced Technology Combined Cycles // GE Power Systems, GER-3936A. 2001. p.20. [Electronic resource] URL: https://www.governova.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/resources/reference/ger-3936a-advanced-technology-combined-cycles.pdf (accessed 06/21/2024).

19. Zverev L.O., Zlobin V.G., Lipatov D.V., Zvereva E.R. Modernization of the thermal circuit of the PGU-450 with an increase in the thermal power of heating selections and preservation of the total electric power using a block afterburning device // Strategy and tactics of development of production and economic systems: collection of scientific tr. - Gomel: Sukhoi State Technical University, 2023. pp. 109-111.

Authors of the publication

Leonid O. Zverev – St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia.

Vladimir G. Zlobin – St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia.

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **01.08.2024 г.**

Отредактировано **29.08.2024 г.**

Принято **16.09.2024 г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 621.22

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-104-117

МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Шилин А.Н., Богале М.А., Коновалова Л.А.

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия
eltech@vstu.ru, mila27121989@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в использовании искусственной нейронной сети для прогнозирования объема воды в водохранилище Кока (гидроэлектростанция Кока в Эфиопии). Как известно, гидроэнергетика, являясь возобновляемой энергией, относится к числу технологий, которые производят электроэнергию с наименьшим воздействием на глобальное изменение климата. За это время Эфиопия получала около 87% (4674 МВт) электроэнергии от гидроэнергетики. Это одна из стран, затронутых проблемами климатических явлений, таких как наводнения, засухи и ураганы, которые влияют на потенциал гидроэнергетики. ЦЕЛЬ. Для поддержания безопасной эксплуатации, хорошей эффективности производства, лучшего управления водными ресурсами, эффективного принятия решений, предотвращения аварий и обеспечения раннего предупреждения и ограничений на производство электроэнергии необходимо прогнозирование объема воды. Что, в свою очередь, является нелинейной задачей, и для этой цели подходит нейронная сеть типа мультилинейного персептрона (MLP). МЕТОДЫ. В этом исследовании были определены различные модели с различным выбранным количеством узлов и слоев, поскольку не существует конкретного правила для определения архитектуры искусственной нейронной сети. Статистический анализ (среднеквадратичная ошибка (MSE) и R-квадрат (R²)) использовался для проверки достоверности модели путем сравнения фактических значений притока воды с прогнозируемыми значениями. РЕЗУЛЬТАТЫ. Было проведено предсказание притока с использованием метода ANN, основанного на многослойном персептроне (MLP). Производительность каждой модели была оценена с использованием среднеквадратичной ошибки (MSE) и коэффициента эффективности (R²), которые являются одними из наиболее часто используемых статистических методов в гидрологическом моделировании. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты показывают, что модели успешно предсказали паводковый сток над водохранилищем.

Ключевые слова: приток в коллектор; прогнозирование; искусственная нейронная сеть; многослойный персептрон; гидроэлектростанция.

Для цитирования: Шилин А.Н., Богале М.А., Коновалова Л.А. Модель искусственной нейросети для прогнозирования объема воды в водохранилище // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 104-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-104-117.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL FOR PREDICTING WATER INFLOW INTO A RESERVOIR

Shilin A.N., Bogale M.A., Konovalova L.A.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
eltech@vstu.ru, mila27121989@mail.ru

Abstract: RELEVANCE of this study lies in the use of an artificial neural network to predict the volume of water in the Coca reservoir (Coca hydroelectric power station in Ethiopia). As

you know, hydropower, being renewable energy, is one of the technologies that produce electricity with the least impact on global climate change. During this time, Ethiopia received about 87% (4,674 MW) of electricity from hydropower. It is one of the countries affected by the problems of climatic phenomena, such as floods, droughts and hurricanes, which affect the potential of hydropower. **THE PURPOSE.** In order to maintain safe operation, good production efficiency, better water resources management, effective decision-making, accident prevention and early warning and restrictions on electricity production, water volume forecasting is necessary. Which, in turn, is a nonlinear problem, and a multilinear perceptron-type neural network (MLP) is suitable for this purpose. **METHODS.** In this study, different models with different selected number of nodes and layers were identified, since there is no specific rule for determining the architecture of an artificial neural network. Statistical analysis (mean square error (MSE) and R-squared (R²)) was used to verify the validity of the model by comparing the actual values of water inflow with the predicted values. **results.** The inflow prediction was carried out using the ANN method based on a multilayer perceptron (MLP). The performance of each model was evaluated using the mean square error (MSE) and efficiency coefficient (R²), which are among the most commonly used statistical methods in hydrological modeling. **CONCLUSION.** The results obtained show that the models successfully predicted flood runoff over the reservoir.

Keywords: reservoir inflow; forecasting; artificial neural network; multilayer perceptron; hydroelectric power station.

For citation: Shilin A.N., Bogale M.A., Konovalova L.A. Artificial neural network model for predicting water inflow into a reservoir. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (5): 104-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-104-117.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

Водохранилище используется для управления водными ресурсами, и гидрография его притока и оттока имеет решающее значение для планирования водохранилища для сельскохозяйственного, промышленного и муниципального водопользования; производства гидроэнергии; отдыха; экологических требований; и защиты от наводнений.

Водный баланс водохранилища связан со многими различными гидрологическими процессами, такими как прямое выпадение осадков, поверхностное испарение, дренаж из районов выше по течению (приток) и сброс воды через водосбросы (отток). Однако в большинстве случаев данные о погоде и уровнях воды в водохранилищах часто являются единственными наблюдениями, доступными для анализа водного бюджета [1]. Таким образом, бюджет водохранилища обычно оценивается на основе водного баланса водохранилища, но это может стать некорректной проблемой из-за отсутствия наблюдений. Некорректное уравнение водного баланса может быть решено только тогда, когда станут известны два из трех членов или переменных, а именно приток, уровень воды и отток. Таким образом, при наличии записей об уровне воды в водохранилище уравнение водного баланса может быть решено путем оценки одной из двух оставшихся неизвестных переменных притока и оттока. В этот период нулевого оттока количество воды, поступающей в водохранилище (т.е. гидрограф притока), может быть непосредственно определено количественно на основе изменений уровня воды в водохранилище (или запасов воды) после учета количества осадков и скорости испарения в уравнении водного баланса водохранилища [2].

Постановка задачи водного баланса водохранилища [3]:

- Уравнение баланса массы: $\frac{ds}{dt} = I - O \rightarrow \frac{ds}{dt} = (RI + R) - (E + RO)$;
- Две неизвестные переменные в одном уравнении;
- Известные переменные: S – из данных об уровне воды в водохранилище, R и E (из данных о погоде);
- Неизвестные переменные: RI и RO ;
- * ; I – общий приток; O – общий отток; RI – приток в водохранилище; R – осадки; E – испарение; RO – отток из водохранилища.

Чаще всего проблемы возникают, когда естественный приток воды превышает установленную мощность головной ГЭС, и возникает необходимость в сливе воды. Верно и то, что в периоды засухи расход воды может легко превышать естественный

приток, что приводит к снижению напора ГЭС и, следовательно, к снижению выработки электроэнергии. Из-за этих фактов для оператора очень важно иметь возможность предвидеть изменения притока воды во времени.

Следовательно, цель исследования заключается в разработке метода прогнозирования естественного притока воды в водохранилище с использованием искусственных нейронных сетей. Реализация прогнозирования, единственный способ принципиально нивелировать недостаток:

- а) прогнозирования водного режима реки, отличающегося также значительной инерционностью, с учётом климатических факторов, обуславливающих расход притока воды (количество воды в м^3 , протекающее через данное живое сечение реки в секунду);
- б) прогнозирования водопотребления;
- в) прогнозирования электрических нагрузок;
- г) использования плана регламентных работ, связанных с изменением эксплуатационных характеристик электростанции, например, вывода из эксплуатации одного из гидроагрегатов (или его запуска), а также оценки текущего износа гидроагрегатов.

Последнее зачастую обуславливает проблему холостых сбросов воды при сильных паводках, что само по себе затрудняет эффективное функционирование ГЭС. Практика холостых сбросов воды в нижний бьеф (мимо турбин) является вынужденной мерой в случае превышения расхода притока воды по отношению к максимальному расходу воды через ГЭС, величина которого определяется исходя из ограничений по допустимой мощности генераторов, пропускной способности турбин, а также пределу передаваемой по линиям электропередачи мощности. Несоответствие перечисленных величин ГЭС и параметров речного стока приводит к массовым холостым сбросам воды и снижению энергетической эффективности станции.

Научная значимость исследования состоит в том, что разработанный метод позволит прогнозировать изменения притока воды и, следовательно, улучшить управление водохранилищем. Способность правильно прогнозировать увеличение естественного притока может также привести к увеличению производства электроэнергии за счет повышения гибкости в управлении запасенной водой. К сожалению, математическая зависимость между количеством осадков в разных местах и естественным притоком нелинейной, и соответствующие математические соотношения сложно найти. Поэтому необходимы новые решения. Одним из подходов, который является перспективным, это применение искусственных нейронных сетей. Главное преимущество методов, основанных на нейронных сетях, заключается в том, что для идентификации системы (которая, в свою очередь, может быть использована для построения модели системы 'черного ящика') не требуется точных знаний о физических свойствах самой системы [4]. По этой причине нейросетевые модели являются наиболее подходящими для прогнозирования естественного притока. Практическая значимость исследования заключается в возможности эффективного использования водных ресурсов, оптимизации производства гидроэнергии, планирования мероприятий по защите от наводнений и учета экологических требований при использовании водохранилища.

Теоретическая значимость данной работы заключается в исследовании применения нейронных сетей для прогнозирования притока воды на ГЭС Кока. Это открывает новые возможности для улучшения эффективности управления водными ресурсами, что может привести к снижению рисков наводнений и улучшению водоснабжения населенных пунктов. Для тестирования основанной на нейросетевом алгоритме модели прогнозирования притока воды мы использовали конкретные данные с ГЭС Кока (Эфиопия). За эксплуатацию водохранилища Кока традиционно отвечает Эфиопская электроэнергетическая корпорация (ЕЕРСо). Водохранилище Кока используется для производства электроэнергии и орошения, и его работой управляет Комитет по эксплуатации. Расположенное ниже по течению от плотины, водохранилище обеспечивает основной источник электроснабжения для всей страны. Благодаря трем гидроэлектростанциям, расположенным внизу, электроэнергия производится эффективно и надежно. Кроме того, затопленная долина ниже плотины играет важную роль в орошении сельскохозяйственных угодий. Водохранилище предоставляет воду для орошения более чем 70 000 гектаров земли, учитывая потребности в воде исходя из сезонных особенностей. Комитет по эксплуатации водохранилища Кока, включающий представителей Электрического совета и Министерства водных ресурсов и энергетики, разрабатывает графики работы и управляет операциями водохранилища. Графики

учитывают множество факторов, включая потребности в электроэнергии, безопасность от наводнений для застройки ниже по течению и потребности в водоснабжении населенных пунктов. Благодаря внимательному наблюдению комитета за работой водохранилища удалось предотвратить возникновение значительных наводнений и минимизировать ущерб от них. Это также привело к улучшению доступа к воде для населения и повысило эффективность орошения сельскохозяйственных угодий в затопленной долине [5]. По этой причине очень важно прогнозировать приток.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что разработанный алгоритм может быть использован для прогнозирования притока воды на ГЭС Кока и других гидроэлектростанциях, что позволит улучшить эффективность управления водными ресурсами и повысить безопасность населения. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы для разработки аналогичных систем прогнозирования в других областях, где необходим контроль за изменением уровня воды. Использование нейронных сетей имеет смысл при идентификации, контроле и прогнозировании. Основными свойствами нейронных сетей являются их нелинейность и обобщенность; то есть нейронная сеть может давать хорошие результаты даже для входных выборок, которые сильно отличаются от обучающих выборок [6].

Материалы и методы (Materials and methods)

Искусственные нейронные сети

Модель искусственной нейронной сети является полезным инструментом для моделирования сложных нелинейных систем и составления прогнозов. Таким образом, нейронные сети - это инструмент с большим потенциалом для применения в системах резервуаров. Это выражается в виде очень сложной, нелинейной и параллельно распределенной операционной системы благодаря способности к обучению, комбинированию, адаптации и обобщению. Нейроны в человеческом мозге общаются посредством электрических сигналов, которые они создают в химической среде. Следовательно, мозг можно рассматривать как структуру очень плотной электрической сети. При необходимости команды вырабатываются в центральной нервной системе и передаются в соответствующие органы. Он управляет центральной нервной системой с помощью соединений обратной связи, которые подтверждают предупреждения в этих органах. В большинстве случаев искусственная нейронная сеть - это адаптивная система, которая изменяет свою структуру на основе внешней или внутренней информации, проходящей через сеть. Они могут быть использованы для моделирования сложных взаимосвязей между входами и выходами [7].

Искусственные нейронные сети – это компьютерные программы, которые могут стимулировать нервную систему, составляющую человеческий мозг, и генерировать новую информацию из ранее изученных или классифицированных данных с помощью нейронных датчиков и принимать решения путем принятия решений. Он используется во многих областях, таких как распознавание образов, идентификация систем, роботизированная обработка сигналов, области нелинейного управления [8]. Как показано на рисунке 1, искусственные нервные клетки состоят из пяти основных частей. Это входные данные, веса, передаточная функция, функция активации и выходные данные.

Нейронная сеть в интеллектуальном анализе данных - это метод классификации, который принимает входные данные, обучается распознавать структуру входных данных и прогнозировать выходные данные для новых входных данных аналогичного типа. Нейронная сеть формирует основу глубокого обучения, подраздела машинного обучения, который относится к искусственному интеллекту. Точно так же, как человеческий мозг отвечает за интеллект и его способность к различению, нейронная сеть также имитирует человеческий мозг, извлекает уроки из его опыта и применяет это обучение для классификации и прогнозирования.

Искусственная нейронная сеть состоит из трех функциональных уровней. Они состоят из (а) входного слоя, (б) скрытого слоя и (в) выходного слоя. Скрытый слой может состоять из нескольких скрытых слоев, как показано на рисунке 2.

Основной принцип работы искусственных нейронных сетей показан на рисунках 1 и 2.

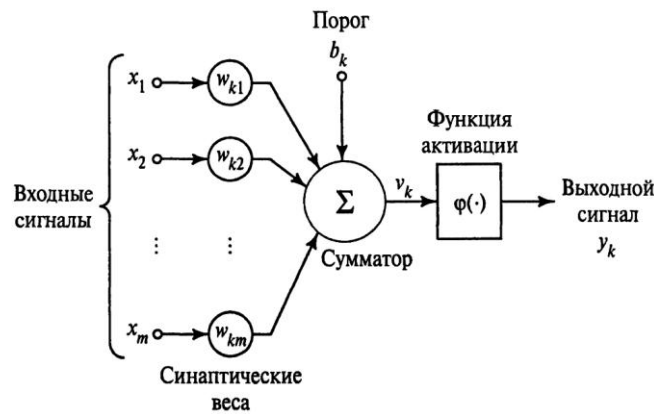


Рис. 1. Математическая модель нейрона

Fig. 1. Mathematical model of a neuron

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

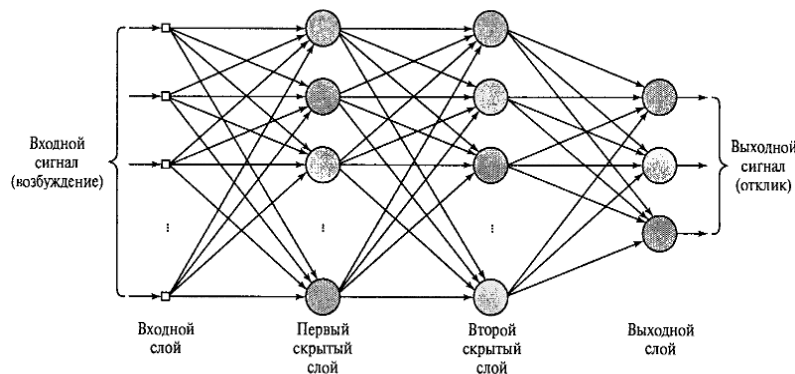


Рис. 2. Образование «нейронной сети»

Fig. 2. Formation of a "neural network"

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Единицей обработки информации в нейронной сети является нейрон. Математическая модель нейрона [9] представляет собой абстракцию биологического нейрона, используемую в области искусственного интеллекта и нейронных сетей [10]. Ее цель – предоставление математического описания работы нейрона и его взаимодействия с другими нейронами (рис. 1). Одна из самых распространенных математических моделей нейрона – модель Мак Каллока-Питтса. В этой модели нейрон представляется в виде узла, который принимает несколько входных сигналов и производит выходной сигнал на основе этих входных сигналов. Входные сигналы умножаются на веса, которые определяют силу влияния каждого входного сигнала на выходной сигнал. Затем взвешенные входные сигналы суммируются и пропускаются через функцию активации, которая определяет, каким образом суммированный вход будет преобразован в выходной сигнал. Различные функции активации могут быть использованы в модели нейрона, включая сигмоидную функцию, гиперболический тангенс и функции ReLU. Выбор функции активации зависит от конкретной задачи и требований моделирования.

Функция ReLU (Rectified Linear Unit) имеет несколько преимуществ, которые делают ее популярным выбором для активации нейронов в нейронных сетях:

1. Простота и эффективность: Функция ReLU очень проста в вычислении и не требует сложных операций, что делает ее вычислительно эффективной и быстрой.

2. Решение проблемы затухающего градиента: ReLU помогает избежать проблемы затухающего градиента, которая может возникнуть при использовании других функций активации, таких как сигмоида или тангенс.

3. Способствует разреженности активаций: Функция ReLU может привести к разреженным активациям нейронов, что способствует улучшению обобщающей способности модели и предотвращает переобучение.

4. Подходит для глубоких нейронных сетей: ReLU хорошо работает в глубоких нейронных сетях благодаря своей способности передавать градиенты и ускорять обучение.

5. Нелинейность: Функция ReLU вводит нелинейность в модель, что позволяет выучивать более сложные зависимости в данных.

Из-за этих преимуществ функция ReLU широко используется в нейронных сетях и является одной из наиболее популярных функций активации. Эта функция может преодолеть проблему исчезающего градиента, в отличие от других функций активации, потому что она выполняет пороговую операцию для входных элементов, так что она приводит в порядок количество входных данных ниже нуля (отрицательные значения), чтобы получить результат, равный нулю, это свойство называется разреженностью, т.е. активацией скрытых слоев в нейронные сети имеют истинные нулевые значения, поэтому обучение происходит быстрее, в то время как выходные данные функции имеют линейный тренд, когда входные значения положительны (рис. 3).

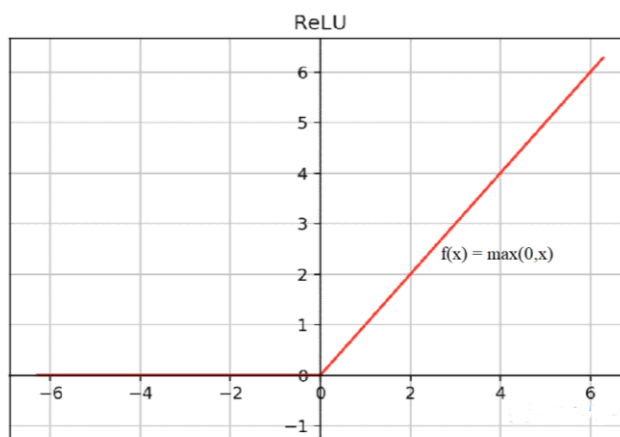


Рис. 3. Кривая функции ReLU

Fig. 3. The curve of the ReLU function

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Математически функцию активации ReLU можно определить как: $f(x)$, равную $\max(0, x)$, так что $\min(0, x) = x_i$, если $x_i \geq 0$, или $\min(0, x) = 0$, если x_i меньше нуля [11].

Ограниченность однослойных нейронных сетей, связанная с линейной неразделимостью обучающих данных, подробно доказывается в [12]. Поэтому наиболее распространенным типом ИНС является перцептронная многослойная сеть, состоящая из нескольких последовательно соединённых слоёв нейронов.

В каждой из задач математического моделирования нейронная сеть играет роль универсального аппроксиматора функции от нескольких переменных, реализуя нелинейную функцию

$$y = f(x), \quad (1)$$

где X – это входной вектор, а y – реализация векторной функции нескольких переменных [12]. В контексте задачи математического моделирования процесса прогнозирования притока воды данная функция примет вид

$$y = (x_1, x_2, x_3), \quad (2)$$

где y – приток воды; X_1 – испарение; X_2 – осадки; X_3 – уровень воды.

Одним из наиболее популярных нейропакетов является программа Python, обладающая широкими возможностями моделирования нейронных сетей различной архитектуры, а также простым и понятным интерфейсом.

Решение задачи аппроксимации нелинейной функции с помощью нейронных сетей выполняется в несколько этапов.

Подготовка данных для обучения и проверки корректности работы нейронной сети

На основе информации о притоке и соответствующих гидрологических условиях, собранной метеостанцией за годы N и $N-1$, мы сформируем таблицу 1. Как упоминалось выше, известно, что (при анализе водного баланса) испарение, приток воды и осадки в водохранилище напрямую влияют на уровень воды в водохранилище.

Стандартная процедура разделяется тем, что набор данных разбивается на обучающие 80% данных, а для теста – на 20% данных.

Прежде чем разрабатывать какую-либо модель машинного обучения, сначала необходимо анализировать данные, чтобы определить, существует ли какая-либо линейная корреляция между переменными (рис. 4).

Таблица 1

Информация о входных и выходных переменных в соответствии с наблюдениями метеостанции на водохранилище Кока

Information on input and output variables according to observations from the weather station at Koka Reservoir

Дата	Испарение, мм	Осадки, мм	Уровень воды, м	Приток воды, млн. куб. м
	x_1	x_2	x_3	y
01.N-1	204,6	28,7	109	10,65
02.N-1	134	20	107,9	6,23
03.N-1	210,8	20	107	27,1
04.N-1	198	12,23	106	22,17
05.N-1	189,1	14,36	105	89,73
06.N-1	171	93,1	104,5	68,89
07.N-1	161,2	251,9	106	377,3
08.N-1	151,9	251,9	108,5	893,49
09.N-1	141	133,7	110,7	267,38
10.N-1	192	20	110,5	43,94
11.N-1	192	20	109,7	24,6
12.N-1	186	20	109	11,83
01.N	204,6	28,7	108	8,65
02.N	134	20	107,5	7,66
03.N	210,8	20	106,5	23,49
04.N	198	12,23	105,5	44,59
05.N	189,1	14,36	105	39
06.N	171	93,1	104	68,63
07.N	161,2	251,9	107	482,06
08.N	151,9	251,9	109,5	833,89
09.N	141	133,7	110	405,95
10.N	192	20	110,4	45,13
11.N	192	20	109,5	25,97
12.N	186	20	109	12,48

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

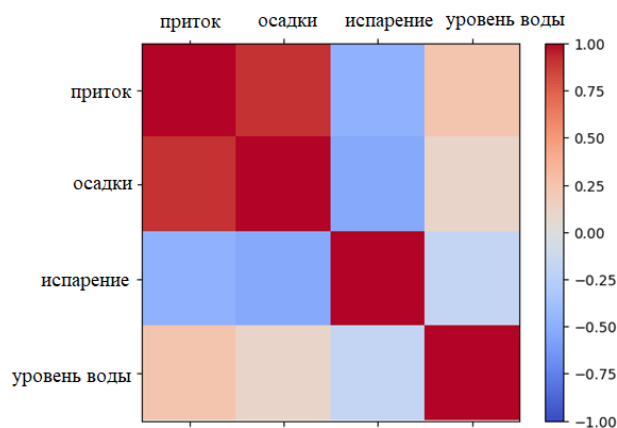


Рис. 4. Корреляция между переменными

Fig. 4. Correlation between variables

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из данного множества данных отделяются две части, которые не пересекаются. Одна из них называется обучающим набором данных и используется для обучения нейронной сети. Другая часть, выделенная курсивом, является контрольным набором данных, который не используется в процессе обучения, но служит для проверки качества работы сети [13].

Для улучшения качества и скорости обучения нейронной сети необходимо привести входные данные к определенному диапазону значений $[-1; 1]$ [11]. Формула пересчета значения признака x для i -го примера выборки в интервал $[a; b]$ такова:

$$\tilde{x}_i = \frac{(x_i - x_{\min})(b - a)}{x_{\max} - x_{\min}} + a, \quad (3)$$

где $X_{\min}$, $X_{\max}$ – минимальное и максимальное выборочные значения признака.

Выполнив ряд элементарных преобразований, выражение (3) можно будет записать в следующем виде:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \frac{1}{b-a}(x_{\min} - x_{\max})}{\frac{1}{b-a}(x_{\min} - x_{\max})} \quad (4)$$

Python автоматически выполняет нормирование входных сигналов в диапазон $[-1; 1]$ для подачи на вход нейронной сети по правилу (4).

Согласно нашему набору данных, Python выполнил нормализацию данных, показанную на рисунке 5:

```
array([[0.00498163, 0.0687195, 0.9192709, 0.7462683 ],
       [0.01796542, 0.03241958, 0.8333334, 0.2985077 ],
       [0.02352186, 0.03241958, 1.0000001, 0.44776154],
       [0.01796542, 0.03241958, 0.8333334, 0.2985077 ],
       [0.09410996, 0.00888722, 0.7174479, 0.14925385],
       [0.07062192, 0.3374223, 0.48177087, 0.07462692],
       [0.41822016, 1.0, 0.35416663, 0.2985077 ],
       [1.0, 1.0, 0.23307288, 0.67164135],
       [0.29433313, 0.5068219, 0.09114587, 1.0000001 ],
       [0.04250164, 0.03241958, 0.7552084, 0.97014904],
       [0.02070419, 0.03241958, 0.7552084, 0.8507471 ],
       [0.00631157, 0.03241958, 0.6770834, 0.7462683 ],
       [0.0027275, 0.0687195, 0.9192709, 0.5970144 ],
       [0.0016117, 0.03241958, 0.0, 0.5223875 ],
       [0.01945315, 0.03241958, 1.0000001, 0.3731346 ],
       [0.04323423, 0.0, 0.8333334, 0.22388077],
       [0.03693393, 0.00888722, 0.7174479, 0.14925385],
       [0.07032888, 0.3374223, 0.48177087, 0.07462692],
       [0.53629154, 1.0, 0.35416663, 0.44776154],
       [0.932827, 1.0, 0.23307288, 0.8208952 ]], dtype=float32)
```

Рис. 5. Структурный синтез нейронной сети Fig. 5. Structural synthesis of a neural network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для оценки оптимального числа нейронов в скрытых слоях персептрона может применяться формула, являющаяся следствием теорем Арнольда – Колмогорова – Хехт-Нильсена [13]:

$$\frac{N_y \cdot Q}{1 + \log_2 Q} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (5)$$

где N_y – размерность выходного сигнала;

Q – число элементов обучающей выборки;

N_w – необходимое число синаптических весов;

N_x – размерность входного сигнала.

Согласно нашему набору данных: $3,76 \leq N_w \leq 37,5$.

При этом число нейронов скрытого слоя двухслойного персептрона:

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y} \quad (6)$$

Использование формул (5), (6) при $N_x = 3$, $N_y = 1$, $Q = 20$ даёт минимальное значение для $N = 1$ и максимальное $N = 9$.

Далее определим модель с нейронами (выбрав от 1 до 9 в зависимости от производительности) в первом скрытом слое и 1 нейроном в выходном слое, чтобы предсказать приток. Мы будем использовать функцию потерь средней абсолютной ошибки (MSE и R2) и эффективную версию Adam для стохастического градиентного спуска. Модель рассчитана на 795 тренировочных периодов с размером партии 32.

Обучение нейронной сети

Этап «обучение нейронной сети» является одним из основных этапов в разработке и использовании нейронных сетей. На этом этапе нейронная сеть настраивается на конкретную задачу путем обучения на обучающих данных. Процесс обучения включает следующие шаги: подготовка данных: обучающие данные должны быть предварительно подготовлены и структурированы таким образом, чтобы они были пригодны для обучения сети. Это может включать в себя предобработку данных, такую как нормализацию, удаление выбросов или заполнение пропущенных значений; определение архитектуры сети: нейронная сеть состоит из слоев нейронов, которые

соединены между собой. На этом этапе определяется структура сети, включая количество слоев, количество нейронов в каждом слое и типы активационных функций; инициализация весов: веса нейронной сети инициализируются случайными значениями. Это начальные значения, с которых начинается процесс обучения сети; прямой проход: обучающие данные передаются через нейронную сеть, происходит вычисление выходного значения сети; расчет функции потерь: функция потерь используется для определения разницы между выходными данными, полученными от нейронной сети, и ожидаемыми выходными данными. Чем меньше значение функции потерь, тем лучше результаты сети; распространение ошибки: ошибка, вычисленная на предыдущем шаге, распространяется обратно через сеть, влияя на веса каждого нейрона. Этот процесс называется обратным распространением ошибки; обновление весов: веса нейронной сети обновляются, используя различные алгоритмы оптимизации, такие как стохастический градиентный спуск или adam; повторение процесса: весь процесс (шаги 4-7) повторяется множество раз, пока сеть не достигнет приемлемого уровня точности на обучающих данных. Обучение нейронной сети может быть времязатратным процессом, особенно для сложных моделей или больших объемов данных. Поэтому обычно используются специализированные вычислительные ресурсы, такие как графические процессоры (GPU), для ускорения обучения.

В Python обратное распространение является наиболее распространенным алгоритмом обучения нейронных сетей. Это делает возможным градиентный спуск для многослойных нейронных сетей. Tensor Flow обрабатывает обратное распространение автоматически, поэтому не нужно глубокое понимание алгоритма.

Важной частью построения модели является разделение данных для обучения и тестирования, что гарантирует, что получена модель, которая может обобщаться за пределами обучающих данных, и что производительность и выходные данные будут статистически значимыми.

Результаты и обсуждения (Results and discussions)

Опрос обученной сети и проверка ошибки прогноза на контрольной выборке. Если значение ошибки находится в допустимых пределах, то задача считается решённой, и обученная нейронная сеть допускается к дальнейшему практическому применению.

Исторические данные метеорологических и гидрологических данных за 2005-2006 годы (месячное количество осадков, месячное испарение и месячный уровень воды) были использованы для нейросетевого моделирования в качестве входных переменных и ежемесячного притока воды в качестве выходных данных, чтобы оценить эффективность этого метода при прогнозировании притока воды на плотине ГЭС Кока (Эфиопия). Первоначально данные были предварительно обработаны путем устранения шума и нормализации данных. Для повышения производительности моделей в процессе обучения был использован алгоритм оптимизации, позволяющий минимизировать значение потерь или ошибку сети путем итеративного обновления весов сети на основе обучающих данных. Тип функции оптимизации ADAM был выбран, поскольку он является сильным и широко используется в последнее время для повышения производительности нейронной сети [14]. В этой статье было проведено предсказание притока с использованием метода ANN, основанного на многослойном персептроне (MLP). Модели были написаны на языке программирования python с использованием передаточной функции RELU и различных архитектур из-за отсутствия общего правила, которое было бы надежным для определения количества узлов и уровней в сети (рис. 6).

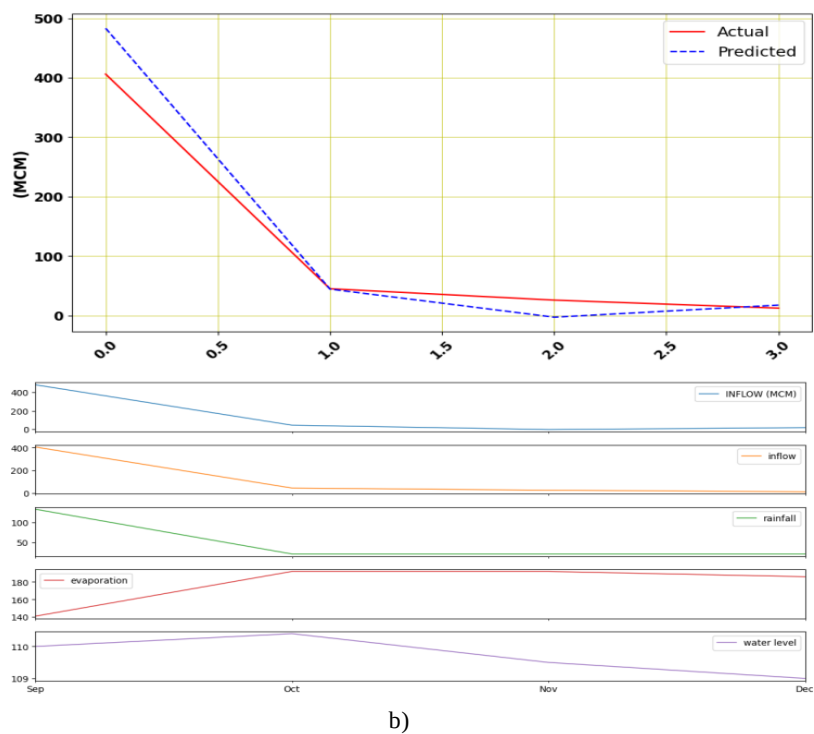
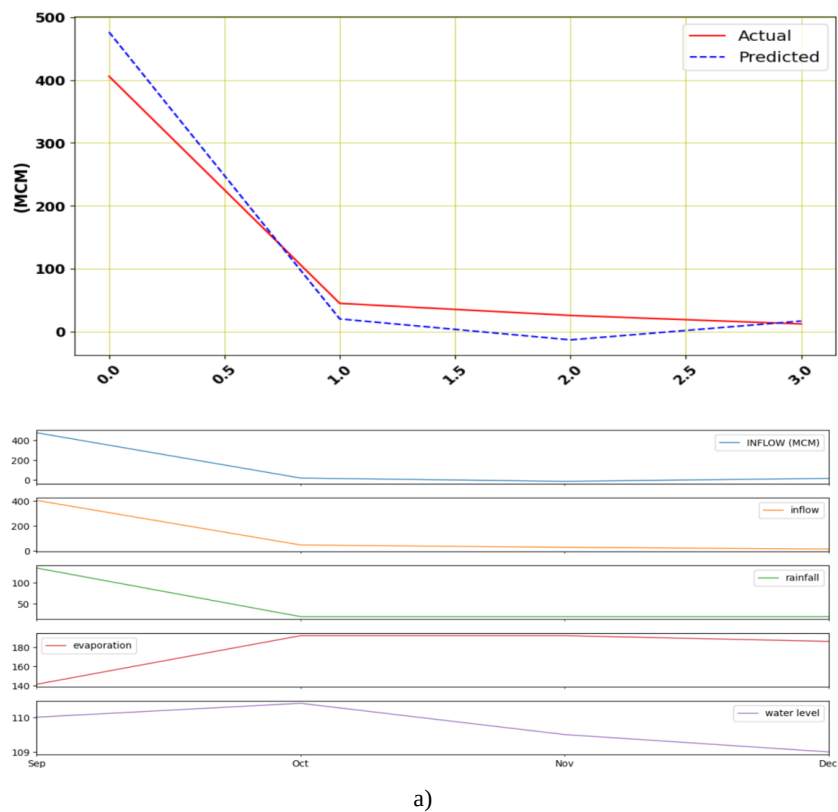
На графиках показаны тенденции, которые описывают взаимосвязь между прогнозируемыми и фактическими значениями притока воды за четыре месяца (сентябрь-декабрь).

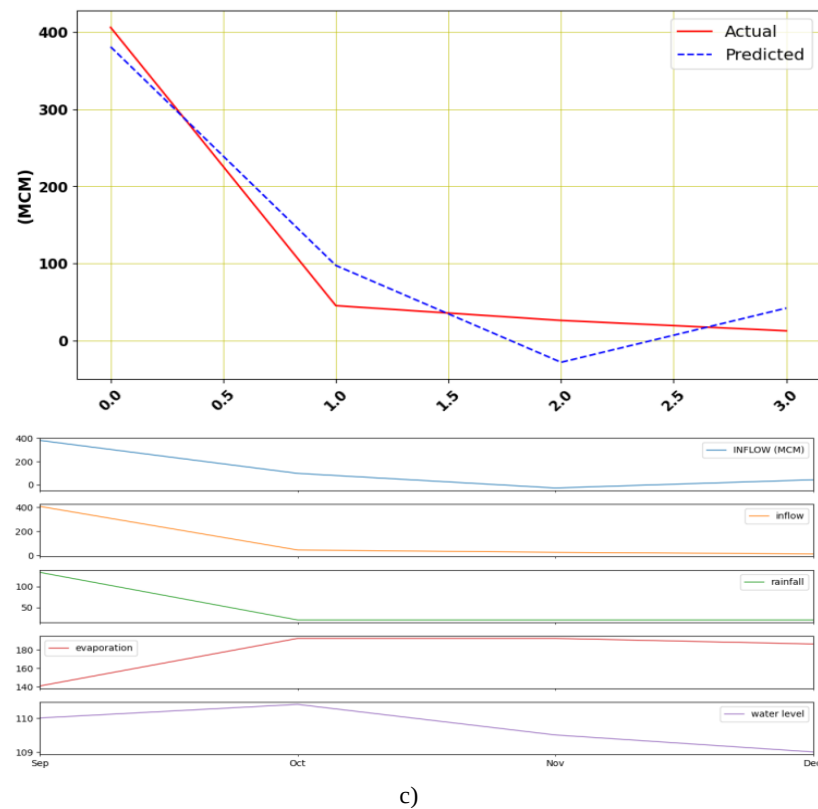
Производительность каждой модели (a-d) оценивается с использованием среднеквадратичной ошибки (MSE) и коэффициента эффективности (R2), которые являются одними из наиболее часто используемых статистических методов в гидрологическом моделировании. Эти методы могут измерить, насколько хорошо регрессия соответствует данным. Уравнения 7 и 8, используемые для расчета MSE и R2 соответственно, приведены ниже:

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - y_{io})^2}{n} \quad (7)$$

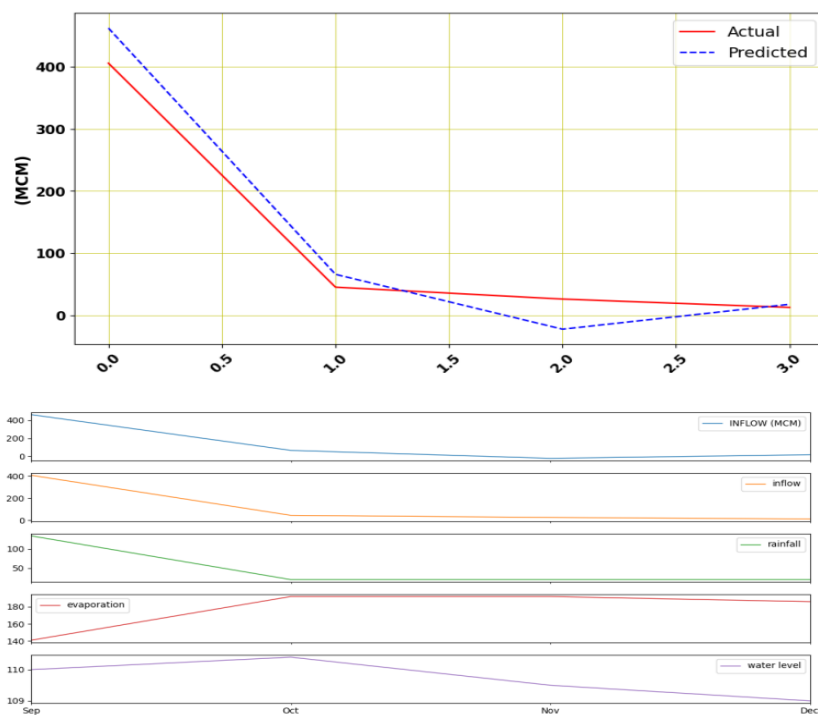
$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^n (y_{io} - y_{mean})^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n (y_i - y_{io})^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^n (y_{io} - y_{mean})^2 \right), \quad (8)$$

где y_i и y_{io} – прогнозируемые и фактические значения выходных данных соответственно, $mean$ – среднее значение фактического значения, а n – общее количество наблюдений. Минимальная ошибка относится к достоверности производительности компьютерной модели. Значение R^2 находится в диапазоне от 0 до 1. Как только коэффициент $R^2=1$, модель совершенна, но если он равен 0,5 или ниже, модель неудовлетворительная. Нулевое значение MSE означает идеальную модель [15].





c)



d)

Рис. 6. Многослойные модели персептронов (a-d) Fig. 6. Multilayer perceptron models (a-d)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В данной статье была использована структура из 4 моделей, включая один входной слой, один скрытый слой с разным числом нейронов и один выходной слой. Во входном слое было установлено 3 нейрона для каждой модели. Обучающий набор данных, составляющий 80% от общего объема данных, использовался для настройки весовых коэффициентов нейронных сетей. В соответствии как со значениями MSE, так и R2, представленными в таблице 2 линии тренда объясняют более 90% вариаций в данных, что означает, что прогнозирование очень хорошее. Модель D из шести нейронов в скрытом слое является лучшей среди других моделей и может

рассматриваться как идеальная модель. Другими словами, прогнозируемые значения притока соответствуют целевым значениям и поэтому валидность моделей для прогнозирования расхода доказана.

Таблица 2

Модели искусственных нейронных сетей, рассмотренные в исследовании
Models of artificial neural networks considered in the study

Модели	Тип сети	Передающая функция	Входных функций нет	Архитектура	Оптимизатор	MSE	R2
A	MLP	RELU	3	3-9-1	ADAM	1769,400879	0,934316
B	MLP	RELU	3	3-8-1	ADAM	1701,245239	0,936846
C	MLP	RELU	3	3-7-1	ADAM	1792,263062	0,933467
D	MLP	RELU	3	3-6-1	ADAM	1499,834351	0,944323

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В этом исследовании многослойные персептронные нейронные сети были использованы в качестве подхода для прогнозирования притока воды с использованием гидрологических и метеорологических данных с различных измерительных станций на водоразделе Кока-ГЭС. Важным шагом является предварительная обработка собранных необработанных данных перед построением сети. MLP подходит и широко используется в гидрологических приложениях, подобных этому исследованию. Большая часть данных была собрана для обучения моделей. Различные архитектуры были определены на основе итераций. Статистические методы R2 и MSE успешно доказали валидность моделей.

Естественно, что для повышения точности моделирования процесса прогнозирования притока воды в водохранилища с помощью нейронных сетей необходимо гораздо большее количество обучающих выборок.

Литература

1. Чаби, Амеди и др. «Оценка водного баланса Илаукоского водохранилища Уэме на водосборе Саве (Бенин, Западная Африка)» (2019).
2. Чжоу, Уган и др. «Оценка притока пласта при значительном боковом притоке с использованием метода сопряженных уравнений». *Journal of Hydrology* 574 (2019): 360-372.
3. Сон, Чон-Хун, Ёнгу Хер и Мун-Сон Кан. «Оценка резервуара. Приток и отток по данным наблюдений за уровнем воды с использованием экспертных знаний: работа с некорректным уравнением водного баланса при управлении водохранилищами». *Water Resources Research* 58.4 (2022): e2020WR028183.
4. Голоб Р., Штокель Т., Гргич Д. Прогнозирование притока воды на основе нейросетей // *Инженерная практика управления*. – 1998. – Т. 6. – №. 5. – С. 593-600.
5. Гура, Микиас, Аддис Бекеле и Селамавит Гебейеху. «Гидрологические данные Система обработки и управления» - *Международный журнал инженерных исследований и технологий (IJERT)* ISSN: 2278-0181- Том 9, выпуск 05, май 2020 г.
6. Хайкин С. Нейронные сети: MacMillan College Publ //Co., Нью-Йорк. – 1994.
7. ТЕМИЗ, Темель, Юнус ДАМЛА и Эрдинч КЕСКИН. «Сравнение различных методов искусственных нейронных сетей при определении емкости резервуара». *Журнал науки и технологий Университета Эрзинджан* 15.1 (2022): 183-203.
8. Кескенлер, Мустафа Фуркан и Эйюп Фахри Кескенлер. «Из прошлого в настоящее искусственные нейронные сети и их история». *Takvim-i Vekayi* 5.2 (2017): 8-18.
9. Шилин, А. Н. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования аварий воздушных линий электропередачи в гололёдный период / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, С. С. Дементьев // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2016. – № 2. – С. 15-21. – EDN VVKJSP.
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / под ред. Н.Н. Куусуль; пер. с англ. Н.Н. Куусуль, А.А. Шелестова. 2-е изд., испр. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
11. Бородин, Георгий Дмитриевич. "Краткий обзор и классификация искусственных нейронных сетей. «Известия Тульского государственного университета. Технические науки 11 (2021): 45-53.
12. Осовский, Станислав. Нейронные сети для обработки информации. Финансы и статистика, 2004.
13. Ясницкий, Леонид Нахимович. «Введение в искусственный интеллект» (2008).
14. Джаис, Имран Хан Мохд, Амелия Ритахани Исмаил и Сайед Камрун Ниса.

«Адаптивный алгоритм оптимизации для широкой и глубокой нейронной сети». Инженерия знаний и наука о данных 2.1 (2019): 41-46.

15. Чикко, Давиде, Маттейс Дж. Уорренс и Джузеппе Юрман. «Коэффициент детерминации R-квадрат более информативен, чем SMAPE, MAE, MAPE, MSE и RMSE при оценке регрессионного анализа». PeerJ Computer Science 7 (2021): e.623.

Авторы публикации

Шилин Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника», ВолгГТУ. ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6416-4357> e-mail: eltech@vstu.ru

Богале Мулуken Асамнеу – аспирант кафедры «Электротехника», ВолгГТУ. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4389-815X> e-mail: mulem2as1977@gmail.com

Коновалова Людмила Александровна – ст. преподаватель кафедры «Электротехника», ВолгГТУ. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3844-574X> e-mail: mila27121989@mail.ru

References

1. Chabi, Amedée, et al. "Assessment of Water Balance in the Ilauko Reservoir of the Ouémé at Savè Catchment (Benin, West Africa)." (2019).
2. Zhou, Wugang, et al. "Estimation of reservoir inflow with significant lateral inflow by using the adjoint equation method." Journal of Hydrology 574 (2019): 360-372.
3. Song, Jung-Hun, Younggu Her, and Moon-Seong Kang. "Estimating Reservoir Inflow and Outflow from Water Level Observations Using Expert Knowledge: Dealing With an Ill-Posed Water Balance Equation in Reservoir Management." Water Resources Research 58.4 (2022): e2020WR028183.
4. Golob R., Shtokel T., Grgic D. Forecasting water inflow based on neural networks // Engineering management practice. – 1998. – Т. 6. – No. 5. – pp. 593-600.
5. Gurara, Mikiyas, Addis Bekele, and Selamawit Gebeyehu. "Hydrological Data Processing and Management System."- International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181- Vol. 9 Issue 05, May-2020
6. Haykin S. Neural networks: MacMillan College Publ //Co., New York. – 1994.
7. TEMİZ, Temel, Yunus DAMLA, and Erdinç KESKİN. "Comparison of Different Artificial Neural Network Methods in Determining Reservoir Capacity." Erzincan University Journal of Science and Technology 15.1 (2022): 183-203.
8. Keskenler M. F., Keskenler E. F. From past to present artificial neural networks and history //Takvim-i Vekayi. – 2017. – Т. 5. – №. 2. – С. 8-18.
9. Shilin, A. N. Application of artificial neural networks for forecasting accidents of overhead power lines during the icy period / A. N. Shilin, A. A. Shilin, S. S. Dementyev // Elektro. Electrical engineering, electrical power engineering, electrical industry. – 2016. – No. 2. – P. 15-21. – EDN VVKJSP.
10. Khaikin S. Neural networks: a complete course / ed. N.N. Kussul; lane from English N.N. Kussul, A.A. Shelestova. 2nd ed., rev. M.: Williams, 2006. 1104 p.
11. Borodin, Georgy Dmitrievich. «Brief overview and classification artificial neural Networks» News of Tula State University. Technical Sciences 11 (2021): 45-53
12. Osovsky, Stanislav. Neural networks for information processing. Finance and statistics, 2004.
13. Yasnitsky, Leonid Nakhimovich. "Introduction to Artificial Intelligence." (2008).
14. Jais, Imran Khan Mohd, Amelia Ritahani Ismail, and Syed Qamrun Nisa. "Adam optimization algorithm for wide and deep neural network." Knowledge Engineering and Data Science 2.1 (2019): 41-46.
15. Chicco, Davide, Matthijs J. Warrens, and Giuseppe Jurman. "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation." PeerJ Computer Science 7 (2021): e623.

Authors of the publication

Alexander N. Shilin – Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6416-4357> e-mail: eltech@vstu.ru

Bogale Muluken Asamneu – Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4389-815X> e-mail: mulem2as1977@gmail.com

Lyudmila A. Konovalova – Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3844-574X> e-mail: mila27121989@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **16.02.2024 г.**

Отредактировано **27.02.2024 г.**

Принято **07.03.2024 г.**

Сдано в набор 15.10.2024 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 00.10.2024 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5307
Дата выхода в свет 30.10.2024 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

