Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года ISSN 2072-2672 Индекс 18079 2025 / Вып. 1

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Г.В. Ледуховский, д-р техн. наук (Иваново) (главный редактор)
И.К. Муравьев, канд. техн. наук (Иваново) (зам. главного редактора)
Е.Н. Бушуев, д-р техн. наук (Иваново)
А.Р. Гайдук, д-р техн. наук (Таганрог)
В.П. Жуков, д-р техн. наук (Иваново)
Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук (Иваново)
А.Б. Капранова, д-р физ.-мат. наук (Ярославль)
С.В. Клюнина, нач. УИУНЛ (Иваново)
А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)
В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
А.В. Митрофанов, д-р техн. наук (Иваново)
А.Ю. Мурзин, канд. техн. наук (Иваново)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ю. Таршис, д-р техн. наук (Ярославль)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, А.Ю. Мурзин, А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ **С.В. Клюнина**
Технический редактор **Н.В. Королева**
Редактор **С.М. Коткова**

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

С.А. Банникова, А.В. Банников, М.В. Козлова, В.Н. Шарыпов. Повышение качества городской среды за счет использования трансформатора теплоты сезонного действия в системах теплоснабжения.....**5**

В.В. Папин. Расчет парокомпрессионного и абсорбционного тепловых насосов с учетом гидравлического сопротивления хладагента.....**12**

О.Б. Колибаба, М.В. Козлова, А.Б. Гаряев, Ю.В. Морозов. Исследование гидродинамических закономерностей в слое влажных твердых коммунальных отходов в процессе их обезвоживания.....**23**

В.А. Рыжиков, О.А. Ерохина, Э.Л. Аким, П.В. Луканин. Совместная переработка отходов в комбинированные топливные брикеты, содержащие целлюлозу и синтетические полимеры.....**30**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова, Н.В. Кузьмина, К.С. Алёшин. Многопараметрическая токовая защита от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью....**39**

Ю.Д. Кутумов. Разработка способа дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю, основанного на вычислении параметров контура «фаза–земля» в сетях 6–10 кВ...**47**

Д.К. Кугучева, М.С. Харитонов. Исследование несимметрии напряжений в электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации.....**55**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Ю.Б. Казаков, И.С. Егоров. Электротехническая система преобразования энергии колебаний на основе совместной работы линейного генератора и магнитожидкостного демпфера.....**67**

И.С. Полющенков. Разработка программного обеспечения для проверки исправности аппаратных средств электропривода.....**75**

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.Р. Колганов, О.В. Крюков, Л.Р. Романов. Автоматизация мониторинга технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов.....**86**

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы; 2.4.3. Электроэнергетика; 2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».

Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Ivanovo State Power Engineering University

Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001 ISSN 2072-2672 2025 / Issue 1

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovsky, Doctor of Engineering (Ivanovo) (Chief Editor)
I.K. Muravyev, Candidate of Engineering (Ivanovo) (Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.B. Kapranova, Doctor of Physics and Mathematics (Yaroslavl)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.V. Mitrofanov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.Yu. Murzin, Candidate of Engineering (Ivanovo)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Yu. Tarshis, Doctor of Engineering (Yaroslavl)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

The issue is prepared by:

Responsible people for the issue:
E.N. Bushuyev, A.Yu. Murzin, A.I. Tikhonov,
A.R. Kolganov, S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office **S.V. Klyunina**
Technical Editor **N.V. Koroleva**
Editor **S.M. Kotkova**

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

S.A. Bannikova, A.V. Bannikov, M.V. Kozlova, V.N. Sharypov. Improving the quality of urban environment using a seasonal heat transformer in heat supply systems.....**5**

V.V. Papin. The calculation of vapor compression and absorption heat pumps considering the hydraulic resistance of the refrigerant.....**12**

O.B. Kolibaba, M.V. Kozlova, A.B. Garyaev, Y.V. Morozov. Study of hydrodynamic regularities in a layer of wet solid municipal waste during its dehydration.....**23**

V.A. Ryzhikov, O.A. Erokhina, E.L. Akim, P.V. Lukanin. Co-processing of waste into combined fuel briquettes containing cellulose and synthetic polymers.....**30**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

V.A. Shuin, T.Yu. Shadrikova, N.V. Kuzmina, K.S. Alyoshin. Multiparameter current protection against earth faults in 6–10 kV networks with isolated neutral.....**39**

Y.D. Kutumov. Development of a method for distant single phase to earth fault localization based on calculating phase-to-ground loop parameters in 6–10 kV networks.....**47**

D.K. Kugucheva, M.S. Kharitonov. Study of voltage unbalance in low-voltage electrical networks with microgeneration systems.....**55**

ELECTROMECHANICS

Yu.B. Kazakov, I.S. Egorov. Electrical system for converting vibration energy based on the combined operation of a linear generator and a magnetic fluid damper.....**67**

I.S. Polyuschenkov. Software development for checking the serviceability of electric drive hardware parts.....**75**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

A.R. Kolganov, O.V. Kryukov, L.R. Romanov. Automation of monitoring the technical condition of electric-driven gas pumping units.....**86**

The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialties: 2.3.3. Automation and Control of Technological Processes and Production; 2.3.7. Computer Simulation and Computer-Aided Design; 2.4.2. Electrotechnical Complexes and Systems; 2.4.3. Electric Power Industry; 2.4.5. Energy Systems and Complexes; 2.4.6. Theoretical and Applied Heat Engineering; 2.6.13. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies.

Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.

The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.

©Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education
«Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.578

Светлана Андреевна Банникова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон +7 (4932) 269-975, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Александр Васильевич Банников
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон +7 (4932) 269-975, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Мария Владимировна Козлова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон +7 (4932) 269-975, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Владимир Николаевич Шарыпов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер-промтеплоэнергетик, председатель ГАК по кафедре промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон +7 (4932) 269-975.

Повышение качества городской среды за счет использования трансформатора теплоты сезонного действия в системах теплоснабжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Городское хозяйство включает в себя большое количество строительных объектов различного назначения, которые нуждаются в организации надежного и эффективного теплоснабжения, улучшении инфраструктуры и при этом должны формировать безопасную и комфортную городскую среду. Важнейшая государственная задача по рациональному использованию энергетических ресурсов может быть решена, в том числе, путем использования вторичных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии. В связи с этим разработка новых современных технологий по вторичному использованию энергетических ресурсов в городской среде является актуальной задачей. Целью исследования является оценка энергетической и экономической эффективности трансформатора теплоты сезонного действия, предназначенного для поддержания состояния дорожных покрытий различных конструкций в холодный период года без ледяного и снежного покрова, а также для производства горячей воды в системах горячего водоснабжения за счет утилизации теплоты нагрева дорожного покрытия в теплый период года.
Материалы и методы. Исследование проведено с использованием метода балансовых расчетов процессов теплообмена в технологических энергоустановках.
Результаты. Предложено устройство, основанное на процессах трансформации теплоты, позволяющее повысить качество городской среды. Определена эффективность работы предлагаемого устройства. Рассчитаны эксплуатационные затраты на его работу.

© Банникова С.А., Банников А.В., Козлова М.В., Шарыпов В.Н., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 5–11.

Выводы. Предложенное техническое решение обеспечивает снижение затрат на энергообеспечение зданий и экономию энергоресурсов, а также повышает эксплуатационные качества, удобство и безопасность использования придомовых территорий.

Ключевые слова: трансформатор теплоты, вторичные энергоресурсы, утилизация теплоты сточных вод, энергоэффективность, система снеготаяния и антиобледенения

Svetlana Andreevna Bannikova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone +7 (4932) 269-975, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Aleksandr Vasilievich Bannikov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Head of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone +7 (4932) 269-975,
e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Mariya Vladimirovna Kozlova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone +7 (4932) 269-975, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Vladimir Nikolaevich Sharypov
Ivanovo State Power Engineering University, Industrial Thermal Power Engineer, Chairperson of the State Attestation Commission, Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone +7 (4932) 269-975

Improving the quality of urban environment using a seasonal heat transformer in heat supply systems

Abstract

Background. The urban economy includes a large number of construction sites for various purposes that need reliable and efficient heat supply, and improvement of infrastructure. And at the same time, they must create a safe and comfortable urban environment. The most important state task of rational use of energy resources can be solved using secondary energy resources and renewable energy sources. Therefore, the development of new modern technologies for the secondary use of energy resources in the urban environment is an urgent task. The purpose of the study is to evaluate the energy and economic efficiency of the proposed seasonal heat transformer, designed to maintain road surfaces of various structures during the cold season without ice and snow cover, as well as to produce hot water in hot water supply systems by utilizing the heat of heating the road surface during the warm season.
Materials and methods. The method of balance calculations of heat exchange processes in technological power plants is used in the study.
Results. A device based on heat transformation processes has been proposed to improve the quality of the urban environment. The efficiency of the proposed device and the operating costs of its operation are determined.
Conclusions. The proposed technical solution ensures a reduction in energy costs for buildings and energy savings, and also improves the operational parameters, convenience and safety of the adjacent territories.

Key words: heat transformer, secondary energy resources, wastewater heat recovery, energy efficiency, snow melting and anti-icing system

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.005-011

Введение. Значение энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства в современных условиях сложно переоценить. Городское хозяйство включает в себя большое количество строительных объектов различного назначения, которые нуждаются в организации надежного и эффективного теплоснабжения, улучшении инфраструктуры и при этом должны соответствовать безопасной и комфортной городской среде. Важнейшая государственная задача по рациональному использованию энергетических ресурсов может быть решена, в том числе, путем использования вторичных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии[1]. В связи с этим разработка новых современных технологий по вторичному использованию энергетических ресурсов в городской среде является актуальной задачей. В пределах города ко вторичным тепловым энергоресурсам, имеющим наибольший энергетический потенциал, можно отнести тепло сточных вод, к возобновляемым источникам – солнечную радиацию и энергию грунта.

Тепловая энергия, содержащаяся в сточных водах как промышленных предприятий, так и

[1] Федеральный закон № 261 от 23 ноября 2009 г.: [принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.: по состоянию на 11 июня 2021 г.] // Российская газета. – 2009. – 27 ноября (№ 226).

объектов жилищно-коммунального хозяйства, как правило, не используется. При этом канализационные стоки, в частности, жилищно-коммунального хозяйства характеризуются как большим и стабильным расходом, так и температурой, которая даже в холодный период года обычно достигает 15–20 °С [1, 2].

Идея утилизации тепла сточных вод при помощи тепловых насосов не нова. Разработке подобных способов утилизации теплоты сточных вод посвящен ряд работ [3, 4, 5].

Применение современных технологий, способных снизить затраты на энергообеспечение зданий и обеспечить экономию ресурсов, может также иметь эффект в виде улучшения эксплуатационных качеств территорий общего пользования и повышения их безопасности и удобства. Целью исследования является оценка энергетической и экономической эффективности разработанного трансформатора теплоты сезонного действия, имеющего вышеуказанные возможности [5].

Трансформатор теплоты сезонного действия предназначен для поддержания состояния дорожных покрытий различных конструкций в холодный период года без ледяного и снежного покрова, а также для получения горячей воды в системах горячего водоснабжения за счет утилизации теплоты нагрева дорожного покрытия в теплый период года.

Трансформатор теплоты сезонного действия (рис. 1) состоит из парокомпрессионного реверсивного теплового насоса *1* и трех контуров циркуляции теплоносителя. Первый контур циркуляции теплоносителя (контур системы снеготаяния и антиобледенения) содержит горизонтальный грунтовый коллектор *2*, выполненный из полимерных труб, соединенных последовательно или параллельно, заполненных теплоносителем, уложенных в грунте под дорожным покрытием *3*, соединенных через циркуляционный насос первого контура *4* с испарителем-конденсатором *5* реверсивного парокомпрессионного теплового насоса *1*. Второй контур циркуляции теплоносителя (контур системы утилизации тепла сточных вод) содержит коллектор *6*, выполненный из полимерных труб, заполненных теплоносителем, уложенных вокруг трубы отвода канализационных стоков *7*, соединенный через циркуляционный насос второго контура *8* с конденсатором-испарителем *9* реверсивного парокомпрессионного теплового насоса *1*. Третий контур циркуляции теплоносителя (контур системы горячего водоснабжения) содержит коллектор *10*, выполненный из полимерных труб, размещенных в баке-аккумуляторе *11* (входящего в систему горячего водоснабжения), соединенный через циркуляционный насос третьего контура *12* с конденсатором-испарителем *9* реверсивного парокомпрессионного теплового насоса *1*.

Необходимо отметить, что второй контур циркуляции теплоносителя, предназначенный для отвода теплоты канализационных стоков, может иметь различное исполнение. Он может состоять, например, из коллектора, выполненного из полимерных труб, заполненных теплоносителем, уложенных вокруг трубы отвода канализационных стоков, как показано на рис. 1.

Другим вариантом является контур, имеющий в своем составе промежуточный теплообменник-утилизатор сточных вод, в котором происходит нагрев циркулирующего через испаритель теплового насоса теплоносителя за счет теплоты очищенных канализационных стоков, также подаваемых в этот теплообменный аппарат [3].

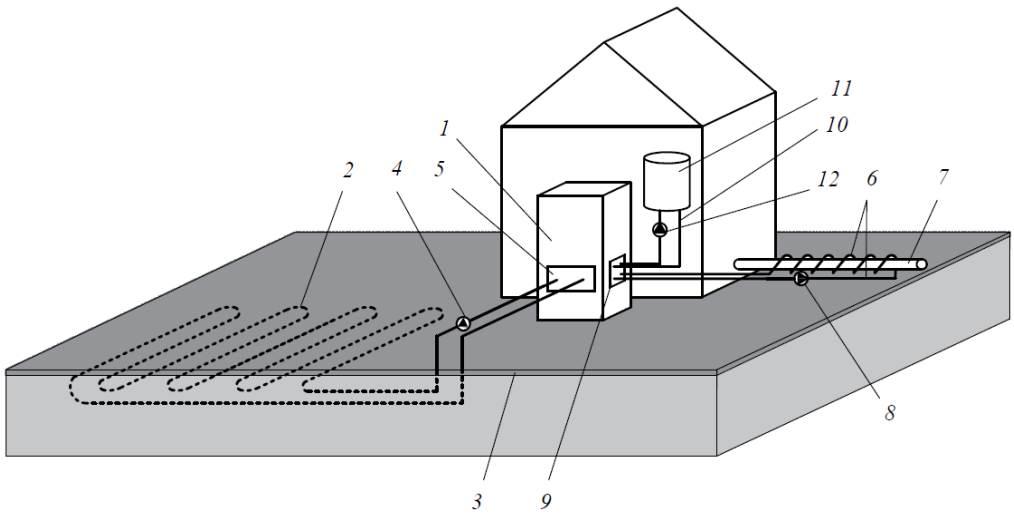


Рис. 1. Устройство трансформатора теплоты сезонного действия: 1 – реверсивный парокомпрессионный тепловой насос; 2 – горизонтальный грунтовый коллектор; 3 – дорожное покрытие; 4 – циркуляционный насос первого контура; 5 – испаритель-конденсатор реверсивного парокомпрессионного теплового насоса; 6 – второй контур циркуляции теплоносителя; 7 – труба отвода канализационных стоков; 8 – циркуляционный насос второго контура; 9 – конденсатор-испаритель реверсивного парокомпрессионного теплового насоса; 10 – третий контур циркуляции теплоносителя; 11 – бак-аккумулятор; 12 – циркуляционный насос третьего контура

Принцип и режимы работы трансформатора теплоты сезонного действия. Для реализации режимов работы в теплый и холодный периоды года используется реверсивный парокомпрессионный тепловой насос *1.* Принципиальные схемы режимов работы трансформатора теплоты сезонного действия, работающего в теплый и холодный период года, показаны на рис. 2.

Теплообменные аппараты реверсивного теплового насоса изменяют свою функцию в зависимости от режима работы и, соответственно, на схемах рис. 2 имеют различное наименование.

В холодный период года (во время отопительного сезона) используется только первый и второй контуры циркуляции теплоносителя (рис. 2,а, толстая линия). Третий контур перекрыт. В холодный период года теплоноситель, циркулирующий во втором контуре, воспринимает тепловую энергию канализационных стоков *15* и при помощи циркуляционного насоса второго контура *13* поступает в испаритель *1* реверсивного парокомпрессионного теплового насоса. При этом полученная в конденсаторе *2* реверсивного парокомпрессионного теплового насоса тепловая энергия передается теплоносителю первого контура.

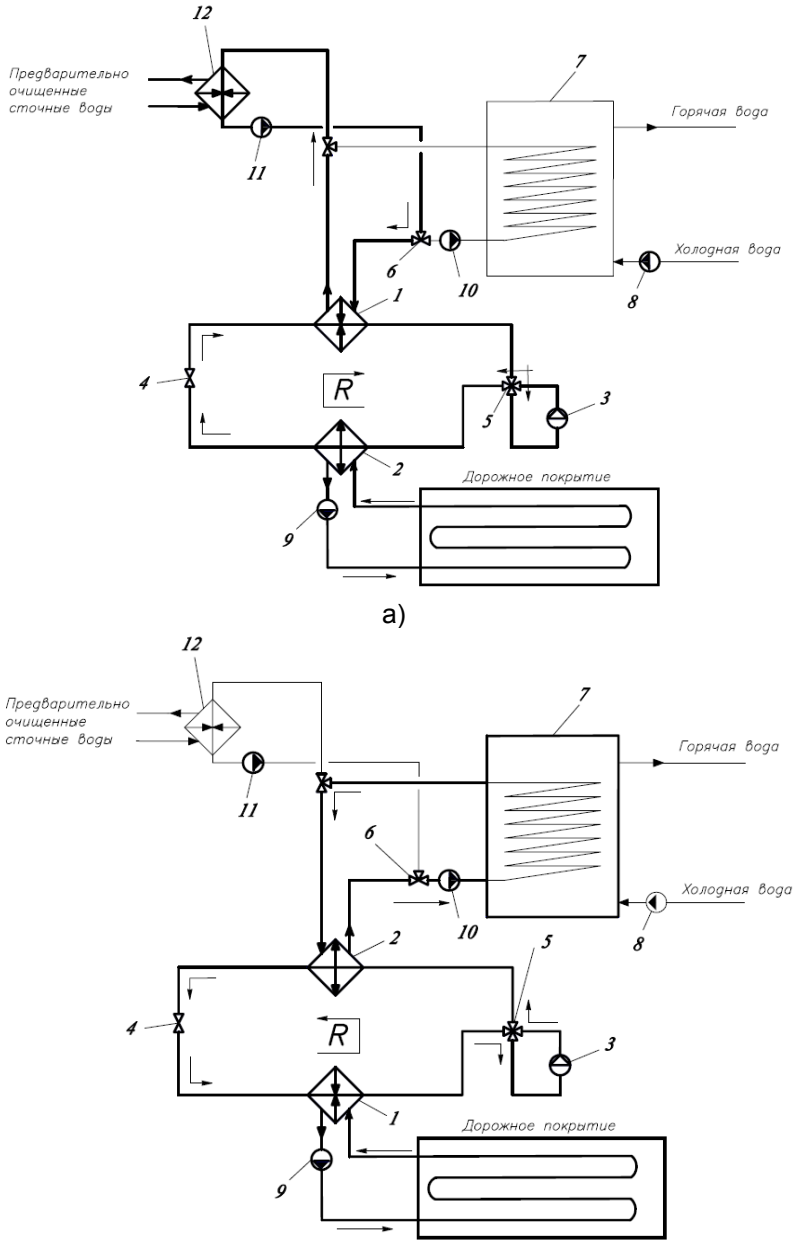


Рис. 2. Схемы режимов работы трансформатора теплоты сезонного действия в холодный (а) и теплый (б) периоды года: 1 – испаритель реверсивного теплового насоса; 2 – конденсатор реверсивного теплового насоса; 3 – компрессор; 4 – дроссельное устройство; 5 – четырехходовой клапан; 6 – трехходовой клапан; 7 – бак-аккумулятор; 8 – насос холодной водопроводной воды; 9 – циркуляционный насос первого контура циркуляции (контура, связанного с грунтовым коллектором); 10 – циркуляционный насос третьего контура циркуляции (контура, связанного с баком-аккумулятором); 11 – циркуляционный насос второго контура циркуляции (контура, связанного с системой отвода теплоты канализационных стоков); 12 – теплообменник-утилизатор сточных вод

Теплоноситель в первом контуре, циркулирующий при помощи циркуляционного насоса первого контура *9*, нагревается в конденсаторе *2* реверсивного парокомпрессионного теплового насоса и направляется в горизонтальный коллектор, расположенный под дорожным покрытием обогреваемой площадки придомовой территории. Снег или лед, находящийся на дорожном покрытии, воспринимает тепловую энергию от горизонтального коллектора и тает. Таким образом, обеспечивается быстрое очищение асфальтного покрытия от снега и льда и продление срока его службы за счет поддержания стабильных температурных режимов эксплуатации.

В летнее время используется только первый и третий контуры (рис. 2,б, толстая линия). Второй контур перекрыт. В теплый период года тепловой поток солнечной радиации нагревает дорожное покрытие и прилегающий к нему грунт и воспринимается теплоносителем, циркулирующим при помощи циркуляционного насоса первого контура *9* в горизонтальном коллекторе, расположенном под дорожным покрытием придомовой территории. Нагретый теплоноситель направляется в испаритель *1* реверсивного парокомпрессионного теплового насоса. При этом полученная в конденсаторе реверсивного парокомпрессионного теплового насоса тепловая энергия передается теплоносителю третьего контура. Теплоноситель в третьем контуре нагревает воду, пригодную для нужд горячего водоснабжения, в баке-аккумуляторе *7*. Произведенная в результате горячая вода может быть использована для нужд горячего водоснабжения. Кроме того, охлаждение дорожного покрытия в теплый период года предохраняет его от перегрева, создает более стабильные условия эксплуатации, что ведет к продлению срока его службы.

Эффективность применения трансформатора теплоты сезонного действия. Для оценки целесообразности применения рассматриваемого устройства был произведен анализ энергетической и экономической эффективности его работы в приложении к многоэтажному жилому дому, расположенному в г. Иваново и имеющему придомовую территорию с парковкой, предполагаемой к оснащению системой снеготаяния и антиобледенения. Суммарный расход сточных вод в рассматриваемом шестнадцатиэтажном жилом доме соответствовал нагрузке на его систему водоотведения. Необходимо отметить, что, кроме энергетической и экономической эффективности работы установки, возможность применения рассматриваемого устройства также определяется:

– наличием стабильного расхода сточных вод, обладающего достаточным температурным потенциалом;

– близостью потребителя теплоты для исключения потерь при транспортировке теплоносителя;

– доступностью на рынке включенного в схему оборудования;

– простотой обслуживания установки.

Монтаж предлагаемого устройства возможно производить как на этапе строительства жилого дома, так и в эксплуатируемом здании, однако последнее потребует реконструкции дорожного покрытия, что приведет к увеличению капитальных затрат.

В качестве исходных данных для расчета установки, работающей в холодный период года, были приняты следующие параметры:

– массовый расход сточных вод 6,4 кг/с (в соответствии с нормативным расходом холодной и горячей воды в жилых зданиях[2]);

– температура сточных вод до и после теплообменника-утилизатора 20 °С и 13 °С соответственно;

– температура воды промежуточного контура до и после теплообменника-утилизатора 9 °С и 12 °С соответственно;

– температура теплоносителя на входе в систему снеготаяния и антиобледенения 35 °С.

В качестве ведущей нагрузки при расчете параметров работы теплового насоса, входящего в состав установки при ее работе в холодный период года, принята тепловая нагрузка на систему утилизации тепла канализационных стоков. При этом количество выделившейся в конденсаторе теплового насоса тепловой энергии определило площадь придомовой территории, оборудованной системой снеготаяния и антиобледенения.

В качестве исходных данных для расчета установки, работающей в теплый период года, были приняты следующие параметры:

– температура горячей воды 60 °С[3];

– массовый расход теплоносителя (этиленгликоля) в ответвлениях (контурах) системы снеготаяния и антиобледенения 1,7 кг/с при скорости движения этиленгликоля 0,5 м/с и внутреннем диаметре подземных трубопроводов 64 мм;

– температура теплоносителя на входе в систему снеготаяния и антиобледенения 5 °С;

– суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность[4], Вт/м^2.

В качестве основного элемента первого контура (контура системы снеготаяния и антиобледенения) была выбрана система снеготаяния и антиобледенения фирмы ABC-ELEMENTS[5],

[2] СП 30.13330.2020 Внутренний водопровод и канализация зданий. – М.: ФАУ ФЦС, 2020. – 96 с.
[3] СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 78 с.
[4] СП 131.13330.2020 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М.: ФАУ ФЦС, 2020. – 150 с.
[5] ABC-ELEMENTS: официальный сайт производителя систем напольного отопления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://abc-elements.ru

предназначенная для очистки придомовых территорий, тротуаров, парковочных мест и т.п. Осуществление процесса снеготаяния заключается в подводе тепловой энергии по подземным трубопроводам к заснеженной поверхности в количестве, необходимом для нагрева и плавления снега. Очевидно, что на выбор необходимой мощности системы влияет интенсивность снегопада, скорость ветра, температура наружного воздуха и конструкция дорожного покрытия. Количество осадков, выпадающих в период с ноября по март в г. Иваново в соответствии с актуальной нормативной документацией, составляет 206 мм[3]. При этом расчетная нагрузка на систему снеготаяния, исходя из наихудших условий, соответствующих условиям сильного снегопада, принята равной 5 мм высоты слоя воды, образовавшегося на горизонтальной поверхности от растаявшего снега в час. В пересчете на свежевыпавший снег расчетная нагрузка составляет 10 см снежного покрова в час. За расчетную температуру наружного воздуха принята температура минус 20 °С, что обусловлено снижением вероятности снегопада при данной температуре и ниже[6]. Анализируя влияние температуры окружающей среды на требуемую мощность системы снеготаяния и антиобледенения, можно отметить, что температура наружного воздуха, а следовательно, температура снега, влияет незначительно, нагрев снега до температуры плавления составляет не более 10 % от общей необходимой мощности системы. Требуемая мощность системы снеготаяния и антиобледенения на один квадратный метр варьируется от 460 Вт при температуре наружного воздуха 0 °С до 520 Вт при температуре наружного воздуха минус 20 °С. Распределение нагретого теплоносителя по системе снеготаяния и антиобледенения осуществляется через прямой и обратный коллекторы по присоединенным к ним контурам из трубопроводов, проложенных под дорожным покрытием. В этой системе целесообразно использовать незамерзающий теплоноситель, например раствор этиленгликоля с концентрацией, соответствующей расчетной температуре наружного воздуха и равной в рассматриваемом случае 47 %. Температура теплоносителя, напрямую зависящая от термического сопротивления покрытия, отделяющего подземную систему трубопроводов от снега и наледи, и геометрических параметров самих трубопроводов, принята равной 35 °С. В теплый период года данный контур предназначен для отвода воспринятой тепловой энергии, поступающей на поверхность придомовой территории за счет солнечной радиации.

Второй контур циркуляции теплоносителя (контур системы утилизации тепла) состоит из контуров, связанных теплообменником-утилизатором (рис. 2).

Третий контур циркуляции теплоносителя (контур системы горячего водоснабжения) содержит коллектор, выполненный из полимерных труб, размещенных в баке-аккумуляторе.

В качестве рабочего агента теплового насоса, связывающего все три контура циркуляции теплоносителя, выбран фреон R134a как один из наиболее распространённых рабочих агентов, применяемых в современных теплонасосных установках.

Результаты исследования. Расчеты предложенной установки, работающей в холодный период года, позволили определить площадь придомовой территории с парковкой, которую возможно обслуживать рассматриваемой установкой. При заданной расчетной температуре наружного воздуха и расчетной нагрузке на систему снеготаяния и антиобледенения площадь тротуаров и парковочных мест для автомобилей составила 450 м[2]. Необходимо отметить, что при заданных параметрах работы установки с повышением температуры наружного воздуха интенсивность процесса снеготаяния будет возрастать и при 0 °С увеличится на 11 %. Данное обстоятельство говорит также о том, что с повышением температуры наружного воздуха рассматриваемая система снеготаяния будет обладать большей производительностью и справляться с большей снеговой нагрузкой. В результате расчета, произведенного по методике, отраженной в [7], был определен коэффициент трансформации парокомпрессионного теплового насоса в действительном цикле его работы в холодный период года, равный 8, что говорит о высокой эффективности работы теплового насоса при принятых условиях.

При расчете установки, работающей в теплый период года с учетом различной интенсивности солнечной радиации и затененности, оборудованной устройством придомовой территории, были определены: температура нагретого теплоносителя на входе в испаритель теплового насоса, теплопроизводительность теплового насоса и эффективность его работы в течение теплого периода года (см. таблицу).

Эксплуатационные затраты на работу установки складываются из затрат электроэнергии на работу компрессора теплового насоса и циркуляционных насосов во всех контурах циркуляции теплоносителя. Полученные значения коэффициента трансформации теплового насоса позволили произвести оценку энергетических затрат на его работу в теплый и холодный периоды года.

[6] Anne Marie Helmenstine Can It Be Too Cold to Snow? / ThoughtCo, 05.01.2020. URL: https://www.thoughtco.com/can-it-be-too-cold-to-snow-4113144

Результат расчета установки для теплого периода года

Расчетный месяц	Параметр			
	$Q_{сол}$, Вт/м^2	$Q_о$, кВт	$t'_и$, ^{0}С	$K_{тр}$
Май	225,28	78,65	12,2	4,9
Июнь	258	90,1	13,25	5,15
Июль	226,67	79,1	12,24	4,78
Август	185,28	64,7	10,9	4,55
Сентябрь	111,94	39,1	8,6	4,35

$Q_{сол}$ – средний поток суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, Вт/м^2; $Q_о$ – нагрузка на испаритель теплового насоса устройства, работающего в теплый период года, кВт; $t'_и$ – температура нагретого теплоносителя на выходе из системы снеготаяния и антиобледенения при работе устройства в теплый период года; $K_{тр}$ – коэффициент трансформации теплового насоса

В итоге для принятых исходных данных с учетом необходимой мощности насосного оборудования был определен годовой расход электрической энергии на работу системы, который составил 45000 кВт·ч, в том числе 4000 кВт·ч при работе в холодный период и 41000 кВт·ч при работе в теплый период года. Таким образом, стоимость очистки придомовой территории площадью 450 м^2 с учетом актуальных тарифов на электрическую энергию составило 25 тыс. руб. Количество горячей воды, полученной в результате работы установки в теплый период года, составило 2400 м^3.

Выводы. Таким образом, предлагаемый трансформатор теплоты сезонного действия при принятых исходных данных позволит снизить затраты на энергообеспечение зданий, обеспечить экономию энергоресурсов, улучшить эксплуатационные качества придомовых территорий общего пользования, повысить их безопасность и удобство. В отличие от существующих на данный момент устройств, предназначенных для очистки дорожных покрытий от снега и льда, предлагаемое устройство позволит обеспечить использование двух видов вторичных энергоресурсов в рамках одного, предлагаемого нами устройства.

Список литературы

1. **Ченский И.А.** Использование теплового потенциала сточных вод // Наука и образование в глобальных процессах. – 2017. – № 1(4). – С. 95–97. – EDN ZQKZUD.

2. **Перспективы** применения тепловых насосов при утилизации теплоты городских стоков / В.В. Слесаренко, В.В. Князев, В.В. Вагнер, И.В. Слесаренко // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 3(77). – С. 28–33.

3. **Пат.** № 2338969 C1 Российская Федерация, МПК F24H 4/00. Способ утилизации теплоты неочищенных сточных вод : № 2007105868/06 : заявл. 19.02.2007 : опубл. 20.11.2008 / А.Г. Лавриненко, К.И. Сопленков, О.В. Спорыхин, А.Н. Стороженков, В.М. Чаховский, А.М. Шур, А.Л. Воронин ; заявитель Закрытое акционерное общество «НПО Энергосберегающие технологии». – 6 с.

4. **Пат.** № 2338968 C1 Российская Федерация, МПК F24H 4/00. Способ утилизации теплоты неочищенных сточных вод и получения горячего теплоносителя : № 2007105869/06 : заявл. 19.02.2007 : опубл. 20.11.2008 / А.Г. Лавриненко, К.И. Сопленков, О.В. Спорыхин, А.Н. Стороженков, В.М. Чаховский, А.М. Шур, А.Л. Воронин ; заявитель Закрытое акционерное общество «НПО Энергосберегающие технологии». – 7 с.

5. **Пат.** № 2480683 C2 Российская Федерация, МПК F25B 30/06, F24D 17/02. Способ утилизации низкопотенциального тепла сточных вод : № 2011115754/06 : заявл. 20.04.2011 : опубл. 27.04.2013 / Д.Г. Закиров, И.И. Боринских, М.А. Мухамедшин, Г.Д. Закиров, А.Н. Голубков ; заявитель Учреждение Российской академии наук Горный институт Уральского отделения РАН (ГИ УрО РАН). – 6 с.

6. **Пат.** № 151726 U1 Российская Федерация, МПК E01H 5/10. Трансформатор теплоты сезонного действия [Электронный ресурс] : № 2014141651/13 : заявл. 15.10.14 : опубл. 15.04.10 / С.А. Банникова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». – 6 с. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU151726U1_20150410

7. **Соколов Е.Я., Бродянский В.М.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. – М.: Энергия, 1968.

References

1. Chenskiy, I.A. Ispol'zovanie teplovogo potentsiala stochnykh vod [Using thermal potential of wastewater]. *Nauka i obrazovanie v global'nykh protsessakh*, 2017, no. 1(4), pp. 95–97. EDN ZQKZUD.

2. Slesarenko, V.V., Knyazev, V.V., Vagner, V.V., Slesarenko, I.V. Perspektivy primeneniya teplovykh nasosov pri utilizatsii teploty gorodskikh stokov [Future of the use of heat pumps for heat recovery of urban wastewater]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*, 2012, no. 3(77), pp. 28–33.

3. Lavrinenko, A.G., Soplenkov, K.I., Sporykhin, O.V., Storozhenkov, A.N., Chakhovskiy, V.M., Shur, A.M., Voronin, A.L. *Sposob utilizatsii teploty neochishchennykh stochnykh vod* [Method for heat recovery of untreated wastewater]. Patent RF, no. 2338969, 2008.

4. Lavrinenko, A.G., Soplenkov, K.I., Sporykhin, O.V., Storozhenkov, A.N., Chakhovskiy, V.M., Shur, A.M., Voronin, A.L. *Sposob utilizatsii teploty neochishchennykh stochnykh vod i polucheniya goryachego teplonositelya* [Method of heat recovery of untreated wastewater and obtaining hot coolant]. Patent RF, no. 2338968, 2008.

5. Zakirov, D.G., Borinskikh, I.I., Mukhamedshin, M.A., Zakirov, G.D., Golubkov, A.N. *Sposob utilizatsii nizkopotentsial'nogo tepla stochnykh vod* [Method of utilization of low-potential heat of wastewater]. Patent RF, no. 2480683, 2013.

6. Bannikova, S.A. *Transformator teploty sezonnogo deystviya* [Seasonal heat transformer]. Patent RF, no. 151726, 2010. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU151726U1_20150410

7. Sokolov, E.Ya., Brodyanskiy, V.M. *Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsessov okhlazhdeniya* [Energy foundation of heat transformation and cooling processes]. Moscow: Energiya, 1968.

УДК 621.577.62

Владимир Владимирович Папин
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, e-mail: vladimir_papin@bk.ru

Расчет парокомпрессионного и абсорбционного тепловых насосов с учетом гидравлического сопротивления хладагента

Авторское резюме

Состояние вопроса. Известные методы оценки эффективности трансформаторов теплоты не учитывают потери давления в контуре трансформатора. Эти потери представляются несущественными. Однако все чаще возникает вопрос о степени их влияния на общую эффективность цикла и о вероятном их учете. Цель исследования – модернизировать существующие методики расчета трансформаторов теплоты для учета влияния потерь давления хладагента в контуре.
Материалы и методы. За основу методов оценки эффективности парокомпрессионного и абсорбционного трансформаторов взяты методы В. Мааке и П.А. Трубаева и методы Т.В. Морозюк и Л.С. Тимофеевского соответственно. Для уточнений КПД компрессора использована методика А.Н. Носкова. Гидравлические сопротивления теплообменников и трубопроводов в контурах трансформаторов теплоты определены с помощью существующих методик отечественных авторов. Полученные значения сопротивлений отображены на *P-h*-диаграмме цикла.
Результаты. Разработана модернизированная методика оценки эффективности парокомпрессионных и абсорбционных трансформаторов теплоты, учитывающая потери давления в контуре. Произведены расчеты показателей экономичности трансформаторов теплоты по полученной методике. Установлено соответствие результатов расчетов по полученной методике экспериментальным данным, полученным В.О. Мамченко и А.А. Малышевым.
Выводы. Потери давления в контуре парокомпрессионного трансформатора теплоты снижают коэффициент трансформации для рассмотренного примера на 5,4 %, а в контуре абсорбционного трансформатора теплоты – на 0 %. Соответственно, при оценке эффективности парокомпрессионных трансформаторов теплоты потери давления играют существенную роль.

Ключевые слова: парокомпрессионный трансформатор теплоты, абсорбционный трансформатор теплоты, фреон, гидравлические потери, тепловой насос, принципиальная схема абсорбционного теплового насоса, коэффициент трансформации

Vladimir Vladimirovich Papin
Platov South Russian State Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, acting Head of Thermal Power Plants and Heat Engineering Department, Russia, Novocherkassk, e-mail: vladimir_papin@bk.ru

The calculation of vapor compression and absorption heat pumps considering the hydraulic resistance of the refrigerant

Abstract

Background. The known methods to assess the efficiency of heat transformers do not consider pressure losses in the transformer circuit. These losses seem to be insignificant. However, the issue is how insignificant they are and whether they should still be considered. The purpose of the study is to modernize available methods to calculate heat transformers to take into account the impact of refrigerant pressure losses in the heat transformer circuit.
Materials and methods. The methods of assessing the efficiency of a vapor compression and absorption transformers are based on the methods of V. Maake and P.A. Trubaev, and the methods of T.V. Morozyuk and L.S. Timofeevsky, respectively. The method of A.N. Noskov has been used to clarify the efficiency of the compressor. The hydraulic resistances of heat exchangers and pipelines in the circuits of heat transformers have been determined using available methods of domestic authors. The obtained resistance values have been displayed on the *P-h* diagram of the cycle.
Results. A modernized method for assessing the efficiency of vapor compression and absorption heat transformers has been obtained, considering pressure losses in the circuit. Calculations of the efficiency indicators of heat transformers are carried out using the obtained methodology. The results of the calculations correspond to the experimental data obtained earlier by V.O. Mamchenko and A.A. Malyshev.
Conclusions. Pressure losses in the circuit of the vapor compression heat transformer reduce the transformation ratio for example under study by 5,4 %, and in the circuit of the absorption heat transformer by 0,4 %. Accordingly, when assessing the efficiency of vapor compression heat transformers, pressure losses play a significant role.

© Папин В.В., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 12–22.

Key words: vapor compression heat transformer, absorption heat transformer, freon, hydraulic losses, heat pump, schematic diagram of an absorption heat pump, transformation ratio

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.012-022

Введение. Известные методики расчета циклов парокомпрессионных и абсорбционных трансформаторов теплоты [1, 2], не учитывающие потери давления в контуре трансформатора, требуют доработки и модернизации с использованием методик расчета индикаторного КПД механического компрессора в соответствии с [3]. Основное отличие новой методики от существующих – учет потерь давления в контуре хладагента, в связи с чем изменяется коэффициент трансформации.

В качестве примеров взяты расчеты аммиачного парокомпрессионного теплового насоса (ПКТН) и водоаммиачного абсорбционного теплового насоса (АТН).

Методы исследования. Для разработки методов оценки эффективности трансформаторов теплоты за основу были взяты следующие методики: для парокомпрессионного трансформатора – [1, 2], для абсорбционного – [10, 11]; для уточнений КПД компрессора использовалась методика [3]. Гидравлические сопротивления теплообменников и трубопроводов в контурах трансформаторов теплоты определялись с помощью методик [6–9]. Полученные значения сопротивлений были отображены на *P-h*-диаграмме цикла, внесены корректировки в баланс трансформатора теплоты.

Результаты исследования. ***Расчет парокомпрессионного трансформатора теплоты.*** Термодинамический расчет ПКТН с фреоном R717 производится по общеизвестной методике [1, 2].

Исходные данные для расчета парокомпрессионного теплового насоса с хладагентом R717:

– температура низкопотенциального теплоносителя (рассол, вода) на входе $t_н$ = 10 °С;

– температура высокопотенциального теплоносителя (горячей воды) на выходе $t_в$ = 50 °С;

– перепад температуры на выходе из теплообменника испарителя $\Delta t_к$ = 5 °С;

– перепад температуры на выходе из теплообменника конденсатора $\Delta t_{исп}$ = 5 °С.

Температура испарения фреона

$$t_и = t_н - \Delta t_и = 10 - 5 = 5\,°C.$$

По таблицам термодинамических свойств хладагента R717 в состоянии насыщения и по *P-h*-диаграмме (рис. 1) при температуре испарения $t_и$ = 5 °С определяются параметры в точке 1 – энтальпия на правой пограничной кривой *h"* и давление *p*:

$$h_1 = 1465{,}791 \text{ кДж/кг};$$

$$p_1 = 0{,}516 \text{ МПа}.$$

Точка 1 отмечается на *P-h*-диаграмме.

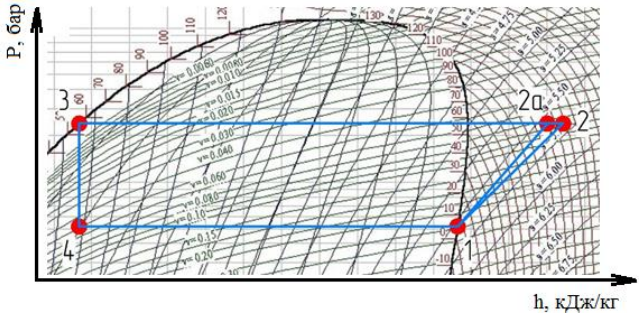


Рис. 1. Цикл парокомпрессионного теплового насоса с фреоном *R*134*a*: 1–2a – процесс адиабатного сжатия в компрессоре; 1–2 – процесс реального сжатия в компрессоре; 2–3 – конденсация; 3–4 – дросселирование; 4–1 – испарение

Температура конденсации фреона

$$t_к = t_в + \Delta t_к = 50 + 5 = 55\,°C.$$

В точке 3 энтальпия *h*' и давление *p* определяются по температуре конденсации $t_к$ по таблицам термодинамических свойств или *P-h*-диаграмме:

$$h_3 = 459{,}45 \text{ кДж/кг};$$

$$p_3 = 2{,}31 \text{ МПа}.$$

Далее на *P-h*-диаграмме отмечается точка 3.

На *P-h*-диаграмме на пересечении линии постоянной энтропии S_1, проходящей через точку 1, и линии изобары $p_к$, проходящей через точку 3, определяется точка 2a, затем по диаграмме определяется энтальпия в этой точке:

$$h_{2a} = 1720{,}197 \text{ кДж/кг}.$$

В соответствии с [1, 2], адиабатный КПД компрессора составляет

$$\eta_a = 0{,}98\,\frac{273 + t_{норм}}{273 + t_к} = 0{,}98\,\frac{273 + 20}{273 + 55} = 0{,}875.$$

Однако, в соответствии с [3], в данном случае лучше использовать индикаторный КПД, который учитывает технические особенности компрессора. Рассчитаем его.

Индикаторный КПД поршневого компрессора, согласно [3], определяется как

$$\eta_i = \nu\lambda_c\lambda_{t0}\lambda_{пл},$$

где ν – коэффициент полноты индикаторной диаграммы; λ_c – объемный коэффициент, учитывающий влияние вредного пространства; λ_{t0} – коэффициент подогрева, учитывающий снижение объемной производительности компрессора из-за теплообмена между рабочим телом и стенками цилиндра, а также из-за

сопротивления всасывающего клапана; $\lambda_{пл}$ – коэффициент плотности, учитывающий снижение производительности компрессора из-за перетекания рабочего тела из пространства с более высоким давление в пространство с меньшим давлением.

В соответствии с [3], значение коэффициента плотности находится в диапазоне 0,95–0,98. Принимаем $\lambda_{пл} = 0,95$.

Объемный коэффициент определится как

$$\lambda_c = 1 - a\left[\left(p2 / p1\right)^{1/m} - 1\right] =$$

$$= 1 - 0,025\left[\left(2,31/0,516\right)^{1/1,1} - 1\right] = 0,89,$$

где $a = V_c / V_h$ – коэффициент вредного пространства; m = 1,1 (в соответствии с [3]); a = 0,025 (в соответствии с [3], для вертикальных компрессоров средней мощности).

Коэффициент подогрева, согласно [3], определяется как

$$\lambda_{t0} = T1 / T_{о.с}.$$

Данная формула справедлива при рассмотрении холодильной техники, когда конденсация происходит при температуре окружающей среды. Для трансформаторов теплоты, где температура конденсации выше, следует использовать формулу из [4]:

$$\lambda_{t0} = \frac{T1}{T_к} = \frac{278}{328} = 0,85,$$

где $T_к$ – температура конденсации.

Коэффициент полноты индикаторной диаграммы определяется в ходе испытаний конкретного компрессора. Предварительно эту диаграмму можно изобразить, используя данные теплового расчета трансформатора теплоты (давления, удельные объемы), а также данные о наиболее характерных значениях депрессии для рассматриваемого вида компрессора:

$p_1 = 0,516$ МПа; $v_1 = 0,24$ м^3/кг;

$p_2 = 2,31$ МПа; $v_2 = 0,074$ м^3/кг.

Депрессию на всасывании и нагнетании принимаем как 3–5 % от разности давлений p_1 и p_2. Принимаем среднее значение – 4 % [5].

Величина депрессии на всасывании и нагнетании компрессора рассчитывается как

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = 0,04 \cdot \Delta P = 0,04 \cdot \left(2,31 - 0,516\right) =$$

$$= 0,07 \text{ МПа}.$$

Цикл работы одноступенчатого поршневого компрессора показан на рис. 1 (контур 1-2-3-4).

В идеальном цикле процесс сжатия осуществляется адиабатно и вредное пространство V_c отсутствует. В реальном же цикле сжатие будет идти политропно и будет иметь место расширение газа из вредного пространства в процессе 3-4. В первом приближении при оценке коэффициента индикаторной диаграммы можно оставить процессы сжатия 1-2 и расширения 3-4 адиабатными и в дальнейшем после определения индикаторного КПД компрессора с учетом всех факторов можно индикаторную диаграмму уточнить, проведя необходимое количество итераций.

В первой итерации индикаторная диаграмма компрессора строится с опорой на идеальный процесс сжатия (см. рис. 1, точка 2а). Далее производится расчет (изложенный ниже) и диаграмма уточняется с учетом реального процесса сжатия (рис. 1, точка 2). Ее финальный вид представлен на рис. 2.

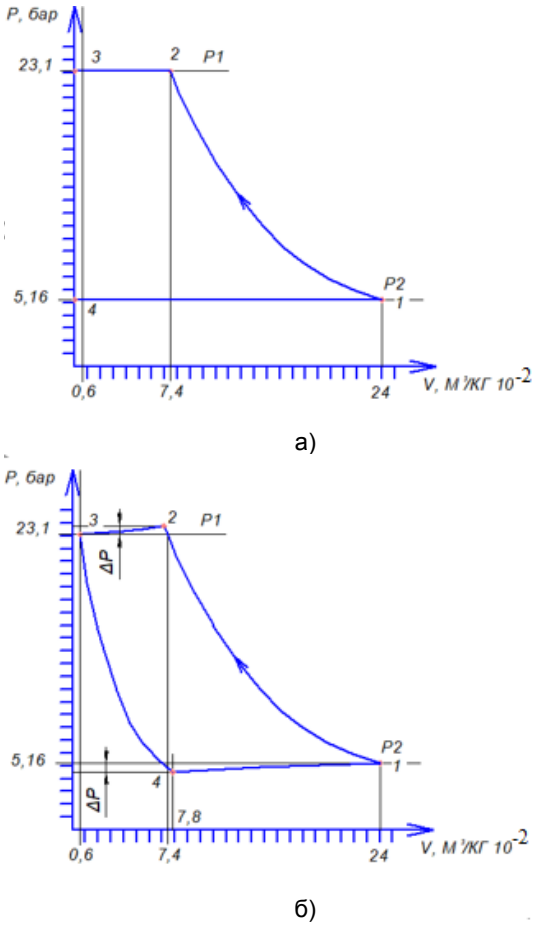


Рис. 2. Индикаторный КПД поршневого компрессора

Вредный объем цилиндра компрессора определяется по выражению

$$V_c = V_h \cdot a = 0,24 \cdot 0,025 = 0,006 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для построения точки 4 необходимо на P-h-диаграмме найти точку с объемом вредного пространства 0,6 м^3/кг при давлении p_2 = 2,31 МПа и по адиабате спуститься до давления ниже p_1 на величину депрессии 0,516 – 0,07 = 0,446 МПа. Удельный объем составит v = 0,078 м^3/кг.

Используя машинный способ определения площади с помощью программы «Компас», определяем отношение площадей реального и

идеального циклов. Это отношение и есть коэффициент заполнения индикаторной диаграммы:

$$\nu = \frac{l_и}{l_д} = 1{,}22.$$

Как описано в [3], данное значение больше 1, поскольку в действительном компрессоре существует возврат работы при расширении сжатого во вредном пространстве рабочего тела с давлением p_2 до давления p_1.

Индикаторный КПД компрессора в рассматриваемом случае определяется как

$$\eta_i = \nu\lambda_c\lambda_{t0}\lambda_{пл} = 1{,}22 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}95 = 0{,}87.$$

Зная индикаторный КПД компрессора в первом приближении, строим точку 2а на диаграмме ПКТН.

Проверяем утверждения из [3].

В первом приближении $\nu\lambda_c = 1$, $\eta_i \approx \lambda_{t0}$, $\eta_i = 0{,}8 - 0{,}95$ для одноступенчатых компрессоров:

$$\nu\lambda_c = 1{,}22 \cdot 0{,}89 = 1{,}08;$$

$$\eta_i \approx \lambda_{t0} = 0{,}85.$$

Полученные результаты расчета индикаторного КПД и его компонентов полностью соответствую информации, представленной в [3].

Энтальпия фреона после сжатия с учетом потерь составляет

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2a} - h_1}{\eta_i} = 1465{,}791 + \\ + \frac{1720{,}197 - 1465{,}791}{0{,}87} = 1758{,}211 \text{ кДж/кг}.$$

По значению энтальпии h_2 = 1758,211 кДж/кг и давлению $p_к$ = 2,31 МПа на диаграмме отмечается точка 2. Температура в этой точке составляет

$$t_2 = 135 \text{ °C}.$$

По значению энтальпии $h_3 = h_4$ = 459,45 кДж/кг и давлению $p_и$ = 0,516 МПа на диаграмме отмечается точка 4.

Удельные тепловые нагрузки в узлах теплового насоса определяются как разность энтальпий в критических точках:

$$q_и = h_1 - h_4 = 1465{,}791 - 459{,}45 = 1006{,}341 \text{ кДж/кг};$$

$$q_к = h_2 - h_3 = 1758{,}211 - 459{,}45 = 1298{,}761 \text{ кДж/кг};$$

$$l_{сж} = h_2 - h_1 = 1758{,}211 - 1465{,}791 = 292{,}42 \text{ кДж/кг}.$$

Правильность расчета определяется проверкой теплового баланса:

$$q_к = q_и + l_{сж};$$

$$q_к = 1006{,}341 + 292{,}42 = 1298{,}761 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловая нагрузка теплового насоса равна тепловой нагрузке конденсатора:

$$q_{тн} = q_к = 1298{,}761 \text{ кДж/кг}.$$

Коэффициент преобразования теплоты составляет

$$\text{COP} = \frac{q_к}{l_{сж}} = \frac{1298{,}761}{292{,}42} = 4{,}441.$$

При расчете по методике [1, 2] $\text{COP} = 4{,}461$.

Учет гидравлических потерь давления в контуре. В существующих методиках определения коэффициента трансформации трансформатора теплоты не ведется учет гидравлических потерь давления в контуре трансформатора теплоты. При этом очевидно, что они будут влиять на мощность компрессора и коэффициент трансформации теплоты.

Для упрощения логики расчета необходимо разделить фреоновый контур на участки, где будет жидкий, газообразный фреон и двухфазные среды в испарителе и конденсаторе, как показано на рис. 3.

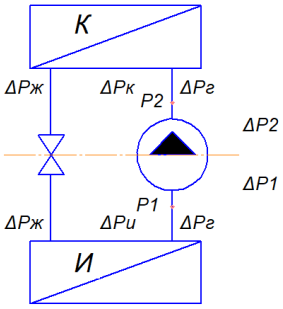


Рис. 3. Схема распределения потерь давления по контуру ПКТН

Первый участок ΔP_1 содержит следующие элементы: трубопровод из терморегулирующего вентиля (ТРВ) (в трубопроводе преимущественно жидкий хладагент) с двумя поворотами на 90°; испаритель; трубопровод от испарителя до компрессора с газообразным хладагентом (включает два поворота).

Второй участок ΔP_2 содержит следующие элементы: трубопровод от компрессора до конденсатора (газообразный хладагент) с двумя поворотами; конденсатор; трубопровод от конденсатора до ТРВ с жидким хладагентом (включает два поворота).

Соответственно, потеря давления перед компрессором определяется как

$$\Delta P_1 = \Delta P_ж + \Delta P_и + \Delta P_г.$$

Потеря давления после компрессора составляет

$$\Delta P_2 = \Delta P_ж + \Delta P_к + \Delta P_г,$$

где $\Delta P_ж$ – потери давления на участке с жидким хладагентом; $\Delta P_г$ – потери давления на участке с газообразным хладагентом; $\Delta P_и$ – потери давления в испарителе; $\Delta P_к$ – потери давления в конденсаторе.

Эти потери будут влиять на цикл ПКТН, увеличивая работу компрессора и изменяя значения $q_и$ и $q_к$ (рис. 4).

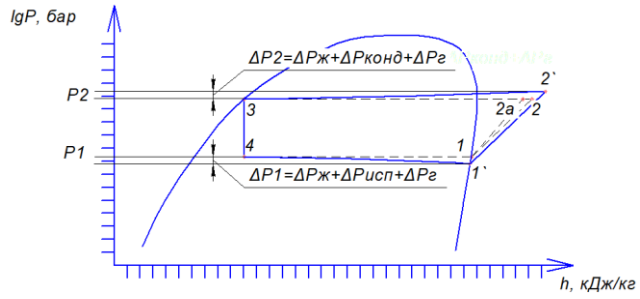


Рис. 4. Графическое отображение влияния потерь давления хладагента на цикл ПКТН

Расчет потерь давления в трубопроводах контура ПКТН. Для определения относительных длин трубопроводов возьмем ПКТН 10 кВт. При диаметре трубки 0,01 м ее длина от ТРВ до испарителя и от испарителя до компрессора составит примерно 0,5 м, т. е. $\frac{L_1}{d_{1вн}} = 50$. Для второго участка длина не меняется, но толщина трубки увеличивается вдвое для трубки от компрессора до конденсатора, от конденсатора до ТРВ $\frac{L_2}{d_{2вн}} = 25$.

Произведем расчет потерь давления на первом участке. Сначала определяем параметры потока хладагента:

– скорость потока жидкого хладагента

$\omega' = 0{,}5$ м/с;

– скорость потока газообразного хладагента

$\omega'' = 5$ м/с;

– плотность хладагента в жидком состоянии

$\rho' = 554{,}2$ кг/м^3;

– плотность хладагента в газообразном состоянии

$\rho'' = 18$ кг/м^3;

– кинематическая вязкость жидкого хладагента

$\upsilon' = 1{,}79 \cdot 10^{-7}$ м^2/с;

– кинематическая вязкость газообразного хладагента

$\upsilon'' = 6{,}03 \cdot 10^{-7}$ м^2/с;

– число Рейнольдса для жидкого хладагента

$$\mathrm{Re}' = \frac{\omega' d_э}{\upsilon'} = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}01}{1{,}79 \cdot 10^{-7}} = 27933;$$

– число Рейнольдса для газообразного хладагента

$$\mathrm{Re}'' = \frac{\omega'' d_э}{\upsilon'} = \frac{5 \cdot 0{,}02}{6{,}03 \cdot 10^{-7}} = 165837;$$

– коэффициент сопротивления трения для жидкого хладагента

$$\lambda' = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}'^{0{,}25}} = \frac{0{,}3164}{27933^{0{,}25}} = 0{,}024;$$

– коэффициент сопротивления трения для газообразного хладагента

$$\lambda'' = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}''^{0{,}25}} = \frac{0{,}3164}{27933^{0{,}25}} = 0{,}0156.$$

Используем уравнение Дариси-Вейсбаха для определения потерь давления. В данном расчете принимаем допущение, что поток гомогенный. Хотя стоит понимать, что в жидкой фазе будет присутствовать пар, который будет влиять на расчет. Его влияние выражаем через коэффициент Ψ:

$$\Delta P_ж + \Delta P_г = \lambda' \frac{L_1}{d_1} \frac{\omega'^2 \rho}{2} \Psi + \Sigma\xi \frac{\omega'^2 \rho'}{2} +$$

$$+\lambda'' \frac{L_1}{d_{1вн}} \frac{\omega''^2 \rho}{2} \Psi + \Sigma\xi \frac{\omega''^2 \rho'}{2} =$$

$$= \left(0{,}024 \cdot 50 + 2\right) \frac{0{,}5^2 \cdot 554{,}2}{2} +$$

$$+\left(0{,}0156 \cdot 25 + 2\right) \frac{5^2 \cdot 18}{2} = 759 \text{ Па}.$$

Расчет для второго участка аналогичен расчету для первого участка, так как там так же присутствует трубка $\frac{L_1}{d_{1вн}} = 50$ с жидкостью и трубка $\frac{L_2}{d_{2вн}} = 25$ с газом:

$$\Delta P_{ж2} + \Delta p_{г2} = 759 \text{ Па}.$$

Расчет потерь давления в теплообменниках контура ПКТН. Расчет потерь давления в контуре ПКТН осложняется тем, что в контуре циркулирует двухфазная среда. В конденсаторе газ превращается в жидкость с резким уменьшением объема, что создает снижение давления. В испарителе же, наоборот, жидкость превращается в газ и давление увеличивается. Оценка гидравлического сопротивления контура трансформатора теплоты приведена в [6]. В соответствии с [6], сопротивление контура определяется как

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_м + \Delta p_у \pm \Delta p_{ст}.$$

Для горизонтальных теплообменных аппаратов, в соответствии с [6], можно использовать формулу Бо-Пиерри, она, правда, не учитывает влияния статического уровня, который в горизонтальных аппаратах пренебрежимо мал, что

подтверждает [7], и к тому же статический уровень испарителя будет компенсироваться примерно таким же уровнем конденсатора в закрытом контуре, что еще более снизит его влияние на гидравлическое сопротивление.

Существующую формулу Бо-Пиерри для определения гидравлического сопротивления теплообменника с двухфазной средой применяем для расчета полного гидравлического сопротивления испарителя:

$$\Delta P_{\text{и}} = \psi \frac{(\omega\rho)^2}{2\rho''} x_{\text{ср}} \left(\frac{L}{d_{\text{вн}}} \right).$$

Среднее расходное содержание хладагента составляет

$$x_{\text{ср}} = 0{,}5(x_1 + x_2) = 0{,}5(0{,}34 + 1) = 0{,}67.$$

В соответствии с диаграммой на рис. 1, $x_1 = 0{,}34$, на выходе же из испарителя пар имеет степень сухости $x_2 = 1$.

Коэффициент полного сопротивления двухфазного потока для хладагента, загрязненного дополнительными примесями, в соответствии с [6] равен

$$\psi = 0{,}07.$$

Характерные значения относительной длины канала, в соответствии с [6, 9], могут находиться в диапазоне 170–1500.

Предварительный расчет поверхности теплообмена показывает, что для обеспечения работы испарителя мощностью 10 кВт относительная длина трубки должна составлять

$$L = \frac{2}{0{,}01} = 200 \text{ м}.$$

Полное сопротивление испарителя составляет

$$\Delta P_{\text{и}} = \psi \frac{(\omega\rho)^2}{2\rho''} x_{\text{ср}} \left(\frac{L}{d_{\text{вн}}} \right) =$$

$$= 0{,}07 \frac{(30{,}45)^2}{2 \cdot 4{,}16} \cdot 0{,}575 \cdot 200 = 897 \text{ Па}.$$

Данный результат очень близок к результату, полученному в [7] по другой методике для аналогичного горизонтального испарителя длиной 2 м.

Для других конструкций двухфазных теплообменников значения могут быть выше [8]. В [8] указано, что величина потерь давления в режимах работы испарителей холодильных машин не превышает 6–10 кПа.

В соответствии с [8], для конденсатора давление по ходу движения смеси может восстанавливаться за счет обратного влияния составляющей ускорения. Используя формулу Бо-Пиерри для нашего случая конденсатора, получаем подтверждение:

$$\Delta P_{\text{к}} = \psi \frac{(\omega\rho)^2}{2\rho''} x_{\text{ср}} \left(\frac{L}{d_{\text{вн}}} \right) =$$

$$= 0{,}07 \frac{(41{,}6)^2}{2 \cdot 13{,}51} \cdot 0{,}5 \cdot 200 = 448 \text{ Па}.$$

Данная формула приводится в [6] для расчета испарителя, но входящие в нее значения позволяют правильно учитывать влияние составляющей ускорения.

Для оценки эффективности трансформатора теплоты необходимо учитывать, что конструкции теплообменников в процессе конструирования могут усложняться и иметь вертикальную компоновку. Согласно [7], потери напора при вертикальной компоновке теплообменника больше в 9 раз. В этой связи для дальнейших расчетов, в соответствии с [8], принимаем величину потерь давления в обоих теплообменниках 6 кПа.

Пересчет коэффициента трансформации теплоты ПКТН. С учетом гидравлического сопротивления контура трансформатора теплоты (см. рис. 4) преобразуем диаграмму, представленную на рис. 1. За счет потерь давления в испарителе и трубопроводах давление перед компрессором будет ниже расчетного на величину ΔP_1. Точку 1 смещаем вниз, оставляя на кривой насыщения (рис. 5). За счет потерь давления в конденсаторе и трубопроводах точка 2 поднимется выше на величину ΔP_2. При этом необходимо учесть характер работы компрессора и его потерь: сохраняя угол наклона процесса 1-2, проводим 1`-2`параллельно 1-2 (рис. 5).

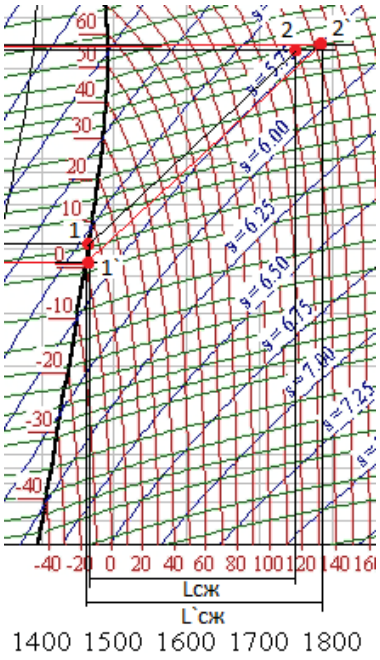


Рис. 5. Построение цикла ПКТН с учетом потерь давления во фреоновом контуре

В соответствии с изложенным выше,

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_{\text{ж}} + \Delta P_{\text{г}} + \Delta P_{\text{к}} = 6759 \text{ Па}.$$

Выше в расчете учитывалась величина депрессии на открытие клапанов компрессора и, соответственно, использовались уточненные значения для p_1 и p_2.

Реальное давление перед компрессором составляет

$$P_1' = P_1 - (\Delta P_1 + \Delta P_и) = 0,446 - 0,007 = 0,439 \text{ МПа}.$$

Реальное давление после компрессора составляет

$$P_2' = P_2 + (\Delta P_2 + \Delta P_к) = 2,38 + 0,007 = 2,387 \text{ МПа}.$$

Работа сжатия компрессора без учета сопротивления контура равна

$$l_{сж} = h_2 - h_1 = 1758,211 - 1465,791 = 292,42 \text{ кДж/кг}.$$

Работа сжатия компрессора с учетом сопротивления контура равна

$$l'_{сж} = h_2 - h_1 = 1779,97 - 1462,55 = 317,42 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловая нагрузка теплового насоса равна тепловой нагрузке конденсатора:

$$q_{тн} = q_к = q_и + l_{сж} = h_2 - h_4 = 1298,761 \text{ кДж/кг}.$$

$$q'_{тн} = q'_к = q_и + l'_{сж} = h'_2 - h_4 =$$
$$= 1779,97 - 459,45 = 1320,52 \text{ кДж/кг}.$$

Коэффициент преобразования теплоты без учета сопротивления контура равен

$$\text{COP} = \frac{q_к}{l_{сж}} = \frac{1298,761}{292,42} = 4,441.$$

Коэффициент преобразования теплоты с учетом сопротивления контура равен

$$\text{COP}' = \frac{q'_к}{l'_{сж}} = \frac{1320,52}{317,42} = 4,2.$$

При этом при расчете по методике [1, 2] $\text{COP} = 4,461$.

При сжатии компрессором хладагента на 18 бар (с 5 до 23 бар) сопротивление тракта составило всего 0,7 % (0,13 бар). Однако при этом коэффициент трансформации с учетом сопротивления контура ПКТН уменьшился на 5,4 %, что вполне соотносится с результатами исследований [9], где снижение COP составило 9 % с учетом потерь напора.

Расчет абсорбционного трансформатора теплоты. Общепринято, что расчет производится по методике [10, 11]. Однако на примере с ПКТН видно влияние потерь давления в контуре хладагента, которое несколько снижает коэффициент трансформации.

Исходные данные для расчета абсорбционного трансформатора теплоты:

1. Температура испарения $t_И$ = 35 °С.
2. Температура конденсации $t_К$ = 60 °С.
3. Температура высокопотенциального (греющего) источника выбрана исходя из пределов работы одноступенчатой абсорбционной установки [10, 11]. В данном расчете температура высокопотенциального источника принимается $t_В$ = 190 °С.
4. Рабочие вещества – водоаммиачная смесь (H_2O+NH_3).
5. Холодопроизводительность Q_0 = 10 кВт.

На рис. 6 представлена принципиальная схема АТН с дефлегматором и двумя регенеративными теплообменниками (РТО).

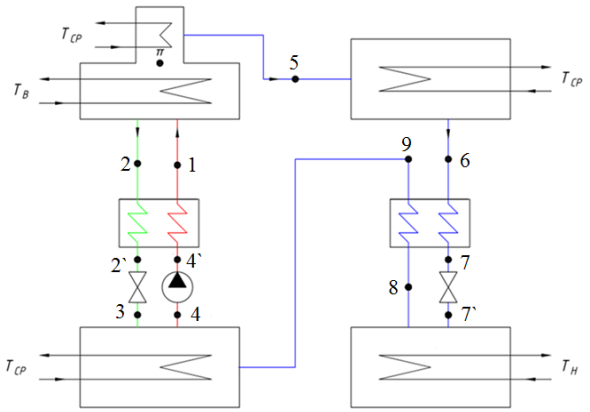


Рис. 6. Принципиальная схема АТН с дефлегматором и двумя РТО

Испаритель и конденсатор в данном случае будут аналогичными представленным в предыдущем примере. Трубопроводная система контура несколько сложнее, однако принципиальных различий нет. Дополнительно появляются два двухфазных теплообменника – абсорбер и генератор пара.

Для проведения аналогии с расчетами ПКТН (см. рис. 5) можно представить АТН в виде, показанном на рис. 7.

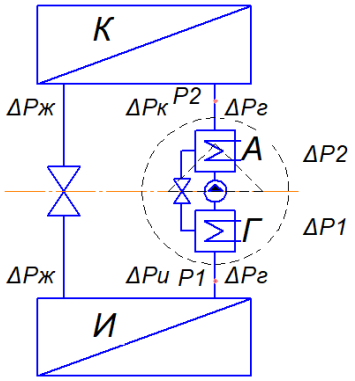


Рис. 7. Принципиальная схема распределения потерь давления по контуру АТН

При таком рассмотрении расположение испарителя и конденсатора, а также трубок, входящих в состав контура, аналогично. Отличие имеется в компрессоре. В данном случае компрессор тепловой и представлен в виде системы абсорбера (А) и генератора пара (Г) и вспомогательного оборудования (насос, теплообменник,

дроссель). Процессы, происходящие внутри теплового компрессора, неидеальны и могут быть отражены через внутренний КПД теплового компрессора, по аналогии с индикаторным КПД механического компрессора η_i. Основные потери при этом будут сосредоточены именно в потерях давления в циркуляционном контуре, которые, в свою очередь, повлияют на мощность насоса, которая обычно в балансе не учитывается ввиду незначительности. Часто используются схемы АТН без насоса в тепловом компрессоре, обеспечивая циркуляцию за счет разности плотностей раствора (естественная циркуляция), при этом потери будут сказываться на увеличении подвода теплоты к генератору пара, но эти значения опять-таки несущественны. Таким образом, в качестве допущения в данном расчете гидравлические потери в тепловом компрессоре принимаются равными нулю.

Давления чистого аммиака при соответствующих параметрах в цикле составляют:

– $p_К$ = 26,15 бар при температуре $t_К$ = 60 °С;

– $p_И$ = 13,61 бар при температуре $t_И$ = 35 °С.

Для учета потерь давления в цикле используем полученные в предыдущем расчете значения потерь давления для аммиачного контура трансформатора теплоты.

Реальное давление перед компрессором составляет

$$p_и' = p_и - (\Delta p_1 + \Delta p_и) = 13{,}61 - 0{,}07 = 13{,}54 \text{ бар.}$$

Реальное давление после компрессора составляет

$$p_к' = p_к + (\Delta p_2 + \Delta p_к) = 26{,}15 + 0{,}07 = 26{,}22 \text{ бар.}$$

В абсорбер поступает слабый раствор с температурой горячего источника и рабочее тело с температурой низкопотенциального источника, в результате смешения выделяется теплота абсорбции, которую необходимо отводить за счет внешнего источника. Температура абсорбции обеспечивается подачей воды с температурой и расходом, необходимыми для достижения требуемой температуры. Принимаем $\Delta t_А = 5°C$ и считаем, что из абсорбера отводится теплоноситель с температурой $t_А = t_К = 60°C$, т. е. $t_4 = t_К = 60°C$.

Определяем концентрацию крепкого раствора (из точки 4 (рис. 8) опускаем вертикальную линию до шкалы концентраций):

$$X_R = 0{,}583 \text{ кг/кг.}$$

На пересечении концентрации X_R и давления в генераторе $p_Г = p_К$ определяем точку 1′ (параметры крепкого раствора в состоянии насыщения на входе в генератор пара) и температуру в ней:

$$t_{1'} = 92 °C.$$

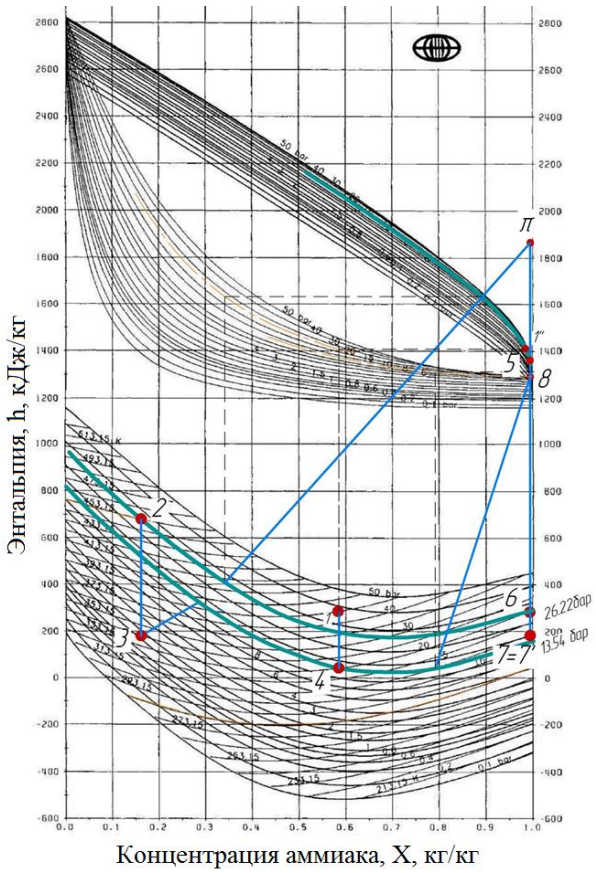


Рис. 8. Зависимость энтальпии от концентрации аммиака

Определяем параметры слабого раствора после генератора в точке 2. Принимаем температуру недогрева в теплообменнике генератора пара $\Delta t_Г = 10°C$, определяем температуру слабого раствора после генератора и отмечаем ее на диаграмме по t_2 и $p_Г = p_К$:

$$t_2 = t_В - \Delta t_Г = 190 - 10 = 180 °C.$$

Затем определяем и концентрацию раствора. Концентрация слабого раствора (из точки 2 (рис. 8) опускаем вертикальную линию до шкалы концентраций) составляет

$$X_A = 0{,}165 \text{ кг/кг.}$$

Рассчитываем регенеративный теплообменник растворов и определяем точку 3 (насыщенный раствор после дроссельного вентиля). Принимаем $\Delta T_{РТО.Р} = 10$ °С и определяем температуру слабого раствора после теплообменника, наносим точку 3 на диаграмму по t_3 и X_A:

$$t_3 = t_4 + \Delta T_{РТО.Р} = 60 + 10 = 70 °C.$$

Температура пара после генератора рассчитывается как

$$t_{5*} = \frac{t_{1'} + t_2}{2} = \frac{92 + 180}{2} = 136 °C.$$

Расположение точки 5 определяется с помощью вспомогательных кривых (предварительно определив пересечение изобары давления

генератора и данной изотермы). При этом давление генерации принимается равным давлению конденсации.

При наличии дефлегматора в определении точки 5 появляются некоторые изменения. За счет наличия дополнительного теплообменника, охлаждающего идущий после генератора пар, необходимо учитывать дополнительное повышение концентрации пара с учетом потерь давления $\Delta p_2 + \Delta p_к$.

При наличии дефлегматора необходимо при определении точки 5 продолжить изотерму до пересечения с линией концентрации, равной X = 0,95–0,99. Это значит, что пар после достижения состояния насыщения (как в обычной схеме АТН) при наличии дефлегматора будет и дальше повышать свою концентрацию, при этом перегреваясь. Пересечение изотермы точки 5 и концентрации X обозначается точкой, называемой полюсом очистки (π).

Из точки, обозначающей полюс очистки, по выбранной концентрации опускается перпендикуляр к пересечению с изобарой высокого давления в цикле в области насыщенного пара. Это пересечение и будет точкой 5 [10, 11].

Концентрация пара после дефлегматора принимается равной

$X_D = 0{,}995$ кг/кг.

Из этого следует, что количество флегмы составляет

$$R = \frac{X_D - X_{1''}}{X_{1''} - X_R} = \frac{0{,}995 - 0{,}985}{0{,}985 - 0{,}585} = 0{,}025,$$

где $X_{1''}$ – концентрация пара, равновесная крепкому раствору ($X_{1''} = 0{,}985$ кг/кг); R – количество флегмы, кг/кг.

Определяем параметры пара на выходе из испарителя. Используем изотерму низкотемпературного источника.

Высшая температура кипения равна

$t_{8'} = t_и = 35\,°\text{C}.$

Рассчитываем регенеративный теплообменник агента. Принимаем разность температур в теплообменнике $\Delta T_{\text{РТО-А}} = 5\,°\text{C}$ и определяем температуру переохлажденной жидкости после РТО-А:

$t_7 = t_{8'} + \Delta T_{\text{РТО-А}} = 35 + 5 = 40\,°\text{C}.$

Уравнение баланса теплообменника имеет вид

$h_6 - h_7 = h_9 - h_8.$

Из этого уравнения можно получить значение пара рабочего агента в точке 9 – после РТО-А:

$h_9 = h_6 - h_7 + h_8 = 284 - 181{,}7 + 1296 =$

$= 1398{,}3$ кДж / кг.

Определяем энтальпию и затем температуру в точке 1. Для вычисления энтальпии предварительно вычислим кратность циркуляции раствора:

$$f = \frac{X_D - X_A}{X_R - X_A} = \frac{0{,}995 - 0{,}16}{0{,}585 - 0{,}16} = 1{,}986.$$

Кратность циркуляции слабого раствора составляет

$f - 1 = 0{,}986$.

Энтальпия крепкого раствора, поступающего в генератор пара, определяется по формуле

$$h_1 = h_4 + \frac{f-1}{f}\left(h_2 - h_3\right) = 40 + \frac{1{,}986 - 1}{1{,}986}\left(680 - 182\right) =$$

$= 287{,}2$ кДж/кг.

По h-X-диаграмме (рис. 8) определяем температуру в точке 1 (насыщенная жидкость после насоса):

$t_1 = 110\,°\text{C}$.

Определяем изменение температур сред в регенеративном теплообменнике:

– охлаждение слабого раствора

$\Delta T_{\text{Т.СЛ}} = t_2 - t_3 = 180 - 70 = 110\,°\text{C};$

– нагрев крепкого раствора

$\Delta T_{\text{Т.СЛ}} = t_1 - t_{4'} = 110 - 60 = 50\,°\text{C}.$

Количество теплоты, отводимое охлаждающей водой, составляет

$q_д = \left(1 + R\right)h_{1''} - h_5 - R\,h_1 = \left(1 + 0{,}025\right)\cdot 1415 -$

$-1364 - 0{,}025 \cdot 287{,}2 = 79$ кДж / кг.

Энтальпии в узловых точках цикла составляют:

– в точке 1 (насыщенная жидкость после насоса)

$h_1 = 287{,}2$ кДж/кг;

– в точке 2 (насыщенная жидкость на выходе из генератора пара)

$h_2 = 680$ кДж/кг;

– в точке 3 (насыщенная жидкость после дроссельного вентиля)

$h_3 = 182$ кДж/кг;

– в точке 4 (насыщенная жидкость на выходе из абсорбера)

$h_4 = 40$ кДж/кг;

– в точке 5 (пар рабочего тела на выходе из генератора пара)

$h_5 = 1364$ кДж/кг ;

– в точке 6 (переохлажденная жидкость на выходе из конденсатора)

$h_6 = 284$ кДж/кг;

– в точке 7 (влажный пар после дроссельного вентиля)

$h_7 = 181{,}7$ кДж/кг;

– в точке 8 (насыщенный пар на выходе из испарителя)

$h_8 = 1296$ кДж/кг;

– в точке 9 (перегретый пар после парового переохладителя)

$h_9 = 1398{,}3$ кДж/кг.

Расчет характеристик цикла. Произведем расчет следующих показателей энергетической эффективности цикла:

– удельная холодопроизводительность

$$q_О = h_9 - h_7 = 1398{,}3 - 181{,}7 = 1216{,}6 \text{ кДж/кг};$$

– удельное тепло конденсации

$$q_К = h_5 - h_7 = 1364 - 181{,}7 = 1182{,}3 \text{ кДж/кг};$$

– удельное тепло абсорбции

$$q_А = (h_9 - h_3) + f(h_3 - h_4) = (1398{,}3 - 182) + \\ + 1{,}986(182 - 40) = 1498{,}3 \text{ кДж/кг};$$

– удельное тепло генерации

$$q_Г = (h_5 - h_2) + f(h_2 - h_1) + q_д = (1364 - 680) + \\ + 1{,}986(680 - 287{,}2) + 79 = 1543 \text{ кДж/кг};$$

– подведенная теплота

$$q_{подв} = q_Г + q_0 = 1543 + 1216{,}6 = 2759{,}6 \text{ кДж/кг};$$

– отведенная теплота

$$q_{отв} = q_К + q_А + q_Д = 1182{,}3 + 1498{,}3 + 79 = \\ = 2759{,}6 \text{ кДж/кг};$$

– тепловой баланс

$$\Delta = q_{подв} - q_{отв} = 0;$$

– удельный объем крепкого раствора

$$v = \frac{0{,}001}{1 - 0{,}35 \cdot X_R} = \frac{0{,}001}{1 - 0{,}35 \cdot 0{,}583} = 0{,}00126;$$

– массовый расход хладагента

$$M = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{10}{1216{,}6} = 0{,}008 \text{ кг/с};$$

– тепло генерации

$$Q_Г = M q_Г = 0{,}008 \cdot 1543 = 12{,}683 \text{ кВт};$$

– тепло абсорбции

$$Q_А = M q_А = 0{,}008 \cdot 1498{,}3 = 12{,}315 \text{ кВт};$$

– тепло конденсации

$$Q_К = M q_К = 0{,}008 \cdot 1182{,}3 = 9{,}718 \text{ кВт};$$

– тепло испарения

$$Q_И = M q_И = 0{,}008 \cdot 1216{,}6 = 10 \text{ кВт};$$

– тепло дефлегмации

$$Q_д = M q_д = 0{,}008 \cdot 79 = 0{,}65 \text{ кВт};$$

– холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{Q_О}{Q_Г} = \frac{10}{12{,}683} = 0{,}788;$$

– коэффициент трансформации теплоты

$$\mu = \frac{Q_К + Q_А + Q_д}{Q_Г} = \frac{1182{,}3 + 1498{,}3 + 79}{1543} = 1{,}788,$$

(до учета потерь давления в контуре $\mu = 1{,}795$).

Коэффициент трансформации АТН с учетом потерь давления контура хладагента изменился на 0,4 %, что существенно меньше, чем у ПКТН (5,4 %), и объясняется особенностями цикла АТН, построение которого представлено на рис. 8.

Выводы. Модернизированная методика расчета трансформаторов теплоты, учитывающая влияние потерь давления хладагента в контуре, позволяет более точно рассчитывать показатели энергетической эффективности, в частности коэффициент трансформации. Полученные результаты показывают, что при расчете по предложенной методике коэффициент трансформации для АТН отличается не существенно – на 0,4 %, по сравнению с расчетом по стандартным методикам. А для ПКТН отличие составляет уже 5,4 %, что ощутимо влияет на дальнейшие расчеты схем с трансформаторами теплоты. В связи с этим на практике для расчета АТН можно потерями давления контура пренебрегать, а для ПКТН их необходимо учитывать.

Данное исследование проводится в рамках разработки комбинированных трансформаторов теплоты и оценки их энергетической эффективности и встраивается в расчеты сложных комбинаций АТН и ПКТН.

Список литературы

1. **Мааке В., Эккерт Г.Ю., Кошпен Ж.Л.** Польманн: учебник по холодильной технике: пер. с фр. – М., 1998. – 1160 с.

2. **Трубаев П.А., Гришко Б.М.** Тепловые насосы: учеб. пособие. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 143 с.

3. **Бродянский В.М., Соколов Е.Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.

4. **Носков А.Н.** Объемные компрессоры холодильных машин: учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 33 с.

5.**Сязин И.Е., Касьянов Г.И., Гукасян А.В.** Особенности динамического анализа холодильного поршневого компрессора [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации. – 2021. – № 4. – URL: https://web.snauka.ru/issues/2021/04/95270 (дата обращения: 29.07.2024).

6. **Теплообменные** аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов, Н.М. Медникова. – Л.: Машиностроение, 1986. – 303 с.

7. **Букин В.Г., Андреев А.И., Букин А.В.** Гидравлическое сопротивление при кипении хладагентов

в трубах горизонтальных и вертикальных испарителей судовых холодильных машин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – 2020. – № 2. – С. 92–99.

8. **Мамченко В.О., Малышев А.А.** Пластинчатые теплообменники в низкотемпературной технике и биотехнологических процессах: учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 116 с.

9. **Володин В.И., Здитовецкая С.В.** Метод расчета парокомпрессионных трансформаторов теплоты // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – С. 76–82.

10. **Морозюк Т.В.** Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.

11. **Тепловые** и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. Ч. 1. Расчет циклов, термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ: учеб. пособие / Л.С. Тимофеевский, В.И. Пекарев, Н.Н. Бухарин и др.; под ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. – 260 с.

References

1. Maake, V., Ekkert, G.Yu., Koshpen, Zh.L. *Pol'mann: uchebnik po kholodil'noy tekhnike* [Pohlmann: Textbook on refrigeration engineering]. Moscow, 1998. 1160 p.

2. Trubaev, P.A., Grishko, B.M. *Teplovye nasosy* [Heat pumps]. Belgorod: Izdatel'stvo BGTU, 2010. 143 p.

3. Brodyanskiy, V.M., Sokolov, E.Ya. *Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsessov okhlazhdeniya* [Energy principles of heat transformation and cooling processes]. Moscow: Energoizdat, 1981. 320 p.

4. Noskov, A.N. *Ob"emnye kompressory kholodil'nykh mashin* [Positive displacement compressors of refrigeration machines]. Saint-Petersburg: Universitet ITMO, 2016. 33 p.

5. Syazin, I.E., Kas'yanov, G.I., Gukasyan, A.V. Osobennosti dinamicheskogo analiza kholodil'nogo porshnevogo kompressora [Features of dynamic analysis of refrigeration piston compressor]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2021, no. 4. Available at: https://web.snauka.ru/issues/2021/04/95270 (date of access: 07/29/2024).

6. Danilova, G.N., Bogdanov, S.N., Ivanov, O.P., Mednikova, N.M. *Teploobmennye apparaty kholodil'nykh ustanovok* [Heat exchangers of refrigeration units]. Leningrad: Mashinostroenie, 1986. 303 p.

7. Bukin, V.G., Andreev, A.I., Bukin, A.V. Gidravlicheskoe soprotivlenie pri kipenii khladagentov v trubakh gorizontal'nykh i vertikal'nykh ispariteley sudovykh kholodil'nykh mashin [Hydraulic resistance during boiling of refrigerants in pipes of horizontal and vertical evaporators of marine refrigeration machines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2020, no. 2, pp. 92–99.

8. Mamchenko, V.O., Malyshev, A.A. *Plastinchatye teploobmenniki v nizkotemperaturnoy tekhnike i biotekhnologicheskikh protsessakh* [Plate heat exchangers in low-temperature engineering and biotechnological processes]. Saint-Petersburg: NIU ITMO; IKhiBT, 2014. 116 p.

9. Volodin, V.I., Zditovetskaya, S.V. Metod rascheta parokompressionnykh transformatorov teploty [Method for calculating steam compression heat transformers]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2021, pp. 76–82.

10. Morozyuk, T.V. *Teoriya kholodil'nykh mashin i teplovykh nasosov* [Theory of refrigeration machines and heat pumps]. Odessa: Studiya «Negotsiant», 2006. 712 p.

11. Timofeevskiy, L.S., Pekarev, V.I., Bukharin, N.N., Danilov, M.M., Dzino, A.A. *Teplovye i konstruktivnye raschety kholodil'nykh mashin, teplovykh nasosov i termotransformatorov. Ch.1. Raschet tsiklov, termodinamicheskikh i teplofizicheskikh svoystv rabochikh veshchestv* [Thermal and design calculations of refrigeration machines, heat pumps and thermal transformers. Part 1. Calculation of cycles, thermodynamic and thermophysical properties of working substances]. Saint-Petersburg: SPbGUNiPT, 2006. 260 p.

УДК 62.932.2

Ольга Борисовна Колибаба
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: koli-baba@mail.ru

Мария Владимировна Козлова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Андрей Борисович Гаряев
ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет "МЭИ", доктор технических наук, профессор кафедры тепломассообменных процессов и установок, Россия, Москва, e-mail: gab874@yandex.ru

Юрий Владимирович Морозов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: qwest-78e23@mail.ru

Исследование гидродинамических закономерностей в слое влажных твердых коммунальных отходов в процессе их обезвоживания

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из эффективных методов обращения с твердыми коммунальными отходами является термическая деструкция. Для термической переработки используются различные установки, в том числе шахтные печи, отличающиеся высокой надежностью и простотой конструкции. Перерабатываемые отходы перемещаются в рабочем пространстве печи под действием силы тяжести, проходя зоны сушки и пиролиза, подвергаясь непрерывной тепловой обработке. В зоне сушки осуществляется нагрев и обезвоживание слоя твердых коммунальных отходов за счет теплообмена с потоком газа из нижерасположенной зоны пиролиза. Недостатком в работе шахтных печей является плохая газопроницаемость слоя в зоне сушки, обусловленная слипаемостью сырья, что приводит к неравномерному прохождению газового потока через пористый слой твердых коммунальных отходов. Газодинамика слоя должна быть организована таким образом, чтобы учесть данную особенность. В этой связи актуальным является исследование гидравлического сопротивления слоя твердых коммунальных отходов, на которое оказывает влияние ряд факторов, таких как структура и влажность сырья, а также скорость сушильного агента.
Материалы и методы. Исследование гидродинамических закономерностей в слое влажных твердых коммунальных отходов среднего морфологического состава в процессе их обезвоживания проведено посредством расчетных и экспериментальных методов исследований.
Результаты. По результатам экспериментальных исследований гидродинамики слоя влажных твердых коммунальных отходов в процессе его высушивания установлены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от влажности сырья и скорости фильтрации сушильного агента. Предложена формула для расчета перепада давления в слое отходов, учитывающая порозность слоя твердых коммунальных отходов. Экспериментально установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления при снижении влажности в процессе высушивания уменьшается неравномерно: в области повышенной влажности (40–89 %) наблюдается незначительное уменьшение сопротивления, характер зависимости близок к линейному, сопротивление резко падает, нелинейность зависимости возрастает.
Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для выбора режимов работы шахтных печей термической переработки твердых коммунальных отходов.

Ключевые слова: твердые коммунальные отхода, термическая переработка, шахтная печь, обезвоживание, гидравлическое сопротивление, порозность, влажность

Olga Borisovna Kolibaba
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: koli-baba@mail.ru

Maria Vladimirovna Kozlova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

© Колибаба О.Б., Козлова М.В., Гаряев А.Б., Морозов Ю.В., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 23–29.

Andrey Borisovich Garyaev
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Heat and Mass Transfer Processes and Installations Department, Russia, Moscow, e-mail: gab874@yandex.ru

Yuri Vladimirovich Morozov
Ivanovo State Power Engineering University, Student of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: qwest-78e23@mail.ru

Study of hydrodynamic regularities in a layer of wet solid municipal waste during its dehydration

Abstract

Background. Thermal destruction is one of the effective methods of treatment of municipal solid waste (MSW) is. Various installations are used for thermal processing, including shaft furnaces, which are distinguished by high reliability and simplicity of design. The waste being processed moves in the furnace body under the action of gravity, passing through drying and pyrolysis zones and undergoing continuous heat treatment. In the drying zone, the MSW layer is heated and dehydrated due to heat exchange with the gas flow from the underlying pyrolysis zone. A disadvantage of shaft furnaces is poor gas permeability of the layer in the drying zone, caused by the stickiness of the raw materials. It leads to uneven passage of the gas flow through the porous layer. Therefore, flow fluid dynamics of the layer should be organized in such a way as to take this feature into account. In this regard, it is relevant to study the hydraulic resistance of the MSW layer, which is influenced by a number of factors, such as the structure and humidity of the layer, as well as the speed of the drying agent.
Materials and methods. Computational and experimental research methods have been used to study hydrodynamic regularities in the layer of wet MSW during their dehydration.
Results. The authors have established the dependences on the coefficient of hydraulic resistance on the raw material moisture content and the filtration rate of the drying agent based on the results of experimental studies of the hydrodynamics of a layer of wet MSW during its drying. A formula has been proposed to calculate the pressure drop in a layer of waste considering the porosity of the MSW layer. It has been experimentally established that the coefficient of hydraulic resistance decreases unevenly with decreasing humidity during the drying process. In the zone of high humidity (40–89 %) a slight decrease in resistance is observed, the nature of the dependence is close to linear. Then the resistance drops sharply, the nonlinearity of the dependence increases.
Conclusions. The results obtained can be used to select the operating modes of shaft furnaces for thermal processing of MSW.

Key words: municipal solid waste, thermal processing, shaft furnace, dehydration, hydraulic resistance, porosity, humidity

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.023-029

Введение. Ежегодно возрастающие объемы твердых коммунальных отходов (ТКО) вызывают необходимость их переработки. Одним из эффективных методов обращения с отходами является термическая деструкция, которая позволяет не только резко сократить количество отходов, получить полезные продукты, но и решить экологическую проблему, связанную с загрязнением городов и рекультивацией земельных угодий [1–4].

Для термической переработки используются различные установки, в том числе шахтные печи, отличающиеся высокой надежностью и простотой конструкции [5]. Перерабатываемые отходы перемещаются в рабочем пространстве печи под действием силы тяжести, проходя зоны сушки и пиролиза, подвергаясь непрерывной тепловой обработке. В зоне сушки осуществляется нагрев и обезвоживание слоя ТКО за счет теплообмена с потоком газа из нижерасположенной зоны пиролиза. В зоне пиролиза происходит термохимическая деструкция ТКО с образованием пиролизного газа и твердого углеродного остатка. Полученный в процессе разложения ТКО пиролизный газ делится на два потока: одна часть газа направляется стороннему потребителю, а другая – в зону сушки для обезвоживания влажных отходов. Увлажненный пиролизный газ из зоны сушки подается в конденсатосборник для охлаждения и удаления влаги и затем в горелки как основное топливо. Рабочий процесс термического разложения осуществляется за счет энергии, полученной от сжигания пиролизного газа.

Недостатком в работе шахтных печей является плохая газопроницаемость слоя, обусловленная слипаемостью сырья, что приводит к неравномерному прохождению газового потока через высушиваемый пористый слой. Гидродинамика слоя должна быть организована таким образом, чтобы учесть данную особенность. В этой связи актуальным является исследование гидравлического сопротивления слоя ТКО, на которое оказывает влияние ряд факторов, таких как структура и влажность сырья, порозность слоя, скорость сушильного агента. Сложность задачи заключается в том, что слой не только формируется из различных по форме и свойствам элементов, но и изменяет свою порозность в процессе высушивания. С изменением порозности изменяется и скорость фильтрации сушильного агента. Для решения такой задачи целесообразно использовать экспериментальные методы.

Ниже предлагаются результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления влажных ТКО в процессе высушивания.

В настоящее время существует ряд формул для определения величины гидравлического сопротивления плотного зернистого слоя, состоящего из различного вида частиц [6–10]. Зависимости, предлагаемые разными авторами для расчета гидравлического сопротивления слоя, записаны либо в виде известной формулы Дарси-Вейсбаха [8]

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho, \quad (1)$$

либо в виде

$$\Delta p = C_{\text{пр}} \cdot \rho W_{\text{ф}}^2 H, \quad (2)$$

где Δp – перепад давления в слое, Па; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; H – высота слоя, м; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр элемента слоя, м; $W_{\text{ф}}$ – скорость фильтрации (фиктивная скорость), м/с; ρ – плотность фильтрующей среды, кг/м^3; $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления слоя, м$^{-1}$:

$$C_{\text{пр}} = \frac{\xi}{2d_{\text{экв}}}. \quad (3)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления зачастую выбирают в качестве критерия для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от размера частиц, температуры и скорости фильтрации. Анализируя имеющиеся данные [8], стоит отметить, что одни исследователи считают коэффициент $C_{\text{пр}}$ функцией только критерия Рейнольдса, другие, устанавливая зависимость порозности от эквивалентного диаметра элементов слоя, находят, что ξ является функцией Re и порозности, третьи отмечают зависимость порозности от $d_{\text{экв}}$. В [8] также показано, что на характер зависимости коэффициента гидравлического сопротивления слоя от порозности практически не влияет форма частиц.

Как отмечено выше, особенностью структуры слоя ТКО, отличающей его от «классического» плотного зернистого слоя, является наличие элементов различной формы. Для описания подобной структуры известны формулы Касаткина-Акопяна (4) и Лева (5), в которых наличие элементов любой формы учитывается введением коэффициента формы элементов слоя [6]:

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho \left[\frac{(1-f)^{3-n}}{f^3} \varphi^{3-n} \right]; \quad (4)$$

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho \frac{(1-f)^2}{f^3} \varphi, \quad (5)$$

где f – порозность; n – показатель степени; φ – коэффициент формы, зависящий от размеров и формы элементов слоя и показывающий, во сколько раз площадь смоченной поверхности слоя, состоящего из данных элементов, больше площади смоченной поверхности слоя из шарообразных элементов.

Несколько упростив вышеописанные формулы, за основу примем зависимость вида

$$\Delta p = \xi \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{W_{\text{ф}}^2}{2} \rho f^m \varphi, \quad (6)$$

где m – показатель степени.

Методы исследования. Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления были проведены в лабораторных условиях для увлажненных образцов смеси ТКО среднего морфологического состава: пищевые отходы – 48,6 %; бумага и картон – 41,7 %; текстиль – 6,9 %; дерево – 1,4 %; кожа и резина – 1,4 % (рис. 1).

Рис. 1. Образец ТКО

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

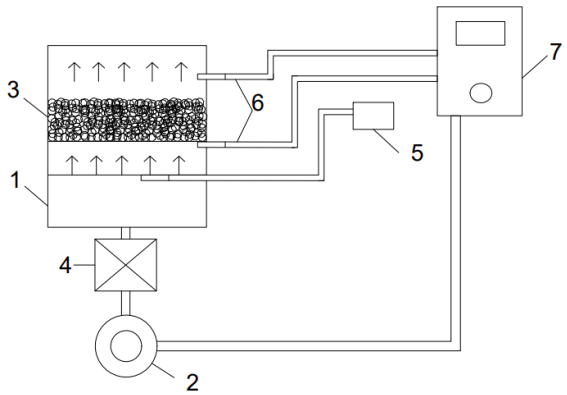


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – сушильная камера; 2 – вентилятор; 3 – слой ТКО; 4 – калорифер; 5 – анемометр; 6 – датчики давления; 7 – блок измерений и управления

Эксперимент проводили в следующей последовательности. Сухие ТКО предварительно измельчали и взвешивали. Затем их увлажняли,

снова взвешивали и размещали равномерным слоем на решетке в цилиндрической сушильной камере *1*. При помощи вентилятора *2* осуществляли подачу воздуха под слой ТКО *3* для высушивания. Перед подачей в сушильную камеру воздух предварительно нагревали в калорифере *4* до температуры 100 °С. Скорость воздуха измеряли анемометром *5*, а перепад давления в слое ТКО – с помощью датчиков давления *6*. Показания приборов выводили на блок измерений и управления *7*. В течение процесса сушки производили взвешивание образца с последующим расчетом относительной влажности и порозности ТКО.

Считая, что коэффициент гидравлического сопротивления зависит от порозности, которая, в свою очередь, определяется влажностью отходов, и критерия Рейнольдса, который определяется скоростью движения фильтрационного потока теплоносителя, в ходе эксперимента варьировали скорость движения воздуха на входе в слой от 2,5 до 3,5 м/с. Относительная влажность исходных ТКО в разных опытах составляла от 79,2 до 89,4 %. Порозность слоя рассчитывали по формуле

$$f = \frac{V - V_{\text{ск}}}{V}, \tag{7}$$

где V – объем пористого слоя отходов в сушильной камере, м^3; $V_{\text{ск}}$ – объем твердого «скелета» (непосредственно ТКО), м^3:

$$V_{\text{ск}} = \frac{m_{\text{ск}}}{\rho_{cr}}, \tag{8}$$

где $m_{\text{ск}}$ – масса влажных ТКО, определяемая взвешиванием в процессе их высушивания, кг; ρ_{cr} – средняя плотность измельченных ТКО, кг/м^3.[1]

Относительная погрешность эксперимента не превысила 2,5 %.

Результаты экспериментов приведены в таблице.

Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления слоя ТКО

Скорость воздуха, м/с	Высота слоя, м	Порозность ТКО	Масса ТКО, кг	Относительная влажность ТКО, %	Перепад давления, Па
2,5	0,130	0,53	0,508	89,4	117,6
	0,120	0,57	0,388	56,9	98,0
	0,117	0,58	0,288	28,5	88,2
	0,115	0,59	0,232	11,2	78,4
	0,113	0,60	0,210	1,9	76,4
3	0,105	0,70	0,376	82,5	107,8
	0,100	0,71	0,328	59,2	88,2
	0,098	0,76	0,262	27,2	88,2
	0,097	0,77	0,246	19,4	78,4
	0,095	0,78	0,236	1,4	68,6
3,5	0,110	0,66	0,386	79.2	120,2
	0,100	0,68	0,340	44,0	119,6
	0,097	0,72	0,284	20,3	115,2
	0,095	0,74	0,258	9,3	107,4
	0,087	0,76	0,234	1,0	96,6

По экспериментальным данным были построены кинетические кривые сушки ТКО при различных скоростях сушильного агента на входе в слой (рис. 3).

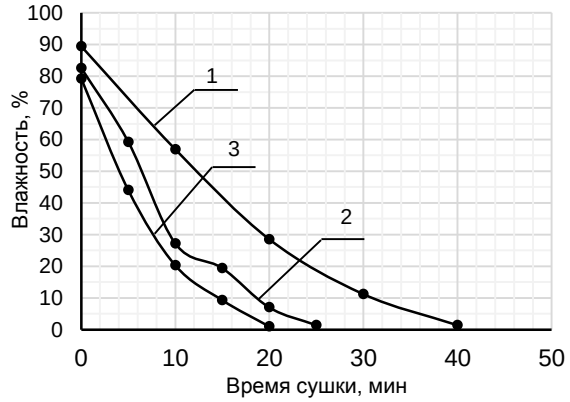


Рис. 3. Кривые кинетики сушки влажных ТКО при скоростях сушильного агента: 1 – 2,5 м/с; 2 – 3 м/с; 3 – 3,5 м/с

Результаты исследования. Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью дифференциального метода Вант-Гоффа [11]. Предполагаем, что зависимость перепада давления от порозности описывается степенной функцией

$$A = \xi f^m, \tag{9}$$

где

$$A = \frac{2d_{\text{экв}}\Delta p}{H\rho W_{\text{ф}}^2}. \tag{10}$$

Согласно методу Вант-Гоффа, по опытным данным (см. таблицу) строили графическую зависимость A от f в логарифмических координатах, в которых степенная функция имеет вид прямой линии. Показатель степени m при f равен тангенсу угла наклона прямой. Постоянную ξ определяли как величину отрезка, отсекаемого прямой на оси

[1] Таблица плотности отходов по ФККО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ecopoliss.ru/poleznaya-informaciya/tablica-plotnosti-othodov (дата обращения 10.11.24).

ординат (с учетом знака) и равного lg ξ. По значению lg ξ находили величину ξ.

Ниже приведен график зависимости *A* от *f*, полученный при скоростях теплоносителя на входе в слой ТКО: 2,5 м/с, 3 м/с, 3,5 м/с и 4 м/с (рис. 4).

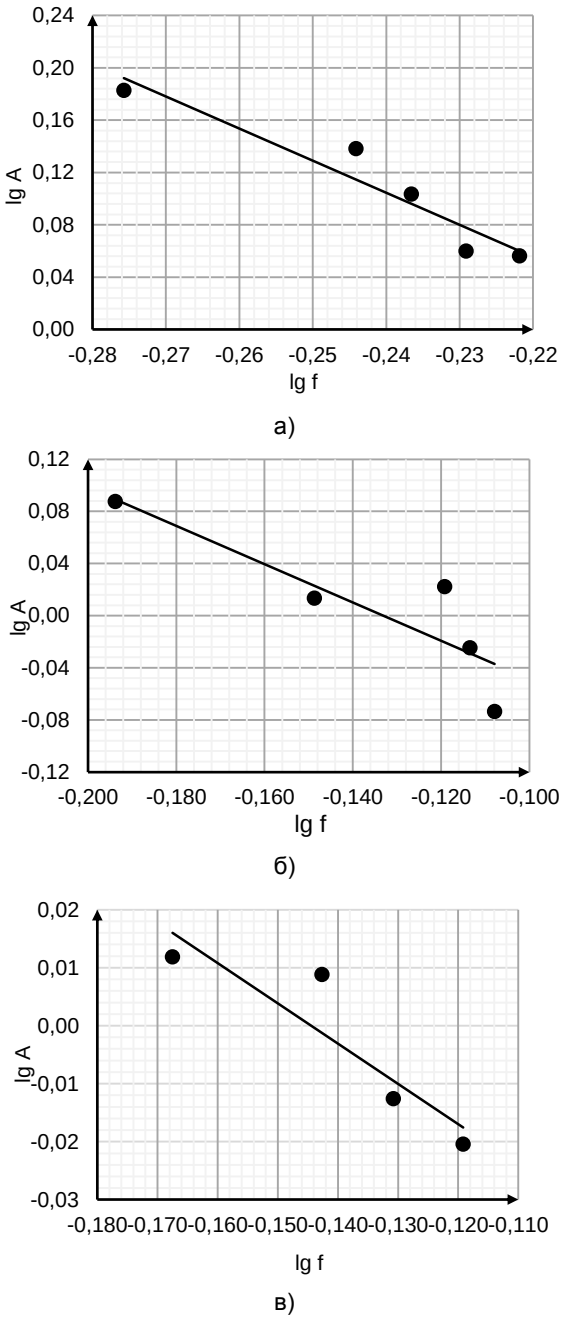


Рис. 4. Зависимость lg *A* от lg *f* при различных скоростях сушильного агента: а – 2,5 м/с; б – 3 м/с; в – 3,5 м/с

Очевидно, что графики имеют сходный характер, а угол наклона прямой линии свидетельствует о том, что показатель степени *m* (9) отрицательный и зависит от скорости теплоносителя.

Обобщая полученные в результате обработки по методу Вант-Гоффа данные, зависимость показателя степени *m* от числа Рейнольдса можно записать в виде

$$m = 0{,}0079 \cdot \mathrm{Re} - 6{,}754. \qquad (11)$$

Графическая интерпретация экспериментальной зависимости порозности слоя от влажности отходов (см. таблицу) представлена на рис. 5.

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что зависимость порозности слоя ТКО от влажности сырья носит линейный характер, с уменьшением влажности в процессе высушивания материала порозность возрастает.

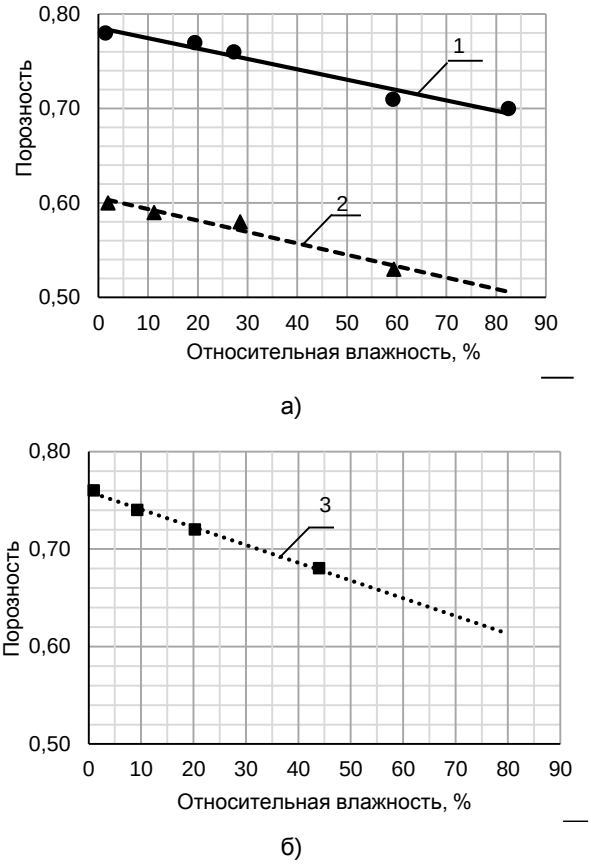


Рис. 5. Зависимость порозности слоя ТКО от влажности сырья при разных скоростях теплоносителя: а – 1 – 3 м/с; 2 – 2,5 м/с; б – 3 – 3,5 м/с

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления слоя ТКО от числа Рейнольдса (скорости фильтрации) сушильного агента представлена на рис. 6.

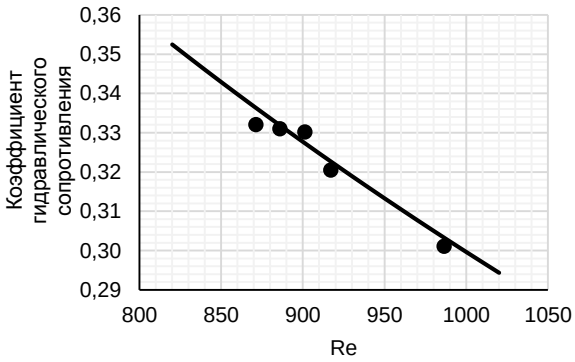


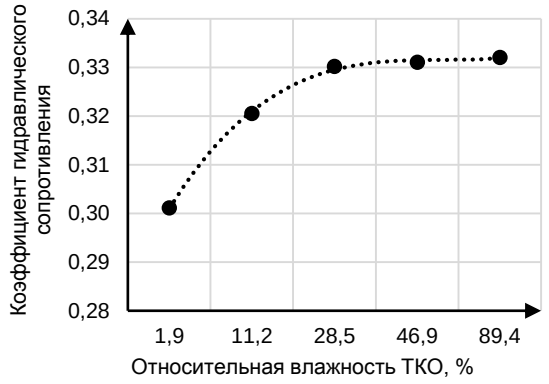
Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления слоя ТКО от скорости фильтрации

Аппроксимация экспериментальных данных в диапазоне изменения порозности от 0,52 до 0,78 произведена уравнением вида

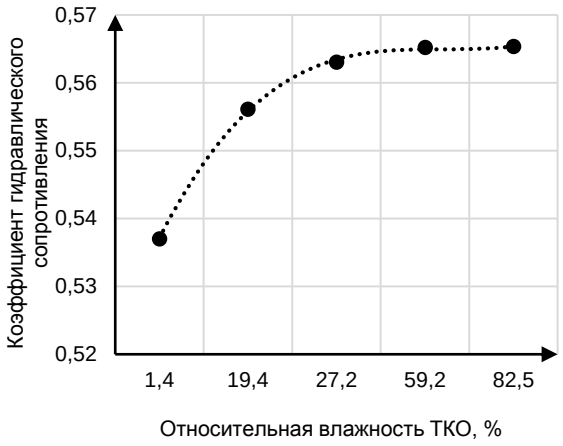
$$\xi = 0{,}000000158 \cdot \mathrm{Re}^2 - 0{,}000581 \cdot \mathrm{Re} + 0{,}722 \quad (12)$$

с коэффициентом детерминации R^2 = 0,999.

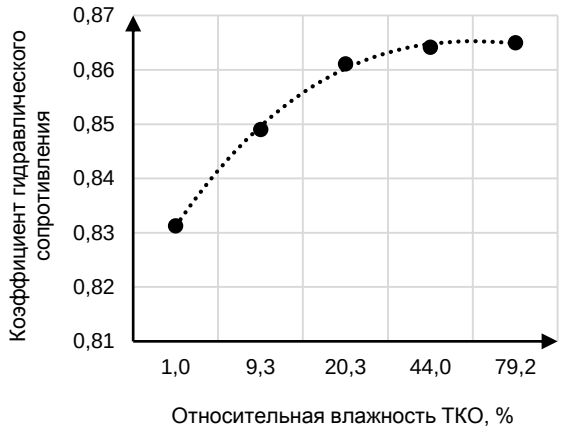
Графики зависимости коэффициента гидравлического сопротивления слоя ТКО от влажности сырья при различных скоростях сушильного агента на входе в слой ТКО приведены на рис. 7.



а)



б)



в)

Рис. 7. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от относительной влажности ТКО при скоростях сушильного агента на входе в слой: а – 2,5 м/с; б – 3 м/с; в – 3,5 м/с

Полученные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления ξ от влажности ω аппроксимированы полиномиальными уравнениями следующего вида:

– при скорости 2,5 м/с (рис. 7,а)

$$\xi = 0{,}0008 \cdot \omega^3 - 0{,}0107 \cdot \omega^2 + 0{,}0463 \cdot \omega + 0{,}26,$$

коэффициент детерминации R^2 = 0,9986;

– при скорости 3 м/с (рис. 7,б)

$$\xi = 0{,}0008 \cdot \omega^3 - 0{,}0106 \cdot \omega^2 + 0{,}0447 \cdot \omega + 0{,}50,$$

коэффициент детерминации R^2 = 0,9994;

– при скорости 3,5 м/с (рис. 7,в)

$$\xi = 0{,}0003 \cdot \omega^3 - 0{,}0055 \cdot \omega^2 + 0{,}0331 \cdot \omega + 0{,}80,$$

коэффициент детерминации R^2 = 0,9982.

Анализ результатов, представленных на рис. 7, показывает, что кривые носят сходный характер. Коэффициент гидравлического сопротивления при снижении влажности в процессе высушивания уменьшается неравномерно. В области повышенной влажности (40–89 %) наблюдается незначительное уменьшение сопротивления, характер зависимости близок к линейному. Далее с уменьшением относительной влажности сопротивление резко падает, нелинейность зависимости возрастает.

Для оценки корректности расчетов, выполненных по формуле (6), проведено сравнение результатов расчета по предлагаемой зависимости с результатами, полученными по известным формулам Касаткина–Акопяна и Лева (рис. 8). Графики, приведенные на рис. 8, получены для скорости сушильного агента на входе в слой ТКО 3,5 м/с.

Анализ данных рис. 8 показывает, что графики носят сходный характер. Очевидно, что результаты расчета по формулам Лева и Касаткина–Акопяна существенно различаются между собой, причем это расхождение с увеличением числа Рейнольдса уменьшается. Более близкие результаты получаются при сравнении с формулой Лева. Средняя относительная погрешность в этом случае не превышает 30 %.

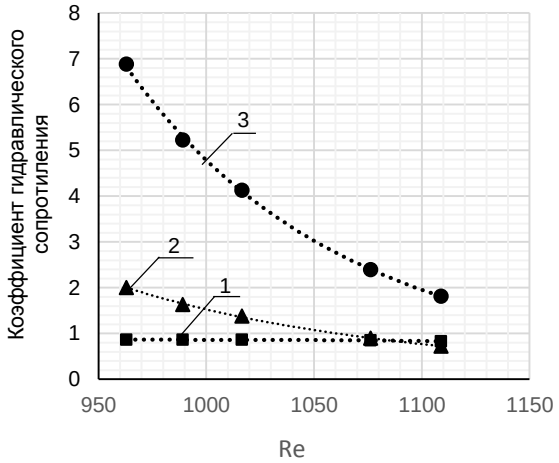


Рис. 8. Сравнение результатов расчета коэффициента гидравлического сопротивления: 1 – по предлагаемой формуле; 2 – по формуле Лева; 3 – по формуле Касаткина–Акопяна

Выводы. Экспериментальные исследования гидродинамики слоя влажных ТКО в процессе его высушивания позволили получить зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от влажности сырья и скорости фильтрации сушильного агента.

Предложенная формула для расчета перепада давления в слое отходов учитывает порозность слоя. Результаты расчета по предлагаемой формуле соспоставимы с результатами расчетов по известным зависимостям.

Полученные результаты могут быть использованы для выбора режимов работы шахтных печей термической переработки ТКО.

Список литературы

1. **Технические** подходы по осуществлению непрерывного пиролиза углеродсодержащих коммунальных отходов / М.Р. Хасиятуллов, А.В. Кудин, Г.И. Павлов и др. // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25, № 11. – С. 106–112. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_11_106.

2. **Тугов А.Н.** Современные технологии термической переработки твердых коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 3–20.

3. **Пиролитические** методы термической переработки твердых коммунальных отходов / В.В. Хасхачих, О.М. Ларина, Г.А. Сычев и др. // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 467–480.

4. **Колибаба О.Б., Козлова М.В., Гаряев А.Б.** Современные тенденции в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: проблемы и перспективы. Обзор // Вестник Московского энергетического института. – 2024. – № 4. – С. 90–107.

5. **Пат.** № 2700614 C1 Российская Федерация МПК F23G 5/027(2006.01), F27B 9/00(2006.01). Установка для термической переработки твердых коммунальных отходов методом пиролиза : № 2019108660 : заявл. 26.03.2019 : опубл. 18.09.2019 / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина А.С. Семенов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Бюл. № 26.

6. **Никольский Б.П.** (ред.) Справочник химика. – М.; Л.: Изд-во «Химия», 1966. – 976 с.

7. **Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.** Аппараты со стационарным зернистым слоем. – Л.: Химия,1979. – 176 с.

8. **Сравнительный** анализ описания гидравлического сопротивления плотного слоя из частиц разной формы / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.В. Луговкин, В.Ф. Ярчук // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58, № 9. – С. 688–695.

9. **Бобков В.И., Орехов В.А.** Исследование аэродинамики полифракционного плотного слоя рудного сырья // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 9. – С. 67–72.

10. **Ровенский И.И., Бережной Н.Н.** Исследование газопроницаемости слоя окатышей // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1964. – № 1. – С. 27–32.

11. **Образцова Е.Ю., Рухов А.В.** Основы физической химии. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 80 с.

References

1. Khasiyatullov, M.R., Kudin, A.V., Pavlov, G.I., Sitnikov, O.R., Garmonov, S.Yu. Tekhnicheskie podkhody po osushchestvleniyu nepreryvnogo piroliza uglerodsoderzhashchikh kommunal'nykh otkhodov [Technical approaches to the implementation of continuous pyrolysis of carbon-containing municipal waste]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2022, vol. 25, no. 11, pp. 106–112. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_11_106.

2. Tugov, A.N. Sovremennye tekhnologii termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov i perspektivy ikh realizatsii v Rossii (obzor) [Modern technologies for thermal processing of municipal solid waste and prospects for their implementation in Russia (review)]. *Teploenergetika*, 2021, no. 1, pp. 3–20.

3. Khaskhachikh, V.V., Larina, O.M., Sychev, G.A., Gerasimov, G.Ya., Zaychenko, V.M. Piroliticheskie metody termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Pyrolytic methods for thermal processing of municipal solid waste]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 467–480.

4. Kolibaba, O.B., Kozlova, M.V., Goryaev, A.B. Sovremennye tendentsii v sfere obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami: problemy i perspektivy. Obzor [Modern trends in the field of solid municipal waste management: problems and prospects. Review]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2024, no. 4, pp. 90–107.

5. Kolibaba, O.B., Gorinov, O.I., Dolinin, D.A., Gabitov, R.N., Samyshina, O.V., Semenov, A.S. *Ustanovka dlya termicheskoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov metodom piroliza* [Installation for thermal processing of municipal solid waste by pyrolysis]. Patent RF, no. 2700614, 2019.

6. Nikol'skiy, B.P. (ed.) *Spravochnik khimika* [Chemist's Handbook]. Moscow; Leningrad: Izdatel'stvo «Khimiya», 1966. 976 p.

7. Aerov, M.E., Todes, O.M., Narinskiy, D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem* [Apparatuses with a stationary granular layer]. Leningrad: Khimiya, 1979. 176 p.

8. Yur'ev, B.P., Gol'tsev, V.A., Lugovkin, V.V., Yarchuk, V.F. Sravnitel'nyy analiz opisaniya gidravlicheskogo soprotivleniya plotnogo sloya iz chastits raznoy formy [Comparative analysis of the description of the hydraulic resistance of a dense layer of particles of different shapes]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 688–695.

9. Bobkov, V.I., Orekhov, V.A. Issledovanie aerodinamiki polifraktsionnogo plotnogo sloya rudnogo syr'ya [Study of aerodynamics of polyfractional dense layer of ore raw materials]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 9, pp. 67–72.

10. Rovenskiy, I.I., Berezhnoy, N.N. Issledovanie gazopronitsaemosti sloya okatyshey [Study of gas permeability of pellet layer]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1964, no. 1, pp. 27–32.

11. Obraztsova, E.Yu., Rukhov, A.V. *Osnovy fizicheskoy khimii* [Fundamentals of physical chemistry]. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO «TGTU», 2023. 80 p.

УДК 662.818

Владимир Александрович Рыжиков
СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru

Ольга Александровна Ерохина
СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», старший преподаватель кафедры ТЦКМ, заведующая лабораторией, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: art-stones@bk.ru

Эдуард Львович Аким
СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ТЦКМ, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: akim-ed@mail.ru

Павел Владимирович Луканин
СПбГУПТД «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», доктор технических наук, профессор, первый проректор, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: tsutd@rambler.ru

Совместная переработка отходов в комбинированные топливные брикеты, содержащие целлюлозу и синтетические полимеры

Авторское резюме

Состояние вопроса. На сегодняшний день в России и мире переработка промышленных отходов является очень актуальной задачей, решение которой позволит осуществить переход к низкоуглеродной циркулярной биоэкономике и снизить углеродный след от антропогенного воздействия. Целью исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов второго поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой в целях снижения до минимума вреда для экологической составляющей окружающей среды и повышения максимальной энергетической и экономической эффективности промышленных предприятий.
Материалы и методы. Для реализации поставленной цели использованы следующие методы экспериментального исследования: изучение свойств термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности полимерных компонентов древесины в процессе формирования брикета; определение эмпирическим путем оптимальной композиции комбинированного брикета и свойств полученного брикета с использованием муфельной печи и калориметрической установки.
Результаты. Представлены результаты проведенных исследований, в частности полученные значения плотности, прочности и теплоты сгорания изготовленного брикета при различных композициях исходного сырья. Определена оптимальная композиция сырья в топливном брикете как соотношение 50 % твердых древесных отходов и 50 % отходов производства ламинированной бумаги. Рассчитана итоговая плотность (составила 1036 кг/м^3), среднее значение низшей теплоты сгорания топлива (19 МДж/кг), а также прочность на сжатие 4,5 МПа при давлении на поперечное сечение брикета.
Выводы. Полученные в ходе проведения работы топливные брикеты имеют высокие показатели по плотности, прочности и теплоте сгорания топлива. Инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей окружающей среды и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность промышленных предприятий. Использование полученного топлива и технологии его производства позволит снизить нагрузку на полигоны с до сих пор не утилизируемыми отходами и использовать полученную энергию топлива на собственные нужды.

Ключевые слова: биотопливо, отходы деревообработки, целлюлозно-бумажные отходы, топливные брикеты, синтетические полимеры, термопластичность, влагопластичность, углеродная нейтральность, чистые технологии, биоэкономика

Vladimir Aleksandrovich Ryzhikov
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Senior Lecturer of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, St. Petersburg, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru

Olga Aleksandrovna Erokhina
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Senior Lecturer of TCCM Department, Head of Laboratory, Russia, St. Petersburg, e-mail: art-stones@bk.ru

© Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 30–38.

Eduard Lvovich Akim
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of TCCM Department, Russia, St. Petersburg, e-mail: akim-ed@mail.ru

Pavel Vladimirovich Lukanin
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, First Vice-Rector, Russia, St. Petersburg, e-mail: tsutd@rambler.ru

Co-processing of waste into combined fuel briquettes containing cellulose and synthetic polymers

Abstract

Background. Today, in Russia and globally, recycling of industrial waste is an extremely urgent task, the solution of which will enable the transition to a low-carbon circular bioeconomy and reduce the carbon footprint of anthropogenic impact. The goal of the research is to develop a technology for processing and utilization of pulp and paper industry waste containing synthetic polymers. It is carried out by their co-utilization in the form of combined fuel briquettes of the 2nd generation consisting of solid wood waste and laminated paper production waste, with subsequent utilization in a boiler plant with a low-temperature vortex furnace. The aim is to minimize harm for the ecological environment and increase the maximum energy and economic efficiency of industrial enterprises.
Material and methods. To achieve the stated goal, the following research methods have been used: study of thermoplasticity of synthetic polymers and moisture plasticity of polymeric components of wood in the process of briquette formation, empirical determination of the optimal composition of combined briquette and properties of the obtained briquette using muffle furnace and calorimetric unit.
Results. The paper presents the results of the conducted research and experiments, in particular, the obtained values of density, strength, and calorific value of the obtained briquette at different compositions of feedstock. In case of the optimally chosen composition of raw materials in the fuel briquette, which is defined as the ratio of 50 % of solid wood waste and 50 % of laminated paper production waste, the final density is 1036 kg/m^3, the average value of the lowest heat of combustion of fuel is 19 MJ/kg. Also, the compressive strength of 4,5 MPa has been determined under pressure on the cross-section of the briquette.
Conclusions. The fuel briquettes obtained during the research have high indicators of density, strength and heat of combustion of fuel. The innovative technology of processing wood waste and waste packaging laminated paper will minimize harm for the environment and increase the maximum energy and economic efficiency of industrial enterprises. The use of the obtained fuel and the technology of its production will make it possible to reduce the load on landfills with currently unutilized waste and use the obtained fuel energy for own needs.

Key words: biofuels, industrial wood waste, pulp and paper waste, fuel briquettes, synthetic polymers, thermoplasticity, moisture plasticity, carbon neutrality, clean technologies, bioeconomy

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.030-038

Введение. Актуальность данной работы основывается на том, что в России и мире на данный момент активно идет обсуждение перехода к углеродной нейтральности, что означает сокращение до нуля выбросов углекислого газа в процессе производственной деятельности или их компенсацию за счет углеродно-отрицательных проектов [1–3]. Процесс минимизации техногенного влияния на окружающую среду и переход на чистые технологии стал уже не трендом, а неизбежной реальностью [4, 5]. В России в июле 2020 года был подписан Указ Президента о национальных целях развития России на период до 2030 года. Новый документ существенно усиливает значимость экологической повестки. В соответствии с ним, в ближайшие десятилетия страна будет двигаться в «зеленом» направлении. В числе главных целей станет создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, снижение вдвое вредных производственных выбросов в воздух, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Помимо этого, должны быть ликвидированы наиболее опасные объекты накопленного вреда природе и проведено экологическое оздоровление водных объектов.

В связи с проблемой перехода к низкоуглеродной циркулярной биоэкономике на сегодняшний день актуальна задача переработки отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры [6]. В настоящее время при производстве ламинированной бумаги не всегда есть возможность утилизировать эти отходы (обрезки, брак), чаще всего их захоранивают на полигонах, что не только увеличивает площади свалок (полигонов), но и приводит при их гниении к дополнительным выбросам диоксида углерода без получения полезной энергии. Таким образом, эти достаточно крупнотоннажные отходы целлюлозно-бумажной промышленности ни в России, ни в мире пока что не нашли своего места в процессе переработки для получения полезной энергии или топлива [5, 6].

Объем потребления бумаги и картона в мире составляет свыше 430 млн тонн, а объем потребления крупнотоннажных синтетических полимеров – свыше 360 млн тонн. Основным

сырьем для производства синтетических полимеров является нефть, мировая добыча которой составляет около 4,5 млрд тонн в год (сернистых соединений в различных видах нефти может быть более 10 %, хотя обычно этот показатель не превышает 6 %). Таким образом, на переработку в синтетические полимеры расходуется лишь 8 % нефти, а 92 % прямо или косвенно сжигается как топливо с выделением не только углекислого газа, но и сернистых соединений [8–10].

Целью исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов второго поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой [11, 12].

Научная значимость исследования заключается в том, что впервые показана возможность создания топливных брикетов путем совместной переработки твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры. Установлена возможность реализации в процессе экструзии свойств термовлагопластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров.

В связи с неблагоприятной экологической обстановкой в мире, в частности загрязнением планеты отходами производств и вредными выбросами в атмосферу оксидов азота, серы и диоксида углерода, данное исследование и разработка технологии переработки отходов имеют высокую практическую значимость для предприятий деревообрабатывающей и упаковочной промышленности.

Материалы и методы. Проведенные исследования включали в себя следующие этапы и методы:

– измельчение отходов ламинированной бумаги до мелкой фракции с помощью мельничной установки;

– проведение ситового анализа для определения гранулометрического состава сырья;

– определение влажности исходного сырья и его высушивание с помощью влагомера AND MF-50;

– формирование навески с различными композициями сырья;

– пропарка полученной смеси насыщенным паром в течение определенного временного промежутка для достижения необходимой влажности;

– предварительный нагрев пресс-формы до 100 °С для использования высокой температуры в процессе прессования сырья в топливный брикет;

– формирование топливного брикета в лабораторных условиях с помощью автоматизированного пресса (INSTRON-1121) и под воздействием высокой температуры с дальнейшим определением плотности, прочности и коэффициента сжатия брикета;

– исследование упруго-релаксационных свойств смесей древесного компонента и отходов ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры;

– определение параметров, обусловливающих экструдируемость смеси;

– определение конечной влажности и зольности рабочей массы топлива;

– определение низшей теплоты сгорания топлива с помощью лабораторной установки, состоящей из калориметрической бомбы и калориметра;

– проведение теплотехнических расчетов в целях определения энергетической и экологической эффективности полученного топлива.

Перед началом проведения исследования было необходимо подготовить исходное сырье, включающее древесную муку опилок лиственницы и отходы производства ламинированной бумаги (рис. 1).

Рис. 1. Отходы производства упаковочной ламинированной бумаги

На первом этапе при подготовке исходного сырья было осуществлено измельчение материала с помощью лабораторной дисковой мельницы (рис. 2).

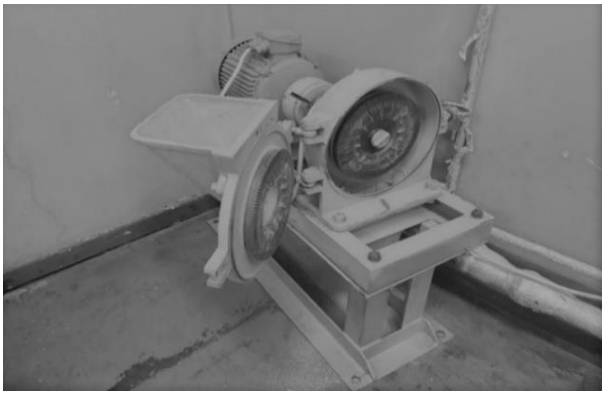


Рис. 2. Лабораторная дисковая мельница

Далее был проведен ситовый анализ полученных измельченных отходов. Для корректного определения гранулометрического состава топлива использовалось 20 грамм полученного материала. Данный материал пропускался через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек R5000, R2000, R1000, R500.

На следующем шаге подготовки сырья формировались навески смеси двух видов сырья в различных композициях общей массой 2 грамма.

Для того чтобы получить корректные эмпирические данные, в процессе проведения эксперимента необходимо было выровнять влажности двух видов сырья. Для этого использовалось специальное устройство – влагомер ANDMF–50 (рис. 3).

Рис. 3. Влагомер ANDMF–50

Древесные отходы и отходы ламинированной бумаги были высушены до 3,3 % влажности.

Дальнейшим этапом эксперимента стала пропарка сырья в различных композициях. Смесь подвергалась воздействию насыщенного пара в течение определенного временного промежутка.

Следующий этап экспериментальной части заключался в формировании топливного брикета с различными композициями сырья из заранее подготовленной смеси на автоматизированном прессе под воздействием высокой температуры с заранее подготовленной и нагретой до 100 °С цилиндрической пресс-формой.

В качестве автоматизированного пресса был использован прибор Instron1121 (рис. 4).

Данная установка позволяет прессовать брикеты высокой плотности и с высокой силой сжатия. Помимо этого, можно определить упруго-релаксационные свойства смеси древесных полимерных компонентов и синтетических полимеров, а также параметры, обусловливающие экструдируемость смеси. Таким образом, возможно изучить влагопластичность древесного компонента и термопластичность синтетических полимеров.

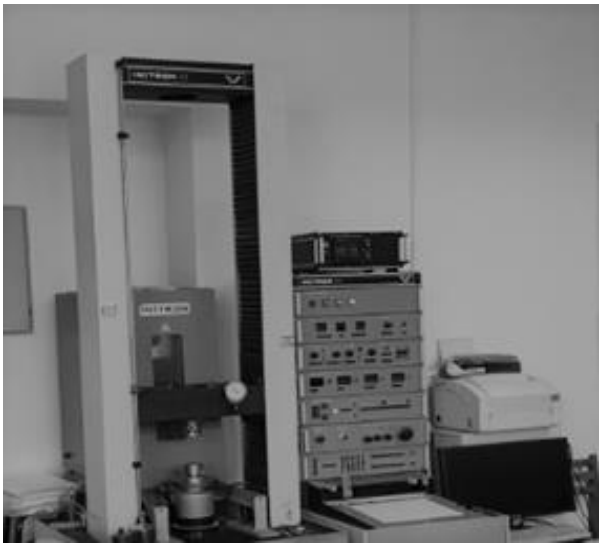


Рис. 4. Лабораторная установка Instron1121 для формирования брикета

Ход проведения опытов состоял из следующих этапов:

1. Полученная смесь в различных композициях сырья (0/100 %, 30/70 %, 50/50 %, 70/30 %, 100/0 %) засыпалась в подготовленную пресс-форму.

2. На установке Instron1121 производилось формирование брикета под давлением 26 МПа до установления стабилизации прямой на графике прибора.

3. С помощью термопары осуществлялся замер температуры пресс-формы в процессе прессования на установке Instron1121.

4. Производилось извлечение готового брикета из пресс-формы.

5. Измерялись конструктивные параметры брикета (диаметр и высота) для дальнейшего определения плотности полученного брикета до его полной релаксации и после (с промежутком в 3 дня).

6. Проводился анализ влияния температуры и влажности на упруго-релаксационные свойства брикета, которые связаны с переходом из одного релаксационного состояния в другое.

Зольность определялась по результатам технического анализа топлива путем прокаливания навески топлива ($m_т$ = 2 грамм) в муфельной печи при температуре 820 °С в течение 25 мин.

Определение теплоты сгорания топлива производилось при помощи специальной калориметрической установки, состоящей из калориметра и калориметрической бомбы (рис. 5).

В заключительный этап проведения исследования входили теплотехнические расчеты, которые включали в себя: расчет материального

процесса горения топлива; составление теплового баланса выбранной энергетической установки; тепловой расчет; аэродинамический расчет; расчет вредных выбросов в атмосферу.

Рис. 5. Лабораторная калориметрическая установка

Для дальнейшего эффективного сжигания полученного комбинированного брикета необходимо было выбрать оптимальную энергоустановку, позволяющую использовать данный вид топлива с максимальной экологической, энергетической и экономической эффективностью. В данном случае был выбран котлоагрегат БКЗ 210-140Ф с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева [11], установленный на Кировской ТЭЦ-4 в Санкт-Петербурге. Котел БКЗ-210-140Ф имеет следующие расчетные параметры: паропроизводительность D = 210 т/ч; давление перегретого пара $P_{пп}$ = 13,8 МПа; температура перегретого пара $t_{пп}$ = 570 °С (рис. 6).

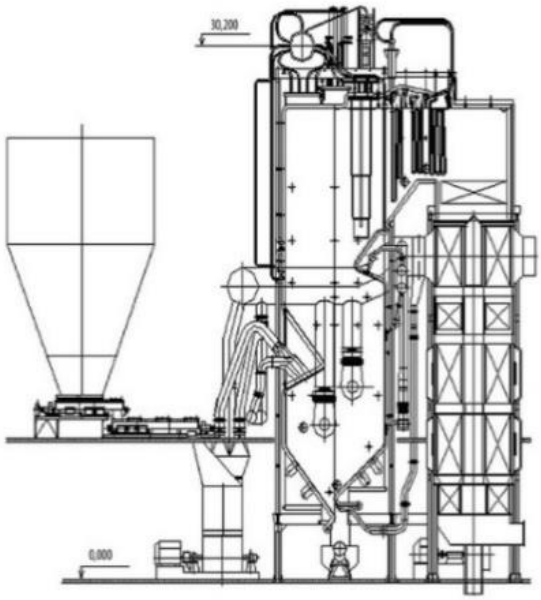


Рис. 6. Котел БКЗ-210-140Ф с низкотемпературной вихревой топкой

Способ низкотемпературного вихревого сжигания и топочное устройство были разработаны советским ученым-теплоэнергетиком В.В. Померанцевым [11].

В основу данной технологии заложен принцип организациинизкотемпературного сжигания груборазмолотого твердого топлива в условиях многократной циркуляции частиц в камерной топке [11, 12].

В низкотемпературной вихревой топке организованы две зоны горения: зона активного горения и зона догорания. В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания, где основная часть топлива (до 95 %) сгорает в первой зоне, которая занимает небольшой объем топочной камеры, в вихревой топке вовлечен значительно больший объем топочного пространства. Это приводит к снижению максимальной температуры в вихревой топке (примерно на 100–300 °С), и за счет активной аэродинамики выравнивается уровень температуры в объеме вихревой зоны. Как следствие, и название – низкотемпературный вихрь [12].

При этом горящий поток поднимается из холодной воронки вдоль фронтового экрана и зажигает факел непосредственно у корня. За счет такой аэродинамики повышается надежность воспламенения и устойчивость топочного процесса, расширяется диапазон регулирования. Область стока вихря смещена к заднему экрану, в ней при развороте потока происходит эффективная сепарация, способствующая многократной циркуляции топлива внутри топки.

Пониженный уровень температуры, ступенчатый ввод окислителя, многократная циркуляция частиц топлива и угрубление состава золы в общей сложности обеспечивают улучшенные показатели низкотемпературных вихревых топок по вредным выбросам оксидам азота и серы, а также улучшают эффективность работы золоулавливающего оборудования котлоагрегата [12].

Важным достоинством низкотемпературного вихревого сжигания (НТВ) является невысокая чувствительность к колебаниям характеристик топлива, которая унифицирует топку по топливу и делает возможным сжигание в одном агрегате различных видов твердого топлива.

НТВ технология сжигания прошла апробацию на широкой гамме твердых топлив, таких как бурые и каменные угли, торф, горючие сланцы, отходы деревообработки и микробиологического производства.

Результаты исследования. Результаты эксперимента представлены в табл. 1, 2.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что размер большей части полученных частиц ламинированной бумаги находился в пределах от 1000 до 500 мкм, размер фракций древесной муки находился в пределах 250–500 мкм.

Таблица 1. **Результаты проведения ситового анализа отходов ламинированной бумаги**

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R5000	6,5	1,3
R2000	7,5	1,5
R1000	39	7,8
R500	41	8,2
Остаток на поддоне	6	1,2
Сумма	100	20

Таблица 2. **Результаты проведения ситового анализа древесной муки лиственницы**

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R1000	0	0
R500	31,5	5,2
R250	41	8,2
R100	26	6,3
Остаток на поддоне	1,5	0,29
Сумма	100	20

Различный размер фракций древесной муки и отходов ламинированной бумаги не являлся негативным фактором для проведения эксперимента, наоборот, исходя из литературных данных, различные размеры композиционных материалов, в том числе и различные длины волокон, способствуют улучшению прочностных свойств получаемых композитов.

На следующем этапе эксперимента – пропарке сырья в различных композициях – экспериментальным путем была установлена зависимость повышения влажности смеси от времени пропарки (табл. 3).

В качестве оптимальной влажности для формирования брикета была выбрана влажность со значением 7,3 %. При данной влажности полученный образец имел гладкую форму, высокую прочность и плотность.

После проведения эксперимента по определению плотности, прочности и коэффициента сжатия комбинированных брикетов с различными композициями сырья при температуре 80 градусов и влажности 7,3 % были получены результаты, приведенные в табл. 4.

В результате проведения экспериментов были выявлены некоторые особенности поведения материалов при их различных композициях и под воздействием таких параметров, как влажность и температура, прежде всего – изменение релаксационных состояний. Была установлена возможность реализации в процессе экструзии свойств термовлагопластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров. При определенных условиях в процессе формирования брикета данные композиционные материалы, в частности синтетические полимеры, входящие в состав отходов ламинированной бумаги, переходили из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое и впоследствии возвращались в исходное стеклообразное состояние, через определенный промежуток времени достигнув температуры стеклования.

Таблица 3. **Зависимость изменения влажности от времени пропарки сырья**

№ образца	Время пропаривания, с	Влажность, %
1	10	5,1
2	15	7,3
3	20	10,8
4	30	12,6

Таблица 4. **Результаты эксперимента по определению плотности и прочности брикетов**

Композиция сырья (ламинированная бумага / древесина), %	Среднее значение влажности полученного брикета после релаксации, %	Высота брикета после релаксации, мм	Диаметр брикета после релаксации, мм	Среднее значение плотности брикета после релаксации, кг/м^3	Коэффициент сжатия	Прочность на сжатие, МПа
0 / 100	5,5	12,8	14,5	948	3,6	2
30 / 70	4,4	11,8	14,3	1010	–	4
50 / 50	3,7	11,5	14,2	1036	2,6	4,5
70 / 30	3	11,4	14,3	1048	–	2,5
100 / 0	2,2	10,4	14,1	1063	1,9	2

Этот фактор влечет за собой повышенную плотность готового продукта. В то же время достаточный процент влажности в силу гидрофильности древесных компонентов позволял брикету сохранять свою форму. Именно по этой причине решение об использовании отходов ламинированной бумаги в качестве дополнительного к древесине композиционного материала явилось оправданным.

В результате анализа различных вариантов значений влажности и температур в процессе проведения экспериментов была выявлена оптимальная композиция смеси – 50/50 %, при которой полученный брикет способен держать форму и иметь статичные габаритные размеры, не уступая в плотности и прочности остальным опытным образцам.

От соотношения отходов производства ламинированной бумаги и древесной муки зависела также и низшая теплота сгорания топлива, что является наиболее значимым фактором с энергетической точки зрения. Также немаловажна и экологическая составляющая, так как в отходах ламинированной бумаги присутствуют синтетические полимеры, которые влияют на состояние окружающей среды в процессе дальнейшего сжигания. Помимо этого, при термической обработке отходов, содержащих синтетические полимеры, возможны усиленные загрязнения поверхностей нагрева используемого энергетического оборудования из-за плавления полиэтилена. По этой причине использование отходов данного вида в слишком большой концентрации может крайне негативно отразиться на функционировании оборудования в целом.

В результате получена и определена оптимальная по всем параметрам композиция топливного брикета – 50/50 %, для которой была определена зольность и низшая теплота сгорания в калориметрической установке. Состав полученного топливного брикета в композиции 50/50 % соотношений исходного сырья представлен в табл. 5.

Теплота сгорания топливного брикета в соотношении отходов ламинированной бумаги и древесной муки опилок лиственницы в соотношении 50/50 %, по результатам проведенных опытов, представлена в табл. 6.

Выводы. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали влияние изменения релаксационных состояний композиционных материалов при определенных условиях на физико-химические параметры полученного комбинированного топливного брикета – термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности древесных полимерных компонентов.

Разработанная инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума экологический ущерб и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность промышленных предприятий.

Использование полученного нового топлива и технологии его производства и последующего сжигания в НТВ-топке даст возможность снизить нагрузку на полигоны с до сих пор не утилизируемыми отходами, использовать полученную энергию топлива на собственные нужды, упростить очистку дымовых газов благодаря использованию технологии низкотемпературного вихревого сжигания.

Полученный комбинированный топливный брикет обладает высоким для своей компоновки показателем низшей теплоты сгорания топлива, равным 19 МДж/кг, что, несомненно, позволяет использовать его в промышленных и бытовых целях с высокой энергетической эффективностью.

Таблица 5. **Элементный состав полученного топливного брикета с композицией сырья 50/50 %**

Композиция брикета	Углерод C, %	Водород H, %	Азот N, %	Кислород O, %	Зольность A, %	Влажность W, %
Комбинированный брикет 50/50 %	50	6,6	0,5	39	0,2	3,7

Таблица 6. **Теплота сгорания комбинированного топливного брикета 50/50 %**

№ образца	Масса проволоки, кг * 10^6	Масса топлива, кг * 10^5	Температура начальная, ºС	Температура конечная, ºС	Теплота сгорания по бомбе, кДж/кг	Высшая теплота сгорания, кДж/кг	Низшая теплота сгорания, кДж/кг
1	53	91	2,5	3,9	25189	21564	19499
2	45	126	3,8	5,1	25796	21832	20157
3	50	116	0,4	1,9	24657	20114	17970
4	40	87	1,25	2,7	23115	21488	19803
5	46	61	2,1	3,2	24485	20322	18001

Также данное топливо является абсолютно безопасным с точки зрения выбросов дымовых газов в атмосферу при его сжигании, так как входящие в его состав синтетические полимеры не содержат хлора, что означает отсутствие возможности образования хлористых диоксинов [13], которые являются главной причиной невозможности утилизации пластиковых отходов. Полученный комбинированный брикет обладает относительно высокой плотностью 1036 кг/м^3 и является прочным композитом, имеющим прочность сжатия 4,5 МПа на поперечное сечение.

Проведенное исследование, полученные экспериментальные данные и образцы целесообразно использовать в качестве основополагающих для внедрения данной технологии в производство.

Список литературы

1. **Умнов В.А., Коробова О.С., Скрябина А.А.** Углеродный след как индикатор воздействия экономики на климатическую систему **//** Вестник РГГУ. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2020. – № 2. – С. 85–93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.

2. **Improved** yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin / A. Bengtsson, J. Bengtsson, C. Olsson, et al. // Holzforschung. – 2018. – Vol. 72. – P. 1007–1016.

3. **Вирт А. Дэвид.** Глобальное управление в сфере изменения климата. Парижское соглашение: новый компонент климатического режима ООН // Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика. – 2017. – № 12(4). – С. 185–214.

4. **Akim E.L., Mandre Yu.G., Pekarets A.A.** Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining // Khimicheskie volokna. – 2019. – No. 3. – P. 14–18.

5. **Energy,** land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm / Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, et al. // Global Environmental Change. – 2017. – Vol. 42. – P. 237–250.

6. **Совместная** переработка отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры, и твердых древесных отходов, входящих в состав топливного брикета / В.А. Рыжиков, Э.Л. Аким, О.А. Ерохина, А.А. Пекарец // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – Архангельск, 2023. – С. 65–69.

7. **Упруго-релаксационные** свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов / А.А. Пекарец, О.А. Ерохина, В.В. Новожилов и др. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 1(373). – С. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. – EDN WVFHPC.

8. **Hansen E., Panwar R., Vlosky R.** The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects. – NY: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. – P. 462.

9. **Forest** Products Annual Market Review 2021–2022. – UNECE. – 70 p.; Forest Products Annual Market Review 2019–2020 – Forestry and Timber. – UNECE. – 82 p.

10. **Ежегодный** обзор рынка лесных товаров, 2018–2019 годы. – Женева: ЕЭК ООН, 2020. – 173 с.

11. **Померанцев В.В.** Топки скоростного горения для древесного топлива / М-во тяжелого машиностроения СССР; Главкотлотурбопром.; Центр. науч.-исслед. ин-т им. И.И. Ползунова. – М.; Л.: Ленингр. отд-ние Машгиза, 1948 (Л.: тип. «Профинтерн»). – 74 с.

12. **Тринченко А.А., Парамонов А.П.** Внедрение низкотемпературного вихревого сжигания для энергетического использования каменных углей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – № 4(231).

13. **Румак В.С., Умнова Н.В.** Диоксины и безопасность биосистем: результаты натурных исследований // Жизнь Земли. – 2018. – Т. 40, № 3. – С. 308–320.

References

1. Umnov, V.A., Korobova, O.S., Skryabina, A.A. Uglerodnyy sled kak indikator vozdeystviya ekonomiki na klimaticheskuyu sistemu [Carbon footprint as an indicator of the impact of the economy on the climate system]. *Vestnik RGGU. Seriya «Ekonomika. Upravlenie. Pravo»*, 2020, no. 2, pp. 85–93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.

2. Bengtsson, A., Bengtsson, J., Olsson, C., Sedin, M., Jedvert, K., Theliander, H., Sjoholm, E. Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung*, 2018, vol. 72, pp. 1007–1016.

3. Virt, A. Devid. Global'noe upravlenie v sfere izmeneniya klimata Parizhskoe soglashenie: novyy komponent klimaticheskogo rezhima OON [Global governance on climate change Paris Agreement: a new component of the UN climate regime]. *Vestnik mezhdunarodnykh organizatsiy: obrazovanie, nauka, novaya ekonomika*, 2017, no. 12(4), pp. 185–214.

4. Akim, E.L., Mandre, Yu.G., Pekarets, A.A. Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining. *Khimicheskie volokna*, 2019, no. 3, pp. 14–18.

5. Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis, Andrzej Tabeau. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global Environmental Change*, 2017, vol. 42, pp. 237–250.

6. Ryzhikov, V.A., Akim, E.L., Erokhina, O.A., Pekarets, A.A. Sovmestnaya pererabotka otkhodov kartonno-bumazhnoy makulatury, soderzhashchikh tsellyulozu i sinteticheskie polimery, i tverdykh drevesnykh otkhodov, vkhodyashchikh v sostav toplivnogo briketa [Joint processing of waste cardboard and paper waste containing cellulose and synthetic polymers and solid wood waste, which is part of the fuel briquette]. *Materialy*

VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni professora V.I. Komarova «Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov», Arkhangel'sk, 14–16 sentyabrya 2023 g. [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V.I. Komarov “Problems of mechanics of cellulose and paper materials”, Arkhangelsk, September 14–16, 2023]. Arkhangel'sk, 2023, pp. 65–69.

7. Pekarets, A.A., Erokhina, O.A., Novozhilov, V.V., Mandre, Yu.G., Akim, E.L. Uprugo-relaksatsionnye svoystva drevesiny listvennitsy i ikh rol' pri poluchenii drevesnykh i drevesno-ugol'nykh briketov [Elastic-relaxation properties of larch wood and their role in obtaining wood and charcoal briquettes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2020, no. 1(373), pp. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. EDN WVFHPC.

8. Hansen, E., Panwar, R., Vlosky, R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects. NY: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. P. 462.

9. Forest Products Annual Market Review 2021–2022, UNECE, 70 p.; Forest Products Annual Market Review 2019–2020 – Forestry and Timber, UNECE, 82 p.

10. *Ezhegodnyy obzor rynka lesnykh tovarov, 2018–2019 gody* [Annual Forest Products Market Review, 2018–2019]. Geneva: UNECE, 2020. 173 p.

11. Pomerantsev, V.V. *Topki skorostnogo goreniya dlya drevesnogo topliva* [Furnaces of high-speed combustion for wood fuel]. Moscow; Leningrad: Leningradskoe otdelenie Mashgiza, 1948. 74 c.

12. Trinchenko, A.A., Paramonov, A.P. Vnedrenie nizkotemperaturnogo vikhrevogo szhiganiya dlya energeticheskogo ispol'zovaniya kamennykh ugley [Implementation of low-temperature vortex combustion for power utilization of hard coal]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 4(231).

13. Rumak, V.S., Umnova, N.V. Dioksiny i bezopasnost' biosistem: rezul'taty naturnykh issledovaniy [Dioxins and the safety of biosystems: results of field studies]. *Zhizn' Zemli*, 2018, vol. 40, no. 3, pp. 308–320.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Владимир Александрович Шуин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vshuin@mail.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Наталия Владимировна Кузьмина
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Константин Сергеевич Алёшин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: alyoshin@rza.ru

Многопараметрическая токовая защита от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью

Авторское резюме

Состояние вопроса. В распределительных сетях напряжением 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, для защиты от однофазных замыканий на землю преимущественно применяются токовые защиты, основанные на контроле составляющей основной частоты тока нулевой последовательности. На селективность и устойчивость функционирования таких защит существенное влияние оказывают интенсивные переходные процессы при дуговых перемежающихся однофазных замыканиях на землю. Одним из перспективных направлений совершенствования токовых защит от однофазных замыканий на землю является повышение селективности и устойчивости их функционирования на основе распознавания разновидностей замыканий на землю с применением многопараметрического подхода к выполнению релейной защиты.
Материалы и методы. Для разработки и исследования методов и алгоритмов распознавания разновидностей замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и оценки эффективности их применения в целях повышения селективности и устойчивости функционирования токовых защит от однофазных замыканий на землю использовано имитационное моделирование в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. Конфигурация и параметры имитационных моделей выбраны с учетом основных особенностей распределительных кабельных и воздушных сетей напряжением 6–10 кВ систем промышленного, городского и сельскохозяйственного электроснабжения, определяющих характеристики установившихся и переходных режимов при однофазных замыканиях на землю.
Результаты. Разработаны принципы выполнения и схема многопараметрической токовой защиты от однофазных замыканий на землю для сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью, обеспечивающей распознавание всех учитываемых разновидностей замыканий на землю (устойчивых, дуговых перемежающихся и неопасных для сети дуговых прерывистых) и возможность автоматического выбора на этой основе наиболее эффективного способа ее действия (сигнал или отключение). Результатами функциональных испытаний на имитационных моделях подтверждена эффективность разработанных алгоритмов функционирования многопараметрической токовой защиты при всех учитываемых видах однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью.

© Шуин В.А., Шадрикова Т.Ю., Кузьмина Н.В., Алёшин К.С., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 39–46.

Выводы. Разработанное техническое решение реализует многопараметрическую токовую защиту от однофазных замыканий на землю, обеспечивающую повышение селективности и устойчивости функционирования при всех видах замыканий на землю по сравнению с традиционными исполнениями токовых защит от данного вида повреждений, непрерывность действия не только при устойчивых, но и при наиболее опасных дуговых перемежающихся замыканиях на землю, а также возможность выбора способа действия защиты при данных разновидностях замыканий на землю.

Ключевые слова: кабельные сети, воздушные сети напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, защита от замыканий на землю, селективность, устойчивость функционирования токовой защиты

Vladimir Alexandrovich Shuin
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vshuin@mail.ru

Tatyana Yurievna Shadrikova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Nataliya Vladimirovna Kuzmina
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Konstantin Sergeevich Alyoshin
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alyoshin@rza.ru

Multiparameter current protection against earth faults in 6–10 kV networks with isolated neutral

Abstract

Background. In distribution networks with a voltage of 6–10 kV operating with an isolated neutral, current protections based on monitoring the fundamental frequency component of the zero-sequence current are used for protection against single-phase earth faults (SPEF). The selectivity and stability of such protections are significantly affected by intense transient processes during arc intermittent SPEF. One of the promising areas to improve current protection against SPEF is to increase the selectivity and stability of their operation based on recognizing the types of earth faults using a multiparameter approach to implementing relay protection.
Materials and methods. To develop and study methods and algorithms to recognize types of earth faults in 6–10 kV networks with isolated neutral and to evaluate the efficiency of their application to improve the selectivity and stability of current protection against single-phase earth faults, simulation modeling in Matlab, SimPowerSystems and Simulink has been used. The configuration and parameters of the simulation models consider the key features of distribution cable and overhead networks with a voltage of 6–10 kV of industrial, urban, and agricultural power supply systems, determining the characteristics of steady-state and transient modes during single-phase earth faults.
Results. The principles of implementation and the scheme of multiparameter current protection against single-phase earth faults for 6–10 kV networks with isolated neutral have been developed. They ensure recognition of all considered types of earth faults (stable, arc intermittent faults and non-hazardous for the network arc faults) and the possibility of automatic selection of the most effective method of its operation (signal or trip action). Functional tests on simulation models have confirmed the efficiency of the developed algorithms of operation of multiparameter current protection for all considered types of single-phase earth faults in 6–10 kV networks with isolated neutral.
Conclusions. The developed technical solution implements multiparameter current protection against earth faults ensuring increased selectivity and stability of operation for all types of earth faults compared to traditional designs of current protection against this type of damage, continuity of operation not only for stable, but also for the most dangerous arc intermittent earth faults, as well as the ability to select the method of protection for these types of earth faults.

Key words: cable networks, overhead networks with a voltage of 6–10 kV with isolated neutral, single-phase earth faults, earth fault protection, selectivity, stability of current protection operation

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.039-046

Введение. В системах электроснабжения городов, промышленных предприятий и объектов сельской местности большая часть электрической энергии распределяется потребителям через кабельные и воздушные сети напряжением 6–10 кВ. В настоящее время примерно 80 % кабельных сетей и практически все воздушные сети напряжением 6–10 кВ работают с

изолированной нейтралью. В таких сетях однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом [1–5]. Чем быстрее ликвидируется повреждение, тем меньше вероятность аварийных отключений кабельных и воздушных линий (КЛ и ВЛ) вследствие перехода ОЗЗ в многофазное короткое замыкание (КЗ). Надежность электроснабжения потребителей во многом зависит от эффективности функционирования устройств защиты от ОЗЗ, обеспечивающих быстрое селективное определение поврежденного присоединения, участка или элемента защищаемой сети.

В распределительных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, наиболее широкое применение получили токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), основанные на контроле значений полных токов нулевой последовательности $3I_0$ защищаемого присоединения или их составляющих основной частоты $3I_{0(50)}$ [6–9]. На эффективность функционирования традиционных исполнений ТЗНП существенное влияние оказывают интенсивные переходные процессы при дуговых перемежающихся ОЗЗ, ограничивающие их селективность и устойчивость функционирования (техническое совершенство (ТС) [6]) и, соответственно, область возможного применения.

Более высокое ТС обеспечивают защиты с двумя подведенными величинами, например токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТНЗНП [6, 8–10]), однако их недостатком является меньшая надежность функционирования по сравнению с ТЗНП из-за возможных в реальных условиях эксплуатации нарушений в цепях напряжения, а также ограничения области их применения только объектами, оборудованными трансформаторами напряжения для измерения напряжения нулевой последовательности. В связи с этим ТНЗНП применяются только в тех случаях, когда использование более простых и надежных токовых защит не позволяет обеспечить селективность или требуемую чувствительность.

Одним из перспективных направлений совершенствования ТЗНП является повышение их ТС на основе распознавания устойчивых и всех разновидностей дуговых ОЗЗ с применением принципа выполнения релейной защиты, получившего название многопараметрического [11]. Применение данного принципа означает расширение информационной базы ТЗНП за счет использования в целях распознавания вида повреждения и поврежденного присоединения не одного параметра тока нулевой последовательности $3i_0$ защищаемого присоединения (например, среднеквадратичного значения полного тока $3I_0$ или его составляющей основной частоты 50 Гц $3I_{0(50)}$), а двух или более параметров. К таким дополнительным параметрам относятся, например, общий уровень высших гармоник $3I_{0(ВГ)}$ в токе $3i_0$, а при дуговых прерывистых замыканиях – величина интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги, определяющие степень опасности дуговых ОЗЗ [12]. Распознавание всех разновидностей ОЗЗ может быть использовано для управления уставкой по току срабатывания и выбора наиболее эффективного способа действия защиты (на сигнал или на отключение).

Разновидности ОЗЗ, учитываемые при выполнении многопараметрической токовой защиты, и критерии их распознавания. По требованиям СТО ПАО «ФСК ЕЭС»[1], защита в сетях с изолированной нейтралью, а также в сетях с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор или резистор должна быть чувствительна к устойчивым и дуговым ОЗЗ (УЗЗ и ДЗЗ). Наиболее опасной разновидностью ДЗЗ в сетях с изолированной нейтралью являются так называемые дуговые перемежающиеся ОЗЗ (ДПЗЗ), сопровождающиеся опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах сети и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения по сравнению с УЗЗ. В сетях 6–10 кВ, прежде всего кабельных, при ДПЗЗ во многих случаях целесообразно действие защиты от ОЗЗ на отключение, а не на сигнал [13]. Характерным признаком ДПЗЗ является эскалация напряжения на поврежденной фазе, бросков переходных токов и перенапряжений при повторных зажиганиях заземляющей дуги (рис. 1,а). Опасными для распределительных сетей 6–10 кВ считаются перенапряжения с кратностью $K_п = U_{п.макс}/U_{т\ ф.ном} > 2{,}6–2{,}7$ [14]. На основе исследований на имитационных моделях показано, что в сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью кратность дуговых перенапряжений достигает опасных значений $K_п = 2{,}7$ и более, если интервалы времени Δt между повторными пробоями изоляции не превышают ~3-х периодов промышленной частоты (~60 мс).

При $\Delta t >$ ~60 мс эскалация перенапряжений при повторных зажиганиях дуги практически отсутствует, а их кратность не превышает опасных для изоляции элементов сети значений $K_п = 2{,}7$. Такие ОЗЗ, в отличие от ДПЗЗ, могут быть названы дуговыми прерывистыми (ДПрЗЗ) (рис. 1,б). Таким образом, в качестве критерия распознавания наиболее опасных для защищаемой сети ДПЗЗ и не представляющих особой опасности ДПрЗЗ в токовой многопараметрической защите может быть использована длительность интервалов Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги.

[1] Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА / СТО 56947007- 29.120.70.241-2017, дата введения: 28.02.2017.

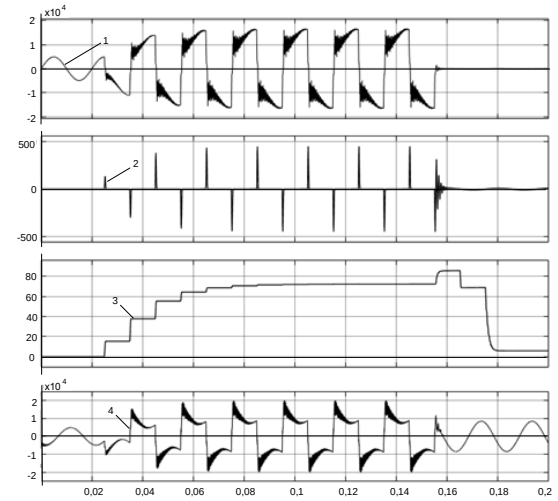
В качестве критерия распознавания УЗЗ (рис. 1,в) и ДЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ) в многопараметрической защите используется соотношение суммарного уровня высших гармонических составляющих (ВГ) и составляющей основной частоты в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения $3I_{0(ВГ)}/3I_{0(50)}$. В [12] на основе данных, полученных на имитационных моделях сетей 6–10 кВ, показано, что при УЗЗ максимальные значения отношения $3I_{0(ВГ)}/3I_{0(50}$ не превышают 0,5–0,55. При дуговых ОЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ) относительный уровень ВГ в токе ОЗЗ в сетях 6–10 кВ возрастает в 5 и более раз, что обеспечивает надежное распознавание УЗЗ и ДЗЗ.

Рис. 1 иллюстрирует основные особенности распознаваемых защитой разновидностей ОЗЗ.

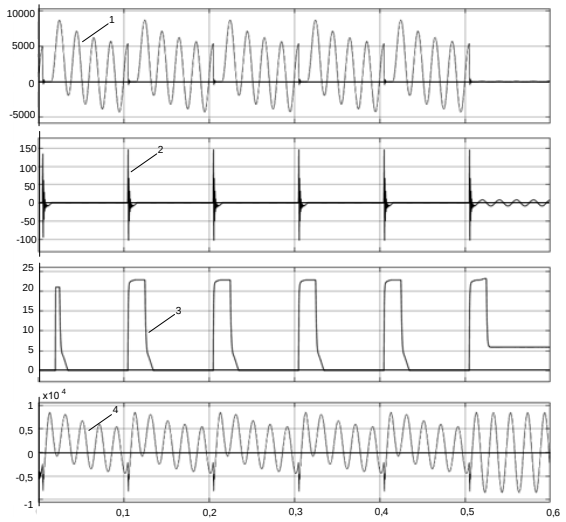
Степень разработанности направления исследований. Разработки многопараметрических ТЗНП ведутся в ИГЭУ с 2014 г. в сотрудничестве с НПП «ЭКРА». Разработанные в указанный период технические решения реализуют двухпараметрический и многопараметрический принципы выполнения ТЗНП для сетей 6–10 кВ [12, 15, 16].

Двухпараметрический принцип выполнения ТЗНП основан на измерении составляющей основной частоты $3I_{0(50)}$ и суммарного уровня высших гармонических составляющих $3I_{0(ВГ)}$ в токе $3i_0$ защищаемого присоединения, на сравнении составляющих $3I_{0(50)}$ и $3I_{0(ВГ)}$ и автоматическом уменьшении уставки по току срабатывания защиты $I_{уст}$ при $3I_{0(50)} > 3I_{0(ВГ)}$ для повышения ее чувствительности при УЗЗ [15]. Основными недостатками двухпараметрической токовой защиты являются: не всегда достаточная чувствительность при ДПЗЗ и тем более при ДПрЗЗ; отсутствие распознавания разновидностей дуговых ОЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ), что не позволяет обеспечить повышение чувствительности при ДПрЗЗ; отсутствие непрерывности действия, обусловливающее дребезг контактов измерительного органа тока при наиболее опасных дуговых перемежающихся замыканиях и снижение надежности функционирования защиты при выполнении ее с действием на отключение.

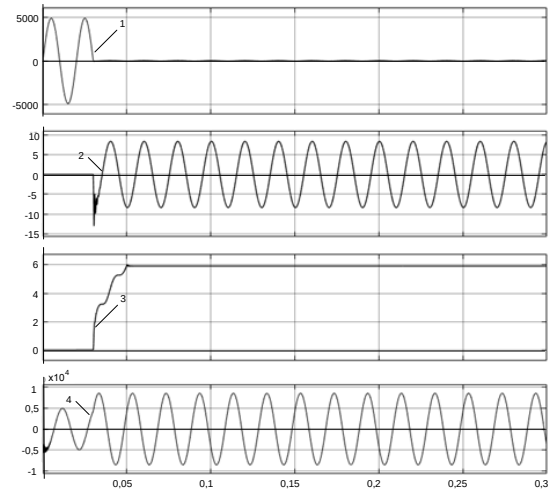
Принцип действия многопараметрической ТЗНП основан на контроле значения составляющей основной частоты $3I_{0(50)}$ и суммарного уровня высших гармонических составляющих $3I_{0(ВГ)}$ в токе $3i_0$ при устойчивых и дуговых ОЗЗ, а также величины интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции при ДПЗЗ и ДПрЗЗ [16]. Основным недостатком данного устройства многопараметрической токовой защиты является неполнота распознавания разновидностей дуговых ОЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ), что ограничивает ее селективность и чувствительность при указанных видах замыканий.



а)



б)



в)

Рис. 1. Классификация разновидностей ОЗЗ, учитываемых при выполнении многопараметрической токовой защиты от данного вида повреждений: а – ДПЗЗ; б – ДПрЗЗ; в – УЗЗ; 1 – напряжение на поврежденной фазе; 2 – ток ОЗЗ $3i_0$; 3 – среднеквадратичное значение тока ОЗЗ $3I_0$; 4 – напряжение на неповрежденной фазе

Методы исследования. Наиболее эффективным методом анализа сложных динамических режимов функционирования устройств релейной защиты является математическое имитационное моделирование. Для анализа селективности и устойчивости алгоритмов многопараметрической токовой защиты от ОЗЗ и проведения ее функциональных испытаний использовалась комплексная имитационная модель «сеть 6–10 кВ – устройство защиты», реализованная в SimPowerSystems и Simulink. Конфигурация и параметры модели учитывали основные особенности кабельных и воздушных сетей напряжением 6–10 кВ в системах электроснабжения промышленного, городского и сельскохозяйственного назначения.

Общая структурная схема многопараметрической токовой защиты. На рис. 2 приведена структурно-функциональная схема трехступенчатой многопараметрической ТЗНП, обеспечивающей распознавание УЗЗ, ДПЗЗ и ДПрЗЗ в целях повышения селективности и устойчивости функционирования и возможности применения различных способов действия защиты при разных видах ОЗЗ.

Схема на рис. 2 включает 4 основных функциональных блока: блок формирования сравниваемых величин, блок распознавания разновидностей ОЗЗ, измерительный блок и блок логики формирования выходных сигналов.

Блок формирования сравниваемых величин включает в себя вторичный преобразователь тока (TLA), фильтр низших частот (ZF1), обеспечивающий подавление гармонических составляющих с частотами f > 1,5–2 кГц, блок вычисления среднеквадратичного значения $3I_0$ входного тока нулевой последовательности на интервале времени усреднения $T_{ус.1} = 3T_{50}$ = 60 мс (RMS), первый и второй блоки преобразования Фурье (FFT1 и FFT2), обеспечивающие вычисление среднеквадратичного значения составляющей основной частоты $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$ соответственно на интервале времени усреднения $T_{ус.1} = 3T_{50}$ = 60 мс и $T_{ус.2} = T_{50}$ = 20 мс, и преобразователь F для вычисления суммарного уровня ВГ $3I_{0(ВГ)}$ в токе $3i_0$ по выражению

$$3I_{0\,(ВГ)} = \sqrt{(3I_0)^2 - (3I_{0\,(50)})^2}. \qquad (1)$$

Принятый в блоках RMS и FFT1 интервал времени усреднения $T_{ус}$ = 60 мс при вычислении среднеквадратичных значений $3I_0$, $3I_{0(50)}$ и $3I_{0(ВГ)}$ составляющих тока $3i_0$ обеспечивает непрерывность действия защиты при ДПЗЗ ($\Delta t \le 60$ мс).

Блок распознавания разновидностей ОЗЗ включает схему сравнения значений $3I_{0(ВГ)}$ и $3I_{0(50)}$ с двумя выходами (СМР), элемент логического умножения (AND1) и логический элемент задержки на включение (DT).

Как уже отмечалось выше, в качестве критерия распознавания УЗЗ и ДЗЗ (ДПЗЗ и ДПрЗЗ) в защите используется соотношение $3I_{0(ВГ)}$ и $3I_{0(50)}$. При дуговых замыканиях $3I_{0(ВГ)} > 3I_{0(50)}$ и на выходе 1 схемы сравнения СМР появляется логический сигнал «1», а на выходе 2 СМР – логический сигнал «0». При устойчивых ОЗЗ $3I_{0(50)} > 3I_{0(ВГ)}$ и на выходах СМР логические сигналы меняют свои значения на противоположные. Элемент задержки на включение DT ($T_з$ = 60 мс) обеспечивает «расфильтровку» дуговых перемежающихся ($\Delta t \le 60$ мс) и дуговых прерывистых ($\Delta t > 60$ мс) ОЗЗ. Таким образом, логические состояния выходов 1–3 блока распознавания в зависимости от вида ОЗЗ определяется табл. 1.

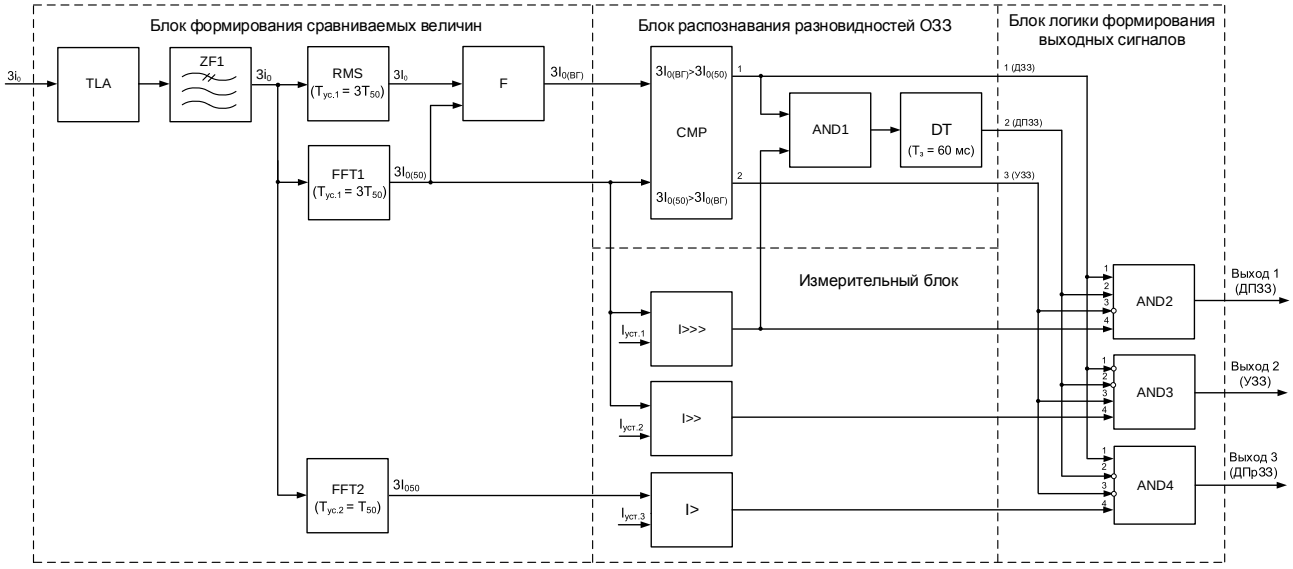


Рис. 2. Структурно-функциональная схема многопараметрической токовой защиты с распознаванием всех разновидностей ОЗЗ

Таблица 1. **Состояния выходов блока распознавания при различных видах ОЗЗ**

Вид ОЗЗ	Состояние выходов		
	выход 1	выход 2	выход 3
ДПр3З	1	0	0
ДП3З	1	1	0
У3З	0	0	1

Измерительный блок содержит три измерительных органа тока (ИОТ): I ступени I>>>; II ступени I>>; III ступени I>. ИОТ I ступени предназначен для действия при ДП3З, II ступени – при У3З, III ступени – при ДПр3З. Отметим, что при достаточной чувствительности ИОТ III ступени может фиксировать также однократные пробои изоляции (так называемые кратковременные самоустраняющиеся О3З – Кр3З). В ИОТ I ступени и ИОТ II ступени в качестве воздействующей величины используется среднеквадратичное значение $3I_{0(50)}$, измеренное на интервале времени $T_{ус.1} = 3T_{50} = 60$ мс (блок FFT1), в ИОТ III ступени в целях повышения ее быстродействия и чувствительности – значение $3I_{0(50)}$, измеренное на интервале времени $T_{ус.1} = T_{50} = 20$ мс (блок FFT2).

При недостаточной чувствительности I ступени сигнал на выходе 2 блока распознавания, соответствующий ДП3З, будет «0». Анализ состояний выходов блока распознавания (табл. 1) показывает, что в этом случае отказа защиты не происходит, а замыкание будет зафиксировано как ДПр3З.

Блок логики на основе входных сигналов, полученных от блока распознавания и измерительного блока, формирует выходные сигналы, соответствующие виду О3З. При ДП3З выходной сигнал «1» появляется только на первом выходе защиты, при У3З – только на втором выходе, при ДПр3З – только на третьем выходе.

Методика выбора уставок ступеней по току срабатывания. Все три ступени многопараметрической токовой защиты представляют собой максимальную ТЗНП, уставка по току срабатывания $I_{уст}$ которой выбирается из условия отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{с\,собс}$ при внешних О3З по выражению [3–5 и др.]

$$I_{уст} \geq K_{отс} K_{бр} I_{с\,собс}, \qquad (2)$$

где $K_{отс} = 1{,}2–1{,}3$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерительного органа тока и расчета значения $I_{с\,собс}$; $K_{бр}$ – коэффициент броска, учитывающий увеличение воздействующей величины в переходных режимах при дуговых О3З.

Значение коэффициента $K_{бр}$ зависит от вида воздействующей величины, используемой в измерительных органах тока защиты. В цифровых исполнениях ТЗНП в качестве воздействующей величины, как правило, используется среднеквадратичное значение составляющей основной частоты $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$.

Первая ступень рассматриваемой защиты предназначена для действия при ДП3З, поэтому при выборе уставки $I_{уст.1}$ по (2) в значении $K_{бр}$ должно учитываться влияние эскалации бросков переходного тока при повторных зажиганиях заземляющей дуги. С учетом этого для первой ступени, как и для традиционных ТЗНП, основанных на использовании составляющей $3I_{0(50)}$, рекомендуется принимать в (2) $K_{бр.1} = 2{,}5–3$ [3, 5].

Вторая ступень предназначена для действия только при У3З и блокируется при всех дуговых замыканиях, поэтому при выборе уставки $I_{уст.2}$ можно принять $K_{бр.2} = 1$.

Третья ступень предназначена для действия при ДПр3З, включая Кр3З. В отличие от первой и второй ступеней, для повышения быстродействия и чувствительности в третьей ступени в качестве воздействующей величины используется среднеквадратичное значение составляющей основной частоты $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$, измеренное на интервале времени усреднения $T_{ус} = T_{50} = 20$ мс. При повторных зажиганиях заземляющей дуги через интервалы времени $\Delta t >$ ~60 мс эскалация амплитуд бросков переходных токов практически отсутствует, что позволяет уменьшить значение $K_{бр}$ в (2) по сравнению с ДП3З. Вычислительные эксперименты на имитационных моделях кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ показали, что при ограничении рабочего диапазона ВГ устройства защиты верхней частотой $f_{раб} < 1{,}5–2$ кГц (рис. 2, фильтр ZF1) можно с некоторым запасом принять $K_{бр.3} \approx 1{,}5$. Отметим, что при указанном значении $K_{бр.3}$ обеспечивается также отстройка третьей ступени от бросков переходных токов $3i_0$, возникающих при коммутационных переключениях в сети (например, при включении защищаемого присоединения под напряжение).

Функциональные испытания многопараметрической токовой защиты при разных видах О3З на имитационных моделях кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ. Цель функциональных испытаний – проверка селективности и устойчивости функционирования основных функциональных блоков защиты при внутренних и внешних ДП3З, ДПр3З и У3З: блока распознавания разновидностей О3З; измерительного блока; блока логики формирования выходных сигналов. Для анализа селективности и устойчивости алгоритмов основных функциональных блоков многопараметрической токовой защиты от О3З использовалась комплексная имитационная модель, реализованная в SimPowerSystems и Simulink и включающая модель кабельной или воздушной сети напряжением 6–10 кВ и модель устройства защиты, реализующую структурно-функциональную схему (рис. 2). Функциональные испытания защиты выполнялись при ДП3З и ДПр3З, смоделированным в соответствии с теориями W. Petersen'a и J.F. Peters, J. Slepian [17, 18]. При всех видах внутренних и внешних О3З, как металлических, так и через переходное сопротивление, блок распоз-

навания разновидностей ОЗЗ, измерительный блок и блок логики обеспечивали распознавание вида ОЗЗ, селективность и устойчивость функционирования разработанных алгоритмов многопараметрической защиты от данного вида повреждений.

На рис. 3 в качестве примера приведены осциллограммы электрических величин и выходных сигналов, иллюстрирующие функционирование основных блоков защиты при внутреннем сложном виде ОЗЗ, начинающегося со стадии ДПр3З, переходящего затем в стадии ДП3З и У3З.

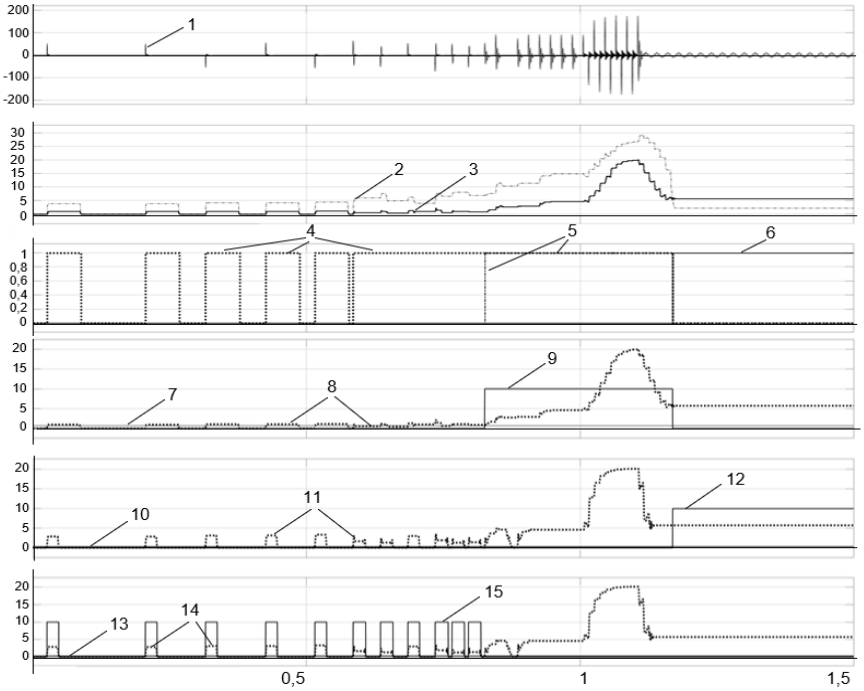


Рис. 3. Осциллограммы, иллюстрирующие работу многопараметрической токовой защиты при внутреннем ДПрРЗЗ, переходящем в ДП3З и У3З: 1 – ток $3i_0$ на входе защиты; 2 и 3 – среднеквадратичные значения составляющих $3I_{0(ВГ)}$ и $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$; 4, 5 и 6 – соответственно зоны ДПр3З, ДП3З и У3З, определенные блоком распознавания разновидностей замыканий на землю; 7, 8 и 9 – среднеквадратичные значения токов уставки $I_{уст.1}$, составляющей $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал «ДП3З» первой ступени защиты; 10, 11 и 12 – среднеквадратичные значения токов уставки $I_{уст.2}$, составляющей $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал «У3З» второй ступени защиты; 13, 14 и 15 – среднеквадратичные значения токов уставки $I_{уст.3}$, составляющей $3I_{0(50)}$ тока $3i_0$ и выходной сигнал «ДПр3З» третьей ступени защиты

Результаты. Разработаны принципы выполнения и схема многопараметрической токовой защиты от ОЗЗ для сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью, обеспечивающие распознавание всех разновидностей данного вида повреждений, непрерывность действия не только при устойчивых, но и при наиболее опасных для защищаемой сети дуговых перемежающихся замыканиях на землю, а также возможность выбора при каждой разновидности ОЗЗ эффективного способа действия (сигнал или отключение). Функциональные испытания на имитационных моделях подтвердили эффективность функционирования многопараметрической токовой защиты при всех учитываемых видах ОЗЗ в кабельных и воздушных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью.

Выводы. Разработанное техническое решение обеспечивает новые свойства защиты от ОЗЗ, заключающиеся в возможности распознавания опасных и неопасных для защищаемой сети видов замыканий на землю и повышения на этой основе селективности и устойчивости функционирования по сравнению с традиционными исполнениями токовых защит нулевой последовательности от данного вида повреждений.

Функциональные испытания разработанной защиты на имитационных моделях подтвердили перспективность применения многопараметрического подхода для совершенствования принципов выполнения защиты от ОЗЗ кабельных и воздушных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью.

Список литературы

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

2. **Цапенко Е.Ф.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. **Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н.** Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

4. **Кадомская К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А.** Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48–51.

5. **Шабад М.А.** Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ России // Энергетик. – 1999. – № 3. – С. 11–13.

6. **Федосеев А.М**. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.

7. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.

8. **Шалин А.И**. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33). http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.

9. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс». – 2001.

10. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения // Новости электротехники. – 2005. – № 6(36). http://www.news.elteh.ru/arh/2005/36/09.php.

11. **Нагай И.В., Нагай В.И.** Проблемы и решения дальнего резервирования трансформаторов ответвительных и промежуточных подстанций // Релейщик. – 2009. – № 4.

12. **Multiparameter** current protections against ground faults in 6–10 kV cable networks / A.N. Golubev, O.A. Dobryagina, T.Yu. Shadrikova, V.A. Shuin // Power Technology and Engineering. – 2018. – Vol. 51, No. 5.

13. **Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М.** Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.

14. **Защита** сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002.

15. **Пат.** РФ № 2629373 H02H3/16. Способ защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и устройство для его осуществления / В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова, О.А. Добрягина и др.; опубл. 29.08.2017, Бюл. 25.

16. **Пат.** РФ № 2629373 H02H3/16. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова, О.А. Добрягина и др.; опубл. 29.08.2017, Бюл. 25.

17. **Petersen W.** Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss // ETZ. – 1917. – H. 47, 48.

18. **Peters J.F., Slepian J.** Voltage Induced by Areign Grounds // Tr. AIEE. – 1928, Apr. – P. 478.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Groundfaults in networks with isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971.

2. Tsapenko, E.F. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV* [Ground faults in 6–35 kV networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1986.

3. Shutskiy, V.I., Zhidkov, V.O., Il'in, Yu.N. *Zashchitnoe shuntirovanie odnofaznykh povrezhdeniy elektroustanovok* [Protective shunting of single-phase faults in electrical installations]. Moscow: Energoatomizdat, 1988.

4. Kadomskaya, K.P. Kachesov, V.E., Lavrov, Yu.A. Diagnostika i monitoring kabel'nykh setey srednikh klassov napryazheniya [Diagnostics and monitoring of medium voltage cable networks]. *Elektrotekhnika*, 2000, no. 11, pp. 48–51.

5. Shabad, M.A. Obzor rezhimov zazemleniya neytrali i zashchity ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–35 kV Rossii [Review of neutral grounding modes and earth fault protection in 6–35 kV networks in Russia]. *Energetik*, 1999, no. 3, pp. 11–13.

6. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976.

7. Shabad, M.A. *Raschety releynoy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2003. 350 p.

8. Shalin, A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit [Earth faults in networks 6–35 kV. Advantages and disadvantages of various protections]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, vol. 3(33). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php

9. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Protection against groundfaults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: NTF «Energoprogress», 2001. 104 p.

10. Shalin, A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Napravlennye zashchity. Osobennosti primeneniya [Earth faults in networks 6–35 kV. Directional protection. Application features]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, vol. 6(36). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/36/09.php

11. Nagay, I.V., Nagay, V.I. Problemy i resheniya dal'nego rezervirovaniya transformatorov otvetvitel'nykh i promezhutochnykh podstantsiy [Problems and solutions of long-distance backup of transformers of branch and intermediate substations]. *Releyshchik*, 2009, no. 4.

12. Golubev, A.N., Dobryagina, O.A., Shadrikova, T.Yu., Shuin, V.A. Multiparameter current protections against ground faults in 6–10 kV cable networks. *Power Technology and Engineering*, 2018, vol. 51, no. 5.

13. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh [Arc groundfault in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, vol. 8, pp. 64–66.

14. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV networks from overvoltage]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002.

15. Shuin, V.A., Shadrikova, T.Ju., Dobryagina, O.A., Shagurina, E.S., Pashkovskiy, S.N. *Sposob zashchity ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of protection against single-phase earth faults in networks with isolated neutral and device for its implementation]. Patent RF, no. 2629373, 2017.

16. Shuin, V.A., Shadrikova, T.Yu., Dobryagina, O.A., Shagurina, E.S., Pashkovskiy, S.N. *Ustroystvo zashchity ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu* [Device for protection against single-phase earth faults in networks with isolated neutral]. Patent RF, no. 2629373, 2017.

17. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, pp. 47, 48.

18. Peters, J.F., Slepian, J. Voltage Induced by Areign Grounds. Tr. AIEE, 1928, Apr., p. 478.

УДК 621.311

Юрий Дмитриевич Кутумов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Разработка способа дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю, основанного на вычислении параметров контура «фаза–земля» в сетях 6–10 кВ

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время для распределительных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ разработано множество методов дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю. Указанные методы основаны на анализе режимных параметров как при устойчивых однофазных замыканиях на землю, так и при переходных процессах, возникающих при однофазных замыканиях на землю. Тем не менее точность определения расстояния до места возникновения однофазных замыканий на землю с применением указанных методов невелика, что определяет отсутствие их широкого внедрения. Перспективным направлением в указанной области является определение расстояния до места возникновения однофазных замыканий на землю на основе расчета пассивных параметров контура «фаза–земля», образуемого фазными проводниками кабеля и его оболочкой.
Материалы и методы. При исследовании переходных и установившихся режимов при однофазных замыканиях на землю для оценки устойчивости функционирования предлагаемых методов дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю применено имитационное моделирование в программных комплексах PSCAD и Matlab, а также в COMSOL Multiphysics.
Результаты. Предложен способ дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю, основанный на вычислении и последующем анализе пассивных параметров контура «фаза–земля» в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью. Дана оценка применимости основной гармонической составляющей (50 Гц) для целей дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю. Обозначен частотный диапазон высших гармонических составляющих в переходных токах и напряжениях при однофазных замыканиях на землю, в котором предложенный способ (и иные подобные способы) будет функциональным и позволит достоверно рассчитать пассивные параметры контура «фаза–земля».
Выводы. Разработанный способ дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю на основе измерения параметров переходных процессов при однофазных замыканиях на землю позволяет с достаточной точностью определить расстояние до места возникновения как устойчивых, так и кратковременных однофазных замыканий на землю на основе фиксации мгновенных значений аварийных составляющих токов и напряжений в исследуемой сети, что обеспечивает возможность его применения и в кабельных сетях с резонансно-заземленной нейтралью.

Ключевые слова: кабельные сети напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, дистанционное определение расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю

Yuri Dmitrievich Kutumov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Development of a method for distant single phase to earth fault localization based on calculating phase-to-ground loop parameters in 6–10 kV networks

Abstract

Background. At the present time, a great number of methods of distant single phase to earth fault localization (DSPEFL) have been developed for 6–10 kV distribution cable networks. These methods are based on the analysis of operating parameters both during stable single phase to earth faults (SFEFs) and transient processes that occur during SFEFs. However, the accuracy of single phase to earth fault localization is low, which determines the lack of their widespread implementation. A promising direction in this area is to determine the distance to the place of single phase to earth fault

© Кутумов Ю.Д., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 47–54.

based on the calculation of the passive parameters of the phase-to-earth loop which is formed by the phase conductors of the cable and its sheath.
Materials and methods. Simulation study in PSCAD, Matlab and also in COMSOL Multiphysics software has been carried out to study transient and steady-state modes during SFEFs, and to assess the stability of the functioning of the proposed DSPEFL methods.
Results. The author has proposed a DSPEFL method, which is based on the calculation and subsequent analysis of the passive parameters of the phase-to-earth loop in 6–10 kV cable networks with an isolated neutral point. An assessment of the applicability of the fundamental harmonic component (50 Hz) for DSPEFL is made. The frequency range of higher harmonic components in transient current and voltage during SFEF is indicated, in which the proposed method (and other similar methods) will be functional and will allow reliably calculate the passive parameters of the phase-to-earth circuit.
Conclusions. The developed method of DSPEFL based on measuring the parameters of transient processes during SFEF allows us to determine with sufficient accuracy the distance to single phase to earth fault localization during both stable and short-term SFEFs. It is based on recording the instantaneous values of fault current and voltage in the network under study, which makes it possible to use it in cable networks with resonant-grounded neutral point.

Key words: 6–10 kV cable networks with isolated neutral point, single phase to earth faults, distant single phase to earth fault localization

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.047-054

Введение. В настоящее время кабельные сети напряжением 6–10 кВ составляют основу систем электроснабжения городов и промышленных предприятий. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях являются преобладающим видом повреждения.

В силу особенностей кабельных сетей с изолированной нейтралью (~80 % от всех кабельных сетей) и резонансно-заземленной через дугогасящий реактор нейтралью (~15–20 % от всех кабельных сетей) ОЗЗ может являться допустимым режимом работы в течение определенного времени (до 2–6 ч). В течение указанного времени требуется, однако, осуществить поиск поврежденного присоединения и расстояния до места повреждения в целях оперативной ликвидации указанного типа повреждения. Необходимость оперативной (а иногда и автоматической) локации ОЗЗ обусловлена значительным уровнем перенапряжений при данном типе повреждения, кратность которых при устойчивом ОЗЗ (УОЗЗ) составляет ~1,73, а при дуговом перемежающемся ОЗЗ (ДПОЗЗ) – до ~3,5–4,0. Такие перенапряжения в электрически связанной сети могут приводить к развитию ОЗЗ в двойные и многоместные замыкания, являющиеся разновидностью короткого замыкания и приводящие к множественным отключениям питающих фидеров действием защит от междуфазных КЗ и длительным нарушениям электроснабжения в кабельных сетях.

Учитывая физические особенности работы кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) (более 80–90 % всех кабельных сетей 6–10 кВ), а именно способность данной изоляции к восстановлению изоляционного пространства при ОЗЗ, следует выделить такие разновидности ОЗЗ, как кратковременные самоустраняющиеся (КрОЗЗ, «клевки земли»), дуговые перемежающиеся (ДПОЗЗ) и дуговые прерывистые (ДПрОЗЗ). Изоляция кабеля, единожды повредившись даже при КрОЗЗ, полностью не восстановит свою изоляционную способность; в месте кратковременного пробоя вероятность его повтора наиболее высока. В связи с этим диагностирование КрОЗЗ, накопление информации о местах их возникновения, в том числе с применением функциональных методов и способов дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю (ДОМЗЗ), является актуальной задачей.

В настоящее время существует значительное количество методов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанных на измерении как переходных, так и установившихся токов и напряжений при ОЗЗ. Тем не менее точность определения расстояния до места возникновения ОЗЗ с применением указанных методов невелика, что подтверждается отсутствием их широкого внедрения. Перспективным направлением в указанной области является определение расстояния до места возникновения ОЗЗ на основе расчета пассивных параметров контура «фаза–земля», образуемого фазными проводниками кабеля и его оболочкой. Также целесообразно иметь на вооружении методы и способы ДОМЗЗ, основанные, в том числе, на фиксации параметров переходных процессов при ОЗЗ (и при КрОЗЗ в частности) для накопления диагностической информации.

Степень разработанности направления исследований. Существующие методы ДОМЗЗ можно разделить на следующие группы (рис. 1):

– методы ДОМЗЗ по параметрам аварийного режима (ПАР);

– импульсные методы ДОМЗЗ;

– методы ДОМЗЗ на основе сравнения измеренных значений электрических величин переходного процесса и значений, полученных с помощью разработанной модели кабельной сети (алгоритмические методы ДОМЗЗ).

В основе методов ДОМЗЗ *по параметрам аварийного режима* лежит измерение параметров (амплитуды, начальной фазы, постоянной времени затухания и пр.) токов и напряжений (их составляющих) при ОЗЗ как в уста-

новившихся режимах, так и при переходных процессах.

Так, в [1] предложен метод ДОМЗЗ в подземных кабельных ЛЭП, основанный на измерениях параметров аварийного режима основной частоты, дополненный алгоритмом компенсации емкостного тока, присущего кабельным ЛЭП.

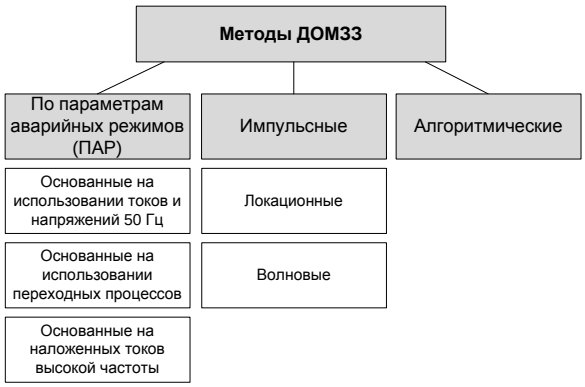


Рис. 1. Классификация методов ДОМЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ

Известны методы [2], основанные на измерении частоты колебаний зарядной составляющей тока ОЗЗ. В [3] для анализа составляющих переходного процесса предложено использовать вейвлет-преобразование.

В [4] рассмотрен алгоритм ДОМЗЗ на основе применения искусственных нейронных сетей. Нейронная сеть анализирует выборки из мгновенных значений сигналов переходных токов и напряжений, которые берутся с частотой дискретизации 5 кГц. Нейронная сеть «обучается», соотнося данные о частоте, затухании и амплитуде сигналов переходных токов и напряжений с расположением места повреждения.

В [5] рассматривается метод ДОМЗЗ, основанный на регистрации и анализе характера снижения напряжения поврежденной фазы $u_{\text{ф}}(t)$ на шинах источника питания. Значение $u_{\text{ф}}(t)$ после пробоя аппроксимируется полиномом второго порядка, после чего находится максимальное значение его производной в момент t_0, соответствующий времени возникновения пробоя $du_{\text{ф}}/dt|_{t=t0}$, которое и характеризует расстояние до места ОЗЗ.

В [6] предлагается метод ДОМЗЗ, основанный на анализе соотношений между током и напряжением переходного процесса поврежденной фазы. Расстояние до места ОЗЗ предлагается определять, в том числе, и по замерам амплитуд переходного тока ОЗЗ. Очевидно, что использование такого подхода не отражает реальной картины переходных процессов в кабельных сетях (например, существование зарядной и разрядной составляющих тока ОЗЗ).

В основе методов ДОМЗЗ по параметрам аварийного режима на основе наложенных токов лежит использование специальных источников «наложенного» тока высокой частоты (например, [7]).

Импульсные методы ДОМЗЗ можно разделить на локационные и волновые.

Локационные методы ДОМЗЗ [8–10] основаны на измерении временного промежутка между моментом отправления импульса прямоугольной формы и моментом возврата к месту установки устройства отраженной от места повреждения электромагнитной волны.

В основе волновых методов ДОМЗЗ [11–14] лежит анализ распространения электромагнитных волн, обусловленных возмущающим воздействием (под которым может подразумеваться ОЗЗ).

Под *алгоритмическими методами* ДОМЗЗ понимаются методы, основанные на применении модели исследуемого объекта (ЛЭП, сети), называемой в [15] алгоритмической моделью объекта (АМО). На основе данных о величинах режимных параметров, полученных при реальном ОЗЗ (или коротком замыкании), происходит подбор таких параметров повреждения в АМО (расстояния до места повреждения, его типа, величины переходного сопротивления), при которых режимные параметры в модели начнут совпадать с режимными параметрами, полученными в реальных условиях.

Алгоритмические методы находят широкое распространение при определении расстояния до места короткого замыкания в сетях 110 кВ и выше в рамках производственной деятельности компаний-лидеров отрасли, таких как АО «Системный оператор Единой энергетической системы».

Методы исследования. Наиболее эффективным методом анализа при переходных и установившихся режимах, сопровождающих ОЗЗ, является математическое имитационное моделирование. При исследовании переходных и установившихся режимов при ОЗЗ, при оценке устойчивости функционирования предлагаемых методов ДОМЗЗ, применялось имитационное моделирование в программных комплексах PSCAD и Matlab. Частотные характеристики кабельной ЛЭП исследовались в программных комплексах Matlab и COMSOL Multiphysics.

Параметры и характеристики кабельных линий напряжением 6–10 кВ. На рис. 2 показан элементарный участок («секция») схемы замещения кабельной ЛЭП напряжением 6–10 кВ.

В контексте исследуемой задачи – разработка алгоритмов ДОМЗЗ – может быть интересно и целесообразно исследовать параметры эквивалентного контура «фаза–земля» поврежденного кабеля. Сопротивление замкнутой петли «фаза-оболочка» рассчитывается как

$$\dot{z}_{\text{ф-з}} = \dot{z}_{ph} + \dot{z}_{sh} - 2 \cdot \dot{z}_{m0}. \quad (1)$$

Исследуемая кабельная ЛЭП выполнена с помощью кабеля марки ААБл-3×240 – кабель

с алюминиевой жилой в алюминиевой оболочке с БПИ. Задача определения пассивных параметров кабелей указанных типов, в том числе зависимостей индуктивных и активных параметров от частоты, успешно решена в [16].

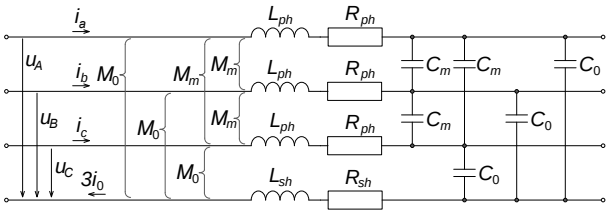


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения трехжильного кабеля с алюминиевой оболочкой: L_{ph} – собственная индуктивность фазной жилы; L_{sh} – собственная индуктивность алюминиевого экрана; M_m – взаимная индуктивность между фазными жилами; M_0 – взаимная индуктивность между фазной жилой и оболочкой; R_{ph} – активное сопротивление фазной жилы; R_{sh} – активное сопротивление алюминиевой оболочки; C_m – емкость между фазными жилами; C_0 – емкость между фазной жилой и оболочкой

Для разработки функциональных методов ДОМЗЗ на основе измерения параметров контура «фаза–земля» (1) необходимо определить частотный диапазон токов и напряжений, при котором импеданс кабельной линии будет сохранять активно-индуктивный характер.

На рис. 3–5 приведены зависимости активного сопротивления и индуктивности контура «фаза–земля» исследуемой ЛЭП от длины участка (расстояния до места замыкания на землю). Исследования производились для частот 1000, 5000 и 10000 Гц.

На зависимости наложены также линии, отражающие «желаемую» зависимость параметра от расстояния до места ОЗЗ (полученную по известным удельным параметрам контура «фаза–земля» – индуктивности $L_{ф\text{-}з}$).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– при частотах входного сигнала до 1000–2000 Гц опытные зависимости соответствуют теоретическим, что говорит нам об отсутствии влияния «распределенности» параметров ЛЭП (и ее поперечных емкостей) на величину входного импеданса;

– при частоте входного сигнала 5000 Гц при расстоянии до места повреждения от 2,0 км начинает проявляться «распределенность» параметров кабельной ЛЭП (расстояние от места повреждения 2,0 км составляет ~7 % от длины волны ~150000 км/с/5000 Гц = 30 км);

– при частоте входного сигнала 10000 Гц при расстоянии до места повреждения от 1,0 км начинает проявляться «распределенность» параметров кабельной ЛЭП, а при расстоянии от 3,0 км входной импеданс приобретает емкостный характер – происходит резонанс.

Таким образом, для реализации устройства ДОМЗЗ на основе измерения индуктивности контура «фаза–земля» приемлемо использовать частотные компоненты в диапазоне до 1–2 кГц (в кабельных сетях городского и промышленного электроснабжения с длиной шлейфа до ~3–5 км).

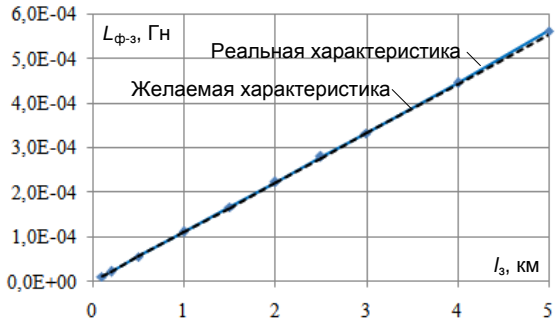


Рис. 3. Зависимость индуктивности контура «фаза–земля» от расстояния до места ОЗЗ при частоте входного сигнала, равной 1000 Гц

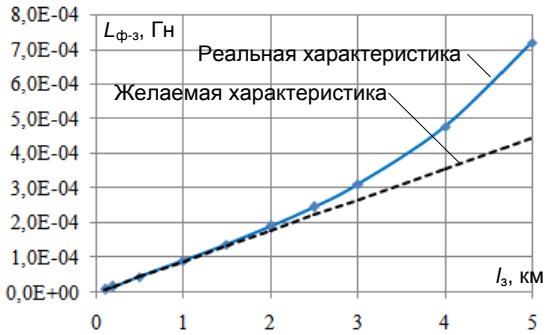


Рис. 4. Зависимость индуктивности контура «фаза–земля» от расстояния до места ОЗЗ при частоте входного сигнала, равной 5000 Гц

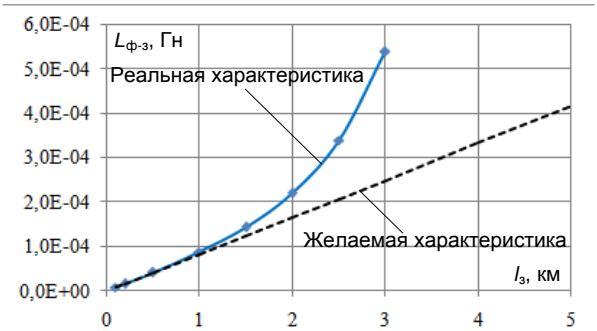


Рис. 5. Зависимость индуктивности контура «фаза–земля» от расстояния до места ОЗЗ при частоте входного сигнала, равной 10000 Гц

О способах ДОМЗЗ на основе измерения составляющей 50 Гц. Индуктивность петли «фаза–земля» (Гн) исследуемой кабельной ЛЭП при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью может быть рассчитана по следующему расчетному выражению:

$$L_{\text{защ}} = \operatorname{Im}\left\{\dot{z}_{\text{защ}}\right\} = \operatorname{Im}\left\{\dot{z}_{\text{ф-з}}\right\} = \operatorname{Im}\left\{\frac{\dot{U}_{\text{ф(50 Гц)}}}{\dot{I}_{\text{ф(50 Гц)}}}\right\}. \qquad (2)$$

В ходе исследования зависимости замера по выражению (2) было установлено, что замер будет стабилен и корректен только после завершения переходного процесса (рис. 6). Указанное связано в первую очередь с наличием «преломления» напряжения поврежденной фазы в момент возникновения ОЗЗ.

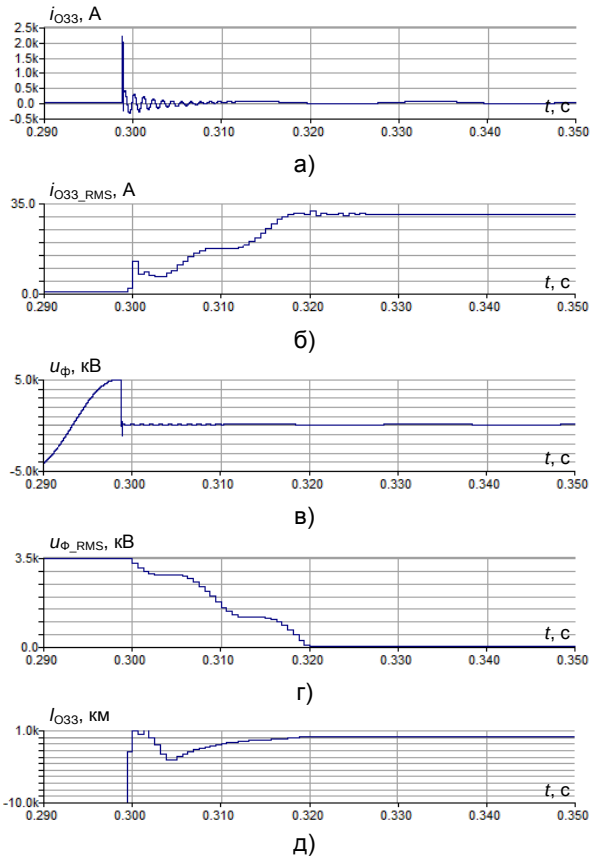


Рис. 6. Иллюстрация нестабильности 1-й гармоники фазного напряжения и фазного тока при ОЗЗ (а–г), а также замера по выражению (2) (д) в условиях наличия интенсивного переходного процесса

Расчеты величины $l_{ОЗЗ}$ (км) в программном комплексе PSCAD (рис. 7) показали, что она прямо пропорциональна расстоянию до места повреждения; характер ее изменения при этом не зависит существенно от величины емкостного тока примыкающей сети. Коэффициент пропорциональности равен удельной индуктивности петли «фаза–земля», которая по результатам расчета в COMSOL составляет 0,0002002 Гн/км, а по результатам расчета в PSCAD – 0,000194 Гн/км. В связи с этим можно утверждать, что указанный метод ДОМЗЗ функционирует в имитационной модели достаточно точно.

Тем не менее следует отметить, что при устойчивом ОЗЗ в зависимости от расстояния до места возникновения ОЗЗ действующее напряжение поврежденной фазы не превышает 5–40 В, что крайне невелико и в реальных условиях функционирования будет находиться в пределах измерительной погрешности трансформатора напряжения.

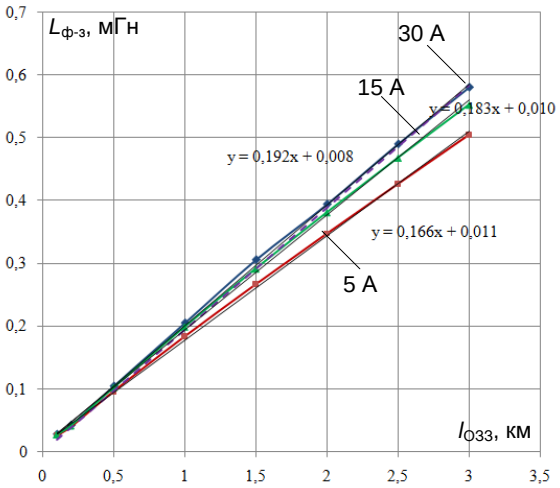


Рис. 7. Результаты вычисления индуктивности контура «фаза–земля» по параметрам аварийного режима (1-я гармоника, 50 Гц) при устойчивом ОЗЗ

Использование высших гармоник, обусловленных переходными процессами при ОЗЗ, которое могло бы решить проблему фиксации КрОЗЗ при предлагаемом способе расчета индуктивности петли «фаза–земля», не представляется возможным в силу того, что замер любой *n*-й гармоники фазного напряжения нестабилен (в отличие от аналогичных гармонических оставляющих тока поврежденной фазы) (рис. 8).

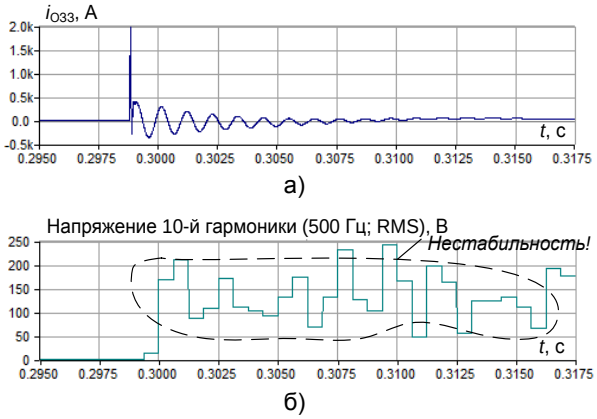


Рис. 8. Иллюстрация нестабильности 10-й гармоники фазного напряжения при ОЗЗ в условиях наличия интенсивного переходного процесса

Таким образом, использование гармонической составляющей основной частоты для целей ДОМЗЗ является актуальным только при УОЗЗ. Указанный способ в реальных условиях функционирования, несмотря на приемлемую точность расчета в имитационной модели, не может быть применен в сети с изолированной нейтралью. Тем не менее целесообразно в перспективе исследовать его применение в се-

тях с более значительными уровнями токов замыкания на землю – кабельных сетях 20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали и кабельных сетях 6–10 кВ с частичным заземлением нейтрали (собственные нужды АЭС).

Методы ДОМЗЗ на основе измерения составляющих в диапазоне от 500 до 2000 Гц (или иных высокочастотных составляющих). Указанный частотный диапазон позволит рассчитывать расстояние до места ОЗЗ не только при устойчивых ОЗЗ, но и при КрОЗЗ, ДПОЗЗ и иных типах ОЗЗ, сопровождающихся интенсивными переходными процессами. Однако реализация подобных методов осложняется тем, что отдельные высшие гармоники напряжения поврежденной фазы нестабильны.

В связи с этим целесообразно рассматривать методы, связанные с анализом широкого частотного диапазона или анализом мгновенных значений токов и напряжений.

Рассмотрим дифференциальное уравнение, описывающее контур «фаза–земля» поврежденной кабельной ЛЭП, и первую производную указанного уравнения:

$$u_{\text{ф}}(t) = i_{\text{ф}}(t)\, R_{\text{ф-з}} + \frac{di_{\text{ф}}(t)}{dt} L_{\text{ф-з}}; \qquad (3)$$

$$\frac{du_{\text{ф}}(t)}{dt} = \frac{di_{\text{ф}}(t)}{dt} R_{\text{ф-з}} + \frac{d^2 i_{\text{ф}}(t)}{dt^2} L_{\text{ф-з}}. \qquad (4)$$

В (3) и (4) имеем две неизвестные величины – индуктивность и активное сопротивление контура «фаза–земля». Индуктивность может быть выражена следующим образом:

$$L_{\text{ф-з}} = \frac{u_{\text{ф}}(t)\dfrac{di_{\text{ф}}(t)}{dt} - i_{\text{ф}}(t)\dfrac{du_{\text{ф}}(t)}{dt}}{\dfrac{di_{\text{ф}}(t)}{dt}\dfrac{di_{\text{ф}}(t)}{dt} - i_{\text{ф}}(t)\dfrac{d^2 i_{\text{ф}}(t)}{dt^2}}. \qquad (5)$$

Если заменить функции и их производные на дискретные отсчеты, то выражение примет следующий вид:

$$L_{\text{ф-з}} = \frac{u_{\text{ф}}[n]\dfrac{i_{\text{ф}}[n]-i_{\text{ф}}[n-1]}{T_{\text{д}}} - i_{\text{ф}}[n]\dfrac{u_{\text{ф}}[n]-u_{\text{ф}}[n-1]}{T_{\text{д}}}}{\dfrac{i_{\text{ф}}[n]-i_{\text{ф}}[n-1]}{T_{\text{д}}}\dfrac{i_{\text{ф}}[n]-i_{\text{ф}}[n-1]}{T_{\text{д}}} - i_{\text{ф}}[n]\dfrac{i_{\text{ф}}[n]-2i_{\text{ф}}[n-1]+i_{\text{ф}}[n-2]}{T_{\text{д}}^2}}. \qquad (6)$$

Эксперименты показали, что указанный способ с приемлемой точностью функционирует при измерении зарядной составляющей тока ОЗЗ (рис. 9) (составляющая, обусловленная дозарядом емкостей неповрежденных фаз при ОЗЗ, имеет частотный диапазон от сотен Гц до 1–2 кГц) в случае, если частота дискретизации информационных сигналов составляет 80 или 96 выборок на период промышленной частоты.

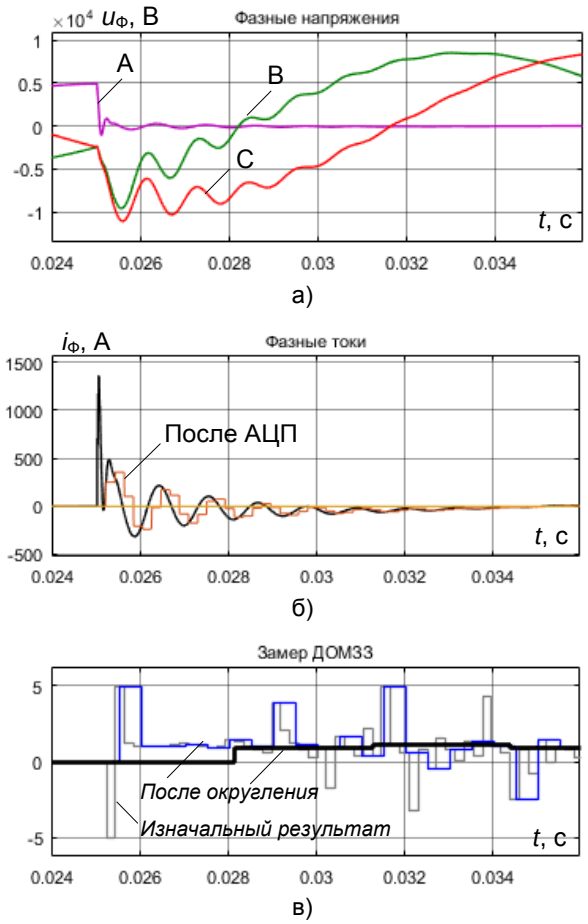


Рис. 9. Иллюстрация функционирования метода ДОМЗЗ, основанного на анализе мгновенных значений токов и напряжений (и их производных) на поврежденной фазе (расстояние до места ОЗЗ – 1 км, 96 выборок на период)

Для корректной работы при измерении разрядной составляющей тока ОЗЗ (обусловлена разрядом емкости поврежденной фазы на землю) при реализации указанного способа требуется частота дискретизации, значительно превышающая 256 выборок на период промышленной частоты (рис. 10).

Применение указанного способа допустимо, в том числе, в сетях с резонансным заземлением нейтрали, так как параметры разрядной составляющей тока ОЗЗ не зависят от режима заземления нейтрали (изолированная; резонансно-заземленная).

Результаты. Предложенный способ ДОМЗЗ, основанный на вычислении и последующем анализе пассивных параметров контура «фаза–земля» в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью, подразумевает анализ параметров разрядной составляющей тока ОЗЗ, фазного напряжения и их производных с частотой дискретизации 80 (96) выборок на период промышленной частоты, позволяет с приемлемой точностью определять расстояние до места возникновения ОЗЗ на кабельных линиях длиной до 2,0 км (погрешности не превы-

шают 7–8 %). Использование разрядной составляющей тока ОЗЗ в данных условиях не представляется возможным в силу следующих обстоятельств:

– параметры контура «фаза–земля» в данных условиях отличаются от ожидаемых (индуктивность петли «фаза–земля» при частотах, соответствующих разрядной составляющей и составляющих 1–20 кГц) (см. рис. 5);

– использующиеся в настоящее время аналого-цифровые преобразователи не позволяют достоверно отобразить указанную составляющую тока ОЗЗ.

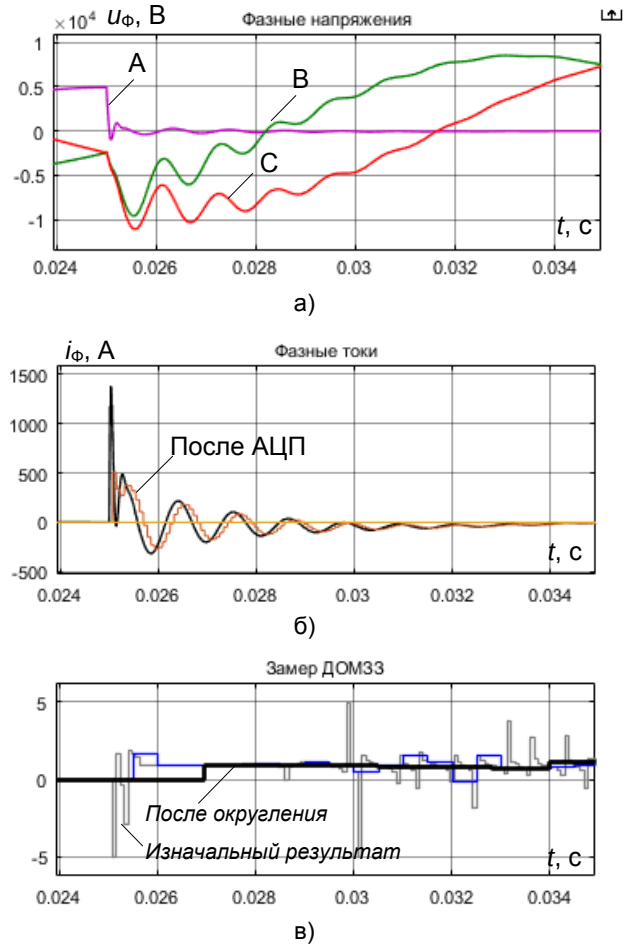


Рис. 10. Иллюстрация функционирования метода ДОМ33, основанного на анализе мгновенных значений токов и напряжений (и их производных) на поврежденной фазе (расстояние до места ОЗЗ – 1 км, 256 выборок на период

Выводы. Разработанный способ ДОМ33 на основе измерения параметров переходных процессов при ОЗЗ позволяет с достаточной точностью определить расстояние до места возникновения как устойчивых, так и кратковременных ОЗЗ на основе фиксации мгновенных значений аварийных составляющих токов и напряжений в исследуемой сети, что обеспечивает возможность его применения в кабельных сетях как с изолированной нейтралью, так и с резонансно-заземленной нейтралью.

Список литературы

1. **Fault** Location for Underground Distribution Feeders: An Extended Impedance-Based Formulation with Capacitive Current Compensation / A. Filomena, M. Resener, R. Salim, A. Bretas // Int. J. Electr. Power Energy Syst. – 2009. – Vol. 31. – P. 489–496.

2. **Welfonder T.** Localisation de défauts monophasés dans les réseauxde distribution à neutre compensé: PhD thesis. – Grenoble INPG, 1998.

3. **Comparison** on wavelet and differential equation algorithms in earth fault distance computation / S. Hänninen, M. Lehtonen, T. Hakola, R. Rantanen // PSCC, 13th Power Systems Computation Conference: Proceedings. – Trondheim, Norway, 1999. – P. 801–807.

4. **Comparison** of artificial neural networks and conventional algorithms in ground fault distance computation / G. Eberl, S. Hanninen, M. Lehtonen, P. Schegner // 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077). – Singapore, 2000. – Vol. 3. – P. 1991–1996. DOI: 10.1109/PESW.2000.847659.

5. **Качесов В.Е.** Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением // Электричество. – 2005. – № 6. – С. 9–18.

6. **Байбурин Э.Р.** Повышение надежности сельских электрических сетей 6(10) кВ на основе оперативного определения места повреждения при однофазных замыканиях на землю по параметрам переходного процесса без отключения потребителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. – Уфа: БГАУ, 2006. – 222 с.

7. **Пат.** на изобретение № 2446533 Российская Федерация, МПК H02H3/16, G01R31/08. Способ определения места однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью : № 2010132425/07 : заявл. 02.08.2010 : опубл. 27.03.2012 / Р.Г. Мустафин, Е.Е. Котельникова.

8. **Куликов А.Л.** Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / под ред. М.Ш. Мисриханова. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006. – 315 с.

9. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения линий импульсными методами. – М.: Энергия, 1968. – 216 с.

10. **Локационный** автоматический искатель повреждений ВЛ Р5-7 / Г.М. Шалыт, С.Е. Сидорчук, А.Н. Афонин, А.Я. Красюк // Определение мест повреждения воздушных линий электропередачи. – М.: Энергия, 1977. – С. 131–139.

11. **Петрухин А.А.** Совершенствование методов и технических средств определения мест повреждений воздушных ЛЭП 6–35 кВ на основе активного зондирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2009. – 176 с.

12. **Латипов А.Г.** Комплекс методик определения места повреждения в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по параметрам установившихся и переходных режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Казань: КГЭУ, 2012. – 212 с.

13. **Crossley P.A., McLaren P.G.** Distance Protection Based on Travelling Waves // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – September 1983. – Vol. PAS–102, Issue 9.

14. **Dommel H., Michels J.** High-speed relaying using traveling wave transient analysis // IEEE Trans. Power Appar. Syst. – New York, 1978.

15. **Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О.** Алгоритмические модели электрических систем // Труды АЭН ЧР. – 1999. – № 1-2. – С. 10–21.

References

1. Filomena, A., Resener, M., Salim, R., Bretas, A. Fault Location for Underground Distribution Feeders: An Extended Impedance-Based Formulation with Capacitive Current Compensation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*., 2009, vol. 31, pp. 489–496.

2. Welfonder, T. Localisation de défauts monophasés dans les réseauxde distribution à neutre compensé. PhD thesis. Grenoble INPG, 1998.

3. Hänninen, S., Lehtonen, M., Hakola, T., Rantanen, R. Comparison on wavelet and differential equation algorithms in earth fault distance computation. *PSCC, 13th Power Systems Computation Conference: Proceedings*. Trondheim, Norway, 1999, pp. 801–807.

4. Eberl, G., Hanninen, S., Lehtonen, M., Schegner, P. Comparison of artificial neural networks and conventional algorithms in ground fault distance computation. *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings* (Cat. No.00CH37077). Singapore, 2000, vol. 3, pp. 1991–1996. DOI: 10.1109/PESW.2000.847659.

5. Kachesov, V.E. Metod opredeleniya zony odnofaznogo zamykaniya v raspredelitel'nykh setyakh pod rabochim napryazheniem [A method for determining the zone of single phase to earth fault in distribution networks under operating voltage]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 6, pp. 9–18.

6. Bayburin, E.R. *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh elektricheskikh setey 6(10) kV na osnove operativnogo opredeleniya mesta povrezhdeniya pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu po parametram perekhodnogo protsessa bez otklyucheniya potrebiteley.* Diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the reliability of 6(10) kV rural electric networks based on prompt determination of the location of damage during single phase to earth faults according to the parameters of the transient process without disconnecting consumers. Cand. tech. sci. diss.]. Ufa: BGAU, 2006. 222 p.

7. Mustafin, R.G., Kotel'nikova, E.E. *Sposob opredeleniya mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v seti s izolirovannoj nejtral'yu* [Method for determining the location of a single-phase to earth fault in a network with an isolated neutral point]. Patent RF, no. 2446533, 2012.

8. Kulikov, A.L. *Tsifrovoe distantsionnoe opredelenie povrezhdeniy LEP* [Digital distance detection of power line faults]. N.Novgorod: Izdatel'stvo Volgo-Vyatskoy akademii gosudarstvennoy sluzhby, 2006. 315 p.

9. Shalyt, G.M. *Opredelenie mest povrezhdeniya liniy impul'snymi metodami* [Determination of line fault locations using pulse methods]. Moscow: Energiya, 1968. 216 p.

10. Shalyt, G.M., Sidorchuk, S.E., Afonin, A.N., Krasyuk, A.Ya. Lokatsionnyy avtomaticheskiy iskatel' povrezhdeniy VL R5-7 [Localized automatic fault detector for overhead lines]. *Opredelenie mest povrezhdeniya vozdushnykh liniy elektroperedachi*. Moscow: Energiya, 1977, pp. 131–139.

11. Petrukhin, A.A. *Sovershenstvovanie metodov i tekhnicheskikh sredstv opredeleniya mest povrezhdeniy vozdushnykh LEP 6–35 kV na osnove aktivnogo zondirovaniya.* Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving methods and technical means for determining the location of damage to 6–35 kV overhead power lines based on active sensing. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2009. 176 p.

12. Latipov, A.G. *Kompleks metodik opredeleniya mesta povrezhdeniya v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh napryazheniem 6–35 kV po parametram ustanovivshikhsya i perekhodnykh rezhimov*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [A set of methods for determining the location of faults in electrical distribution networks with voltages of 6–35 kV based on the parameters of steady-state and transient modes. Cand. tech. sci. diss.]. Kazan': KGEU, 2012. 212 p.

13. Crossley, P.A., McLaren, P.G. Distance Protection Based on Travelling Waves. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, September 1983, vol. PAS–102, issue 9.

14. Dommel, H., Michels, J. High-speed relaying using traveling wave transient analysis. *IEEE Trans. Power Appar. Syst*. New York, 1978.

15. Lyamets, Yu.Ya., Nudel'man, G.S., Pavlov, A.O. Algoritmicheskie modeli elektricheskikh sistem [Algorithmic models of electrical systems]. *Trudy AEN ChR*, 1999, no. 1-2, pp. 10–21.

УДК 621.316

Дарья Константиновна Кугучева
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», аспирант кафедры энергетики, Россия, Калининград, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Максим Сергеевич Харитонов
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики, Россия, Калининград, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Исследование несимметрии напряжений в электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации

Авторское резюме

Состояние вопроса. Вопросы исследования влияния объектов микрогенерации на базе возобновляемых источников энергии на показатели качества электроэнергии не имеют широкого освещения в отечественных исследованиях. Однако в связи с поставленной Правительством РФ задачей по увеличению количества используемых активными потребителями возобновляемых источников энергии актуальность исследования заключается в необходимости определения особенностей влияния объектов микрогенерации, подключенных к распределительным электрическим сетям низкого напряжения, на несимметрию напряжений для определения дальнейших путей развития данной отрасли энергетики. Целью исследования является построение модели распределительной электрической сети низкого напряжения с объектами микрогенерации и проведение вычислительного эксперимента по оценке влияния объектов микрогенерации на базе возобновляемых источников энергии на несимметрию напряжений, определение путей повышения параметров качества электроэнергии, связанных с несимметрией напряжений.
Материалы и методы. Исследование проведено с использованием имитационного подхода, в соответствии с которым применен метод математического моделирования, реализованный в программных комплексах NEPLAN и Load Profile Generator.
Результаты. Определены особенности влияния объектов микрогенерации на положительные отклонения напряжения. Проведен анализ чувствительности узлов моделируемого участка электрической сети по критерию изменения напряжения. Определены коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности для наиболее чувствительного узла сети при различном уровне внедрения объектов микрогенерации и различных способах их подключения и управления. Определены особенности изменения напряжения на каждой фазе при различных способах управления и подключения объектов микрогенерации.
Выводы. Внедрение объектов микрогенерации оказывает влияние на положительные отклонения напряжения и несимметрию напряжений. Установлено, что основными факторами данного влияния являются способ подключения и управления объектом микрогенерации, несимметрия напряжений до внедрения объектов микрогенерации, соотношения между мгновенными мощностями нагрузки потребителя и объекта микрогенерации, чувствительность узлов по критерию изменения напряжения, зависящая от электрической удаленности объектов микрогенерации от центра питания, параметров фидера и нагрузки. Проведенные на математической модели экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективным решением проблемы несимметрии является перераспределение выдаваемой объектом микрогенерации мощности между фазами электрической сети в соответствии с загрузкой фаз.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несимметрия напряжений, микрогенерация, отклонение напряжения, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические преобразователи

Darya Konstantinovna Kugucheva
Kaliningrad State Technical University, Postgraduate Student of Power Engineering Department, Russia, Kaliningrad, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Maksim Sergeevich Kharitonov
Kaliningrad State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Engineering Department, Russia, Kaliningrad, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

Study of voltage unbalance in low-voltage electrical networks with microgeneration systems

Abstract

Background. The issues of studying the influence of microgeneration facilities based on renewable energy sources on the quality indicators of electric power are not widely covered in national studies. However, due to the task set by the Government of the Russian Federation to increase the number of renewable energy sources used by active consumers, the relevance of the study

© Кугучева Д.К., Харитонов М.С., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 55–66.

is to determine the features of the influence of microgeneration facilities connected to low-voltage distribution electric networks on voltage unbalance to determine further development paths for this energy sector. The purpose of the study is to design a model of a low-voltage distribution electric network with microgeneration facilities and conduct a computational experiment to assess the influence of microgeneration facilities based on renewable energy sources on voltage unbalance, to determine the ways to improve the quality parameters of electric power associated with voltage unbalance.
Materials and methods. The study uses a simulation approach, applying a method of mathematical modeling implemented using software complexes NEPLAN and Load Profile Generator.
Results. The authors have identified the peculiarities of the impact of microgeneration units on positive voltage deviations and have conducted sensitivity analysis of nodes in the modeled network section based on voltage change criteria. The voltage unbalance coefficients in the negative sequence for the most sensitive network node at various levels of microgeneration unit penetration and different ways of their connection and control are determined. The study also has identified the characteristics of voltage change at each phase with different methods of controlling and connecting microgeneration units.
Conclusions. The deployment of microgeneration objects affects positive deviations in voltage and voltage unbalance. The main factors of this influence are the following: the method of connection and control of the microgeneration object, voltage unbalance before the deployment of microgeneration objects, the relationship between the instantaneous powers of the consumer load and the microgeneration object, the sensitivity of nodes to changes in voltage criteria, depending on the electrical distance of microgeneration objects from the main substation, feeder parameters, and load. It has been established that the most effective solution to the asymmetry problem is to redistribute the power provided by the microgeneration object among the phases of the power grid.

Key words: power quality, voltage unbalance, microgeneration, voltage deviation, renewable energy sources, photovoltaic converters

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.055-066

Введение. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) являются перспективным направлением развития энергетической отрасли в России и мире. В качестве фактора стимулирования инвестиций в развитие возобновляемой энергетики в Российской Федерации особую роль играют Федеральный закон № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об электроэнергетике” в части развития микрогенерации» и ПП РФ от 2 марта 2021 г. № 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации», благодаря которым функционирует механизм сальдирования (продажи) излишков выработанной электроэнергии от объектов микрогенерации в пределах 15 кВт. Объект микрогенерации – объект по производству электрической энергии, подключенный к сети до 1000 В и функционирующий, в том числе, на основе использования возобновляемых источников энергии. Прогнозируемый рост данного вида генерации может достигать 150 МВт в год[1]. Одним из наиболее востребованных генерирующих источников для объектов микрогенерации являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) в силу простоты их установки и обслуживания, отсутствия шума и вибраций, компактности и возможности интеграции в архитектуру строения [1].

С учетом развития микрогенерации актуальной является задача исследования особенностей функционирования объектов микрогенерации на базе ВИЭ, в том числе на базе ФЭП, в составе электрических сетей для оценки влияния данных объектов на показатели качества электрической энергии, в частности несимметрию напряжений. Целью работы является определение особенностей функционирования объектов микрогенерации в составе низковольтных распределительных электрических сетей, а также определение влияния однофазно подключенных объектов микрогенерации на коэффициенты несимметрии при различном уровне внедрения генерирующих установок и различном уровне несимметрии нагрузок фаз.

Согласно ГОСТ 32144-2013, несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети. Расчет несимметричных режимов производится методом фазных координат [2, 3] путем представления несимметричной нагрузки в виде суммы мощностей симметричной нагрузки и двух однофазных нагрузок, подключенных на различные фазы сети [4], методом симметричных составляющих [5], методом Ч. Фортескью [6]. В рамках данного исследования ввиду наличия большого количества электроприемников и практически отсутствия насыщения магнитных систем несимметричная система напряжений может быть представлена как геометрическая сумма трех симметричных составляющих напряжений: прямой $\bar{U}_1$, обратной $\bar{U}_2$ и нулевой последовательностей $\bar{U}_0$.

Согласно ГОСТ 32144-2013, несимметрия напряжений характеризуется значениями коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}, усредненными в точке

[1] Энергетика и промышленность России: Развитие микрогенерации в России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.eprussia.ru/news/base/2022/9853042.html.

передачи электрической энергии на интервале времени 10 минут (не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю и 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю).

Расчет данных коэффициентов производится по следующим выражениям:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $U_{2(1)}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В; $U_{1(1)}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты, В;

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $U_{0(1)}$ – действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В; $U_{1(1)}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты, В.

Согласно исследованиям профессора Ф.Д. Косоухова [7], повышенные значения коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям приводят к дополнительным потерям мощности от несимметрии, обусловленным токами обратной и нулевой последовательностей. В частности, в расчетах предлагается использовать коэффициент потерь мощности от несимметрии токов, характеризующий повышение потерь мощности при несимметричном режиме по сравнению с потерями при симметричном режиме:

$$K_{\varepsilon} = \frac{3I_2^2 R_2}{3I_1^2 R_1} + \frac{3I_0^2 R_0}{3I_1^2 R_1} = K_{2i}^2 \frac{R_2}{R_1} + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}, \quad (3)$$

где I_1, I_2, I_0 – токи прямой, обратной и нулевой последовательностей; R_1, R_2, R_0 – активные сопротивления элемента прямой, обратной и нулевой последовательностей; K_{2i}, K_{0i} – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям.

Таким образом, существование несимметричных режимов напрямую влияет на потери мощности [8, 9], что сопровождается повышением тепловой нагрузки и снижением уровня надежности электроснабжения [10].

Помимо возникновения повышенных потерь в сети, необходимость исследования вопросов несимметрии напряжений связана с влиянием данного показателя качества электроэнергии на возникающие в электрооборудовании процессы. В асинхронных двигателях несимметрия напряжений приводит к нарушению симметрии токов, что может вызывать дополнительный нагрев и приводить к сокращению срока службы оборудования [11], а также вызывать повышенную вибрацию, усиливающую усталостные процессы в механической части [12]. В выпрямительных установках возможно возникновение пульсаций, негативно влияющих на подключенные чувствительные электронные компоненты [13]. Несимметрия напряжений может привести к низкому напряжению у наиболее загруженного однофазного потребителя и повышенному напряжению у наименее загруженного однофазного потребителя [14]. При возникновении несимметричных режимов в распределительных электрических сетях низкого напряжения по нейтральному проводнику протекают токи нулевой последовательности, которые в случае недостаточного сечения нулевого проводника могут привести к однофазным коротким замыканиям и пожарам [15].

Вследствие наличия в большинстве случаев однофазного подключения бытовых нагрузок к распределительным электрическим сетям низкого напряжения возможно возникновение несимметричной загрузки фаз, что вызывает несимметрию токов и напряжений, обусловливающих описанные выше проблемы. В данном исследовании не рассматриваются в качестве причины несимметрии различные сопротивления линий электропередачи, так как, согласно [16], несимметрия сопротивлений фаз при длине воздушной линии менее 100 км незначительна.

Для уменьшения показателей несимметрии напряжений разработаны различные способы и технические средства, различающиеся сложностью и экономичностью, принципом действия и сферами применения. Все способы классифицируются в соответствии с влиянием на показатели, приведенные в выражении (3), среди них: выравнивание нагрузок по фазам; перераспределение нагрузок по фазам; применение замкнутых схем сетей; увеличение сечения нулевого провода; замена схемы соединения обмоток трансформатора *Y*/*Y*0 на *Y*/*Z*; применение различных симметрирующих устройств.

Внедрение в распределительные электрические сети низкого напряжение объекта микрогенерации при определенных условиях приводит к изменению потоков мощности, при этом напряжение в узле с генерирующим объектом значительно повышается [1].

Для упрощенной схемы сети (рис. 1), в соответствии с которой потребители получают питание от системы через трансформаторную подстанцию 15/0,4 кВ, при равенстве количеств генерируемой и потребляемой электроэнергии в узле сети с объектом микрогенерации напряжение повышается лишь на некоторых участках сети (рис. 2,а), в то время как на остальных участках сети напряжение снижается вследствие падения напряжения. При превышении количества генерируемой электроэнергии над потребляемой ($P_{\text{ген}} > P_{\text{нг}}$) в сети может наблюдаться превышение напряжения сверх допустимых пределов (рис. 2,б).

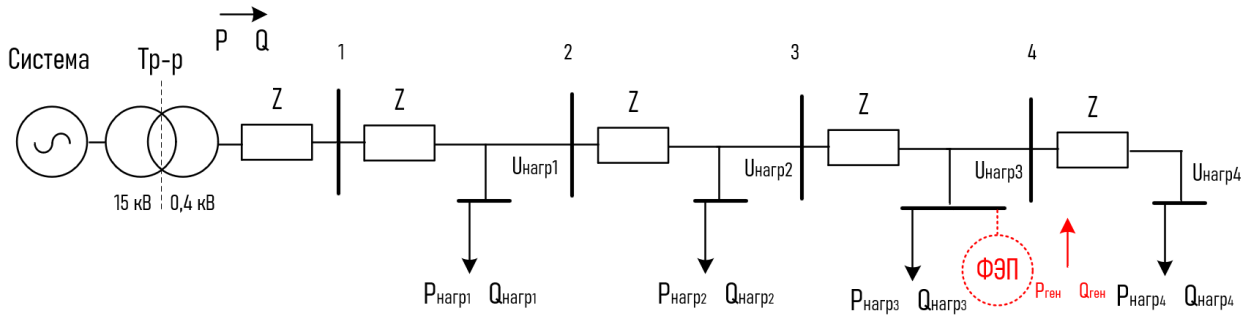


Рис. 1. Схема распределительной электрической сети в однофазном исполнении с объектом микрогенерации

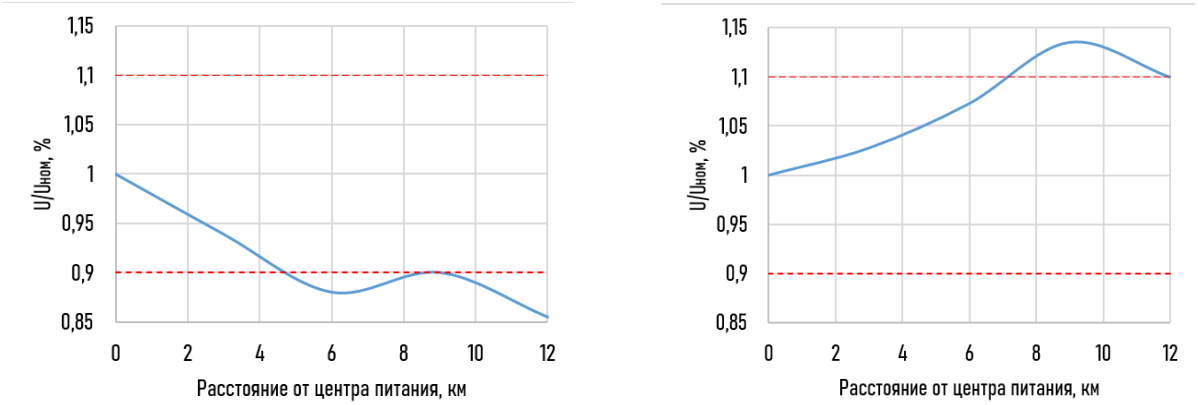


Рис. 2. Значения напряжения вдоль линии электропередачи: а – при $P_{ген} = P_{нг}$; б – $P_{ген} = 6 \times P_{нг}$

Таким образом, подключение к одной фазе объекта микрогенерации может привести к увеличению несимметрии напряжений вследствие возможного повышения напряжения на одной фазе при одновременном снижении напряжения из-за падения напряжения на других фазах. Увеличение несимметрии напряжений и связанные с этим негативные последствия указывают на необходимость исследования данного вопроса и принятия мер для минимизации последствий несимметричных режимов.

На сегодняшний день существуют решения обеспечения нормативных показателей качества электроэнергии у потребителей на стороне 0,4 кВ: пункты автоматического регулирования напряжения; вольтодобавочные трансформаторы; трансформаторы типа ТМ и ТМГ со встроенным симметрирующим устройством нулевой последовательности [17]. Однако в отечественных исследованиях отсутствует комплексный анализ влияния объектов микрогенерации на базе ВИЭ на несимметрию напряжений и способов уменьшения данных показателей.

Зарубежный опыт эксплуатации распределительных электрических сетей низкого напряжения с генерирующими объектами на базе ВИЭ предполагает для решения проблемы несимметрии напряжений внедрение накопителей электроэнергии [18, 19, 20]. Однако данное решение экономически нецелесообразно для объектов микрогенерации, функционирующих в Российской Федерации, у которых необходимость наличия накопителя электроэнергии противоречит основной концепции микрогенерации – возможности продажи избытков произведенной электроэнергии и покупки электроэнергии из сети в периоды недостатка генерируемой электроэнергии.

Также предлагается метод воздействия на регуляторы напряжения трансформаторов под нагрузкой и использование интеллектуальных инверторов, способных снизить напряжение у потребителя путем выработки реактивной мощности для снижения несимметрии напряжений вследствие выравнивания (уменьшения) н апряжения на фазе с генерирующим объектом [21, 22, 23].

В настоящем исследовании моделируется существующий участок сети Калининградской области с условным распределением объектов микрогенерации и проводится анализ влияния объектов микрогенерации на базе ВИЭ на несимметрию напряжений при различном уровне внедрения объектов микрогенерации, различных параметрах пофазной загрузки фидеров, при однофазном и трехфазном подключении генерирующих источников и потребителей. Анализу подвергнут летний период с учетом отсутствия внешней несимметрии. Делаются выводы о возможностях снижения несимметрии напряжения в низковольтных распределительных электрических сетях с объектами микрогенерации. Научная значимость исследования состоит в выявлении особенностей влияния объектов микрогенерации на базе ВИЭ на

несимметрию напряжений и обосновании расширенной совокупности условий и факторов, оказывающих влияние на значения несимметрии напряжений. Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при обосновании мероприятий по повышению качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации на базе фотоэлектрических преобразователей.

Методы исследования. В результате рассмотрения и изучения методологических подходов в основу настоящего исследования положен имитационный подход, в соответствии с которым применен метод математического моделирования.

Имитационный подход предполагает использование методологии конструирования аналогичных моделей и проведение с их помощью вычислительных экспериментов. В результате использования метода математического моделирования получено глубокое понимание влияния объектов микрогенерации на несимметрию напряжений, а также предложены и обоснованы решения по повышению качества электроэнергии в распределительных сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации.

Схема моделируемой распределительной электрической сети низкого напряжения с объектами микрогенерации представлена на рис. 3. Параметры сети представлены в табл. 1.

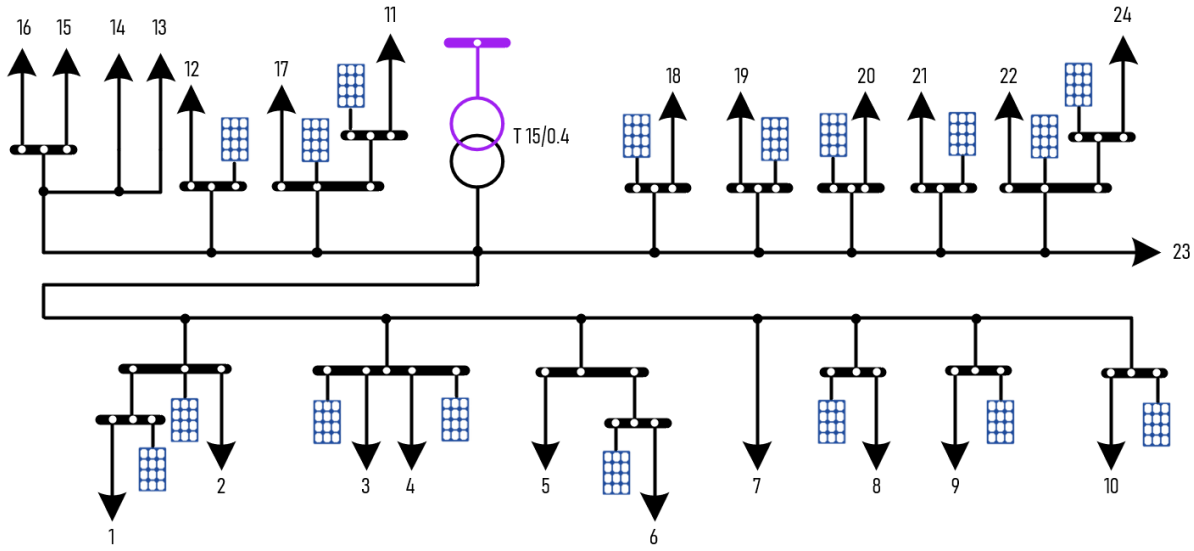


Рис. 3. Модель распределительной электрической сети 0,4 кВ с точками возможного подключения объектов микрогенерации

Таблица 1. **Параметры анализируемой модели распределительной электрической сети 0,4 кВ**

Протяженность ЛЭП, км	2,312
Напряжение ЛЭП, кВ	0,4
Количество анализируемых узлов	24
Количество узлов, в которых рассматривается внедрение солнечных электростанций	18

Для разработанной модели с учетом расположения домовладений определены точки возможного подключения объектов микрогенерации на базе ФЭП, установленная мощность которых не превышает максимальную присоединенную мощность энергопринимающих устройств (см. рис. 3). Нагрузки приняты в виде неизменной мощности, т.е. не зависящими от напряжения.

Для построения графика нагрузки использован программный комплекс Load Profile Generator [24], который предназначен для определения динамики энергопотребления на основе реальных данных. Нагрузки заданы с учетом данных о фактическом суточном энергопотреблении.

Для определения изменения во времени потенциальной выработки электроэнергии объектом микрогенерации проведен расчет количества приходящей на принимающую поверхность инсоляции с использованием метода, представленного в [25]. С использованием математического выражения, выведенного в [26], получены графики выработки электроэнергии объектом микрогенерации на базе ФЭП установленной мощности 3 кВт. В качестве упрощения для каждого узла моделируемой сети 0,4 кВ приняты одинаковые параметры энергопотребления и выработки электроэнергии объектом микрогенерации. Совмещенные графики вырабатываемой и потребляемой объектом микрогенерации электроэнергии представлены на рис. 4.

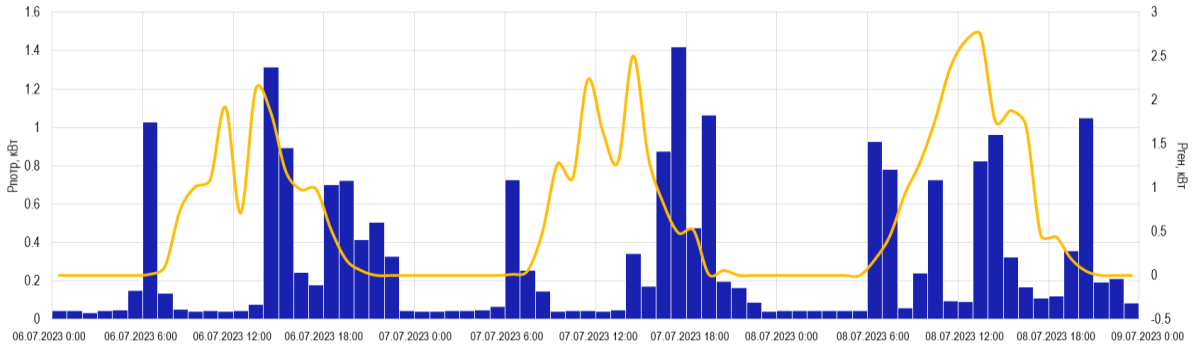


Рис. 4. Совмещенный суточный график энергопотребления домовладения и производства электроэнергии объектом микрогенерации по данным за 06.07.2023–08.07.2023

При анализе влияния объектов микрогенерации на несимметрию напряжений рассмотрены различные уровни внедрения генерирующих объектов. В рамках настоящего исследования уровень внедрения объектов микрогенерации (УВОМ) определяется согласно следующему выражению [27]:

$$УВОМ = \frac{\sum_{n=0}^{n=fact} P_{уст}}{\sum_{n=0}^{n=max} P_{уст}} \cdot 100\ \%, \qquad (4)$$

где в числителе приводится мощность установленных объектов микрогенерации, в знаменателе – мощность максимально возможного числа подключенных объектов микрогенерации.

Исследованию были подвергнуты сценарии при уровнях внедрения объектов микрогенерации от 10 до 100 %. Распределение нагрузок по фазам было выбрано с учетом проведенных в [28] реальных измерений токовых нагрузок в сетях 0,4 кВ: фаза А – 20 %; В – 20 %, С – 60 % от общего числа нагрузок.

Для определения узлов сети, в которых наиболее вероятно достижение нестабильности напряжения, выполнен анализ чувствительности *U-Q* [29, 30].

На рис. 5 представлены результаты анализа чувствительности узлов (*U-Q Sensitivity*), полученные на основании анализа потокораспределения методом Ньютона–Рафсона.

Для применения данного метода составляется система нелинейных уравнений в виде $F(x) = 0$, где $F(x)$ – вектор функций, зависящих от неизвестных переменных x. Для решения задач потокораспределения вектор $F(x)$ описывается уравнениями, характеризующими баланс мощности в каждом узле сети. На каждой итерации вычисляется матрица Якоби, которая является матрицей частных производных функций вектора $F(x)$ по переменным x. Матрица Якоби имеет размерность $N \times N$, где N – количество неизвестных переменных (количество узлов в сети). Каждый элемент матрицы Якоби определяется как частная производная i-го элемента вектора $F(x)$ по j-й переменной x [31] и имеет следующий вид:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix}. \qquad (5)$$

Итерационный процесс описывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \qquad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} J\delta P & JUP \\ J\delta Q & JUQ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix}.$$

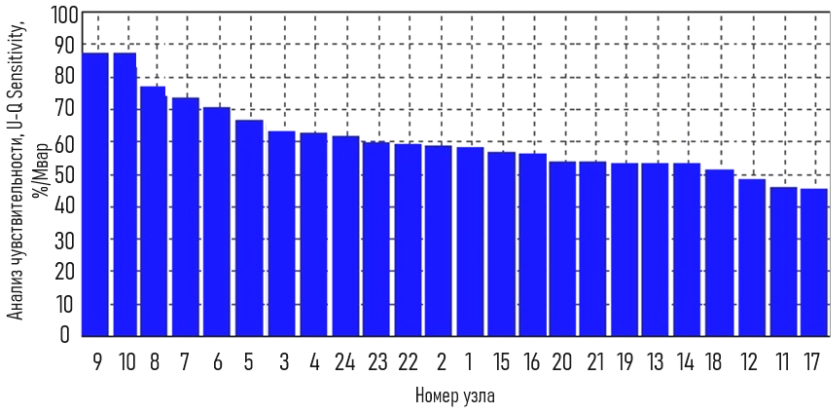


Рис. 5. Результаты расчета чувствительности узлов по критерию изменения напряжения (*U-Q Sensitivity*)

Система уравнений (6) решается на каждом шаге итерации методом Гаусса [32], после чего может быть найдено значение переменных в следующей итерации:

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k, \quad (7)$$

где J_{UP} и J_{UQ} – подматрицы Якоби, выражающие чувствительность напряжения узла к изменению активной и реактивной мощностей; $J_{\delta P}$ и $J_{\delta Q}$ – подматрицы Якоби, выражающие чувствительность фазового угла, измеренного в узле, к изменению активной и реактивной мощностей.

Элементы матрицы Якоби представляют собой инструмент для анализа влияния изменений параметров системы на ее стабильность. В данном случае на стабильность напряжения в системе влияют активная мощность P и реактивная мощность Q. Однако при анализе влияния данных параметров в каждой рабочей точке активная мощность P поддерживается постоянной и стабильность напряжения оценивается путем учета постепенных изменений реактивной мощности Q и напряжения U. Тогда выражение для нахождения ΔU имеет следующий вид:

$$\Delta U = S_r \Delta Q. \quad (8)$$

Согласно результатам проведенного исследования (рис. 5), в узлах 6–10 наблюдается наибольшее изменение напряжения, а в узлах 11, 12, 17 и 18 – наименьшее изменение напряжения. В связи с этим при рассмотрении процессов интеграции объектов микрогенерации предпочтение отдавалось использованию данных узлов, а анализируемый участок сети был разбит на отдельные фидеры. Дальнейшие результаты расчета приведены для фидера с узлами 1–10.

Результаты исследования. Результаты моделирования и расчетов коэффициентов несимметрии по обратной последовательности при УВОМ 10, 20, 40, 60, 80, 100 % представлены на рис. 6.

Графики изменения напряжения на каждой фазе в различных точках анализируемого участка сети при УВОМ 60 % для каждого из вариантов работы сети приведены на рис. 7.

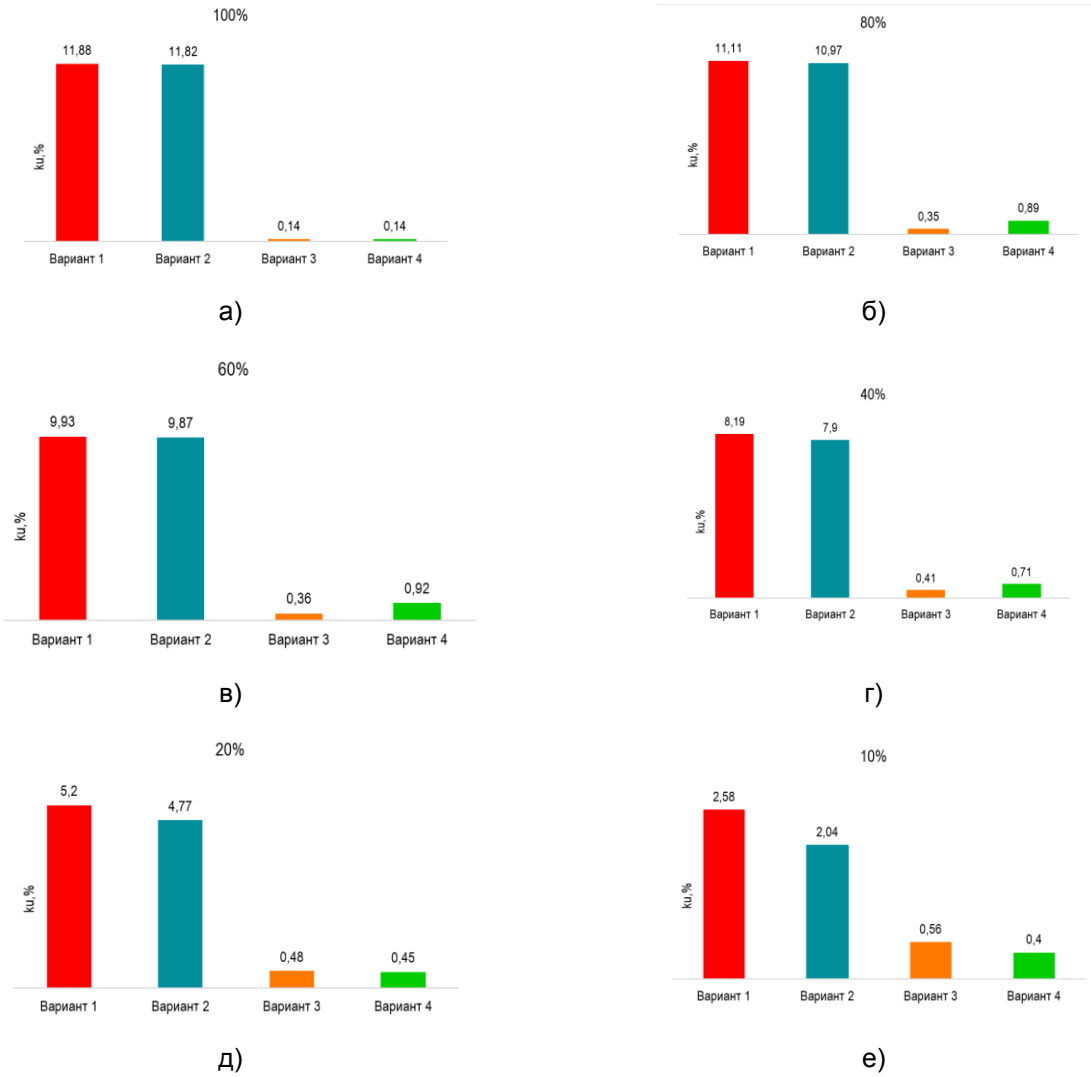
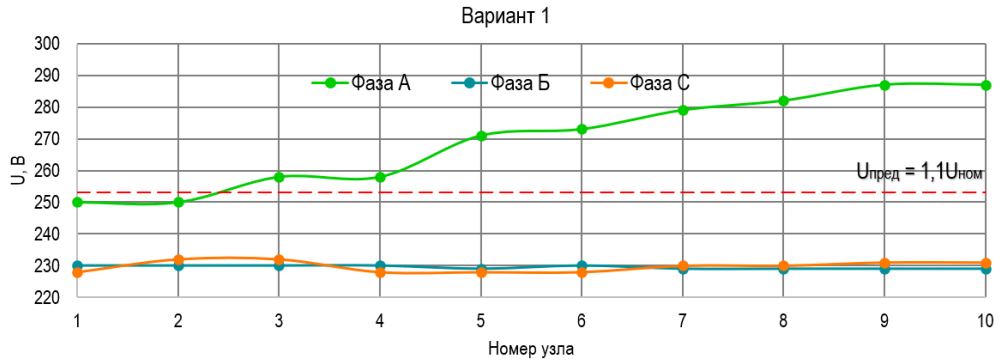
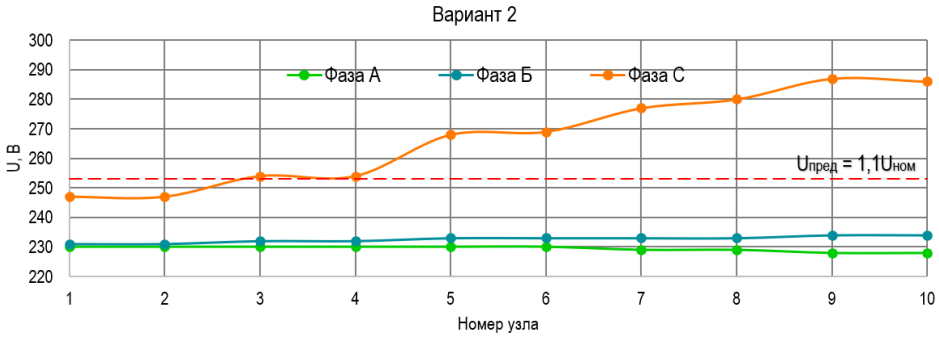


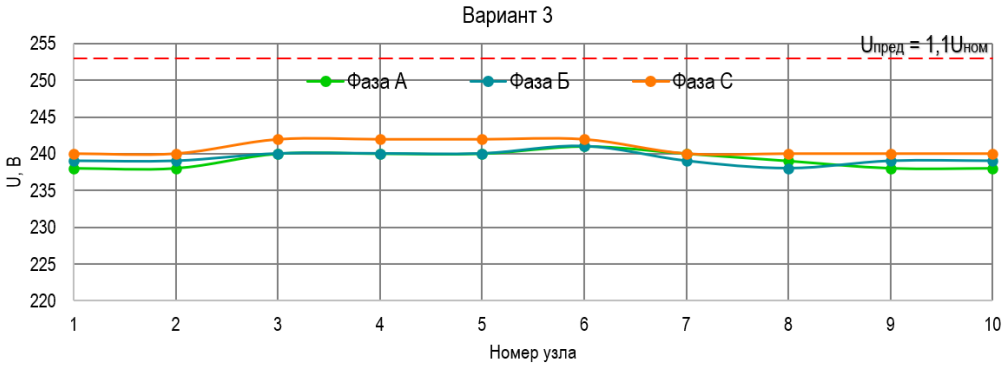
Рис. 6. Результаты расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности при УВОМ: а – 100 %; б – 80 %; в – 60 %; г – 40 %; д – 20 %; е – 10 %



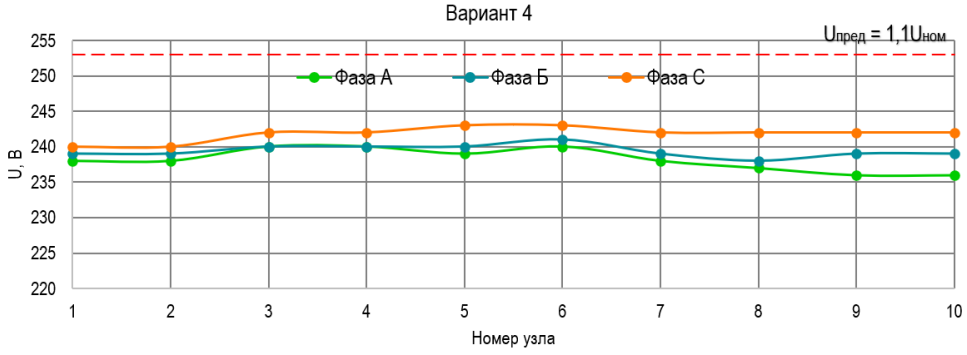
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Графики изменения напряжения на фазах в различных узлах сети: а – для варианта 1: объекты микрогенерации подключены к наименее загруженной фазе; б – для варинта 2: объекты микрогенерации подключены к наиболее загруженной фазе; в – для варианта 3: объекты микрогенерации перераспределяются между нагрузками фаз путем их переключения с наименее нагруженных фаз на наиболее нагруженные; г – для варианта 4: нагрузочные узлы с объектами микрогенерации имеют трехфазное подключение

При повышении разницы между фактической мощностью объекта микрогенерации и мощностью нагрузки несимметрия напряжений растет вследствие возникновения обратных потоков мощности и связанного с этим повышения напряжения, что особенно сказывается на наиболее удаленных узлах сети. На основании результатов проведенного исследования можно сделать вы-

вод, что при наличии несимметрии в сети без объектов микрогенерации их подключение может привести как к повышению, так и к снижению коэффициентов несимметрии. Однако при хаотичном подключении объектов микрогенерации возможно превышение установленных ГОСТ 32144-2013 пределов по несимметрии напряжений при различных УВОМ. Применительно к анализируемому случаю, при УВОМ = 20–100 % и однофазном подключении объектов микрогенерации без применения специализированных устройств симметрирования наблюдается превышение допустимых показателей несимметрии напряжений. Перевод потребителей с объектами микрогенерации с однофазного на трехфазное подключение либо перераспределение объектов микрогенерации между нагрузками фаз путем переключения с наименее нагруженных фаз на наиболее нагруженные позволит ограничить повышение напряжения сверх установленных пределов (табл. 2) и добиться снижения коэффициентов несимметрии даже по сравнению с изначальными параметрами сети до подключения генерирующих объектов.

Таблица 2. **Количество узлов рассматриваемого фидера, в которых наблюдалось превышение напряжения сверх установленных ГОСТ 32144-2013 пределов**

№ варианта	Количество узлов, в которых в процессе моделирования напряжение в узлах сети превышало 1,1*U*ном, при различных УВОМ, %					
	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	10 %
Вариант 1	10	10	8	6	2	0
Вариант 2	10	8	8	6	2	0
Вариант 3	4	0	0	0	0	0
Вариант 4	3	0	0	0	0	0

Выводы. Внедрение объектов микрогенерации на базе ФЭП в распределительные электрические сети низкого напряжения в случае превышения производства электроэнергии над потреблением в узле сети приводит к возникновению обратного потока мощности, оказывающего влияние на несимметрию напряжений из-за повышения напряжения в фазе сети, к которой подключен объект микрогенерации. Возникающая при этом несимметрия, которая может превышать установленные ГОСТ 32144-2013 пределы, и повышенное напряжение приводят к увеличению потерь электроэнергии, негативному воздействию на электроприемники и снижению уровня надежности электроснабжения.

В ходе проведенного исследования установлено, что основными факторами, характеризующими данное явление, являются: значение коэффициентов несимметрии в определенной точке сети до внедрения объектов микрогенерации; соотношения между мгновенной мощностью нагрузки потребителя и мгновенной мощностью объекта микрогенерации; стабильность напряжения в узлах сети, что, в свою очередь, зависит от электрической удаленности объектов микрогенерации от центра питания, параметров фидера и нагрузки.

Согласно полученным результатам, при УВОМ = 20–100 % и однофазном подключении объектов микрогенерации без применения специализированных устройств симметрирования наблюдается превышение допустимых показателей несимметрии напряжений. В условиях возможного роста числа объектов микрогенерации установлено, что наиболее эффективным решением проблемы несимметрии является перераспределение выдаваемой объектом микрогенерации мощности между нагрузками фаз путем переключения с наименее нагруженной фазы на наиболее нагруженную. Однако в отечественных исследованиях отсутствуют решения для повышения качества электроэнергии путем перераспределения выдаваемой объектом микрогенерации мощности, что свидетельствует о перспективности данного направления исследований в контексте повышения показателей качества электроэнергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения с объектами микрогенерации.

Список литературы

1. **Харитонов М.С., Кугучева Д.К.** Исследование влияния объектов микрогенерации на уровень напряжения в электрических сетях низкого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 1(82). – С. 34–43.

2. **Закарюкин В.П., Крюков А.В.** Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 3-4. – С. 29–35.

3. **Солдатов В.А., Попов Н.М.** Расчет несимметричных режимов сетей 0,38 кВ в фазных координатах // Энергообеспечение и энергосбережение в сельскомхозяйстве: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 14–15 мая 2003 г. – М.: ВИЭСХ, 2003. – Ч. 1. – С. 136–141.

4. **Закарюкин В.П., Крюков А.В., Тхао В.Л.** Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. – Иркутск: ИрГУПС, 2020. – 296 с. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/200192.

5. **Фролов Ю.М., Шелякин В.П.** Основы электроснабжения: учеб. пособие [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. – СПб.: Лань, 2022. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/211058.

6. **Furfari F.A., Brittain J.** Charles LeGeyt Fortescue and the method of symmetrical components // IEEE Industry Applications Magazine. – 2002. – Vol. 8(3). – P. 7. https://doi.org/10.1109/MIA.2002.999605.

7. **Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О.** Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. – 2014. – № 6. – С. 8–12.

8. **Вендин С.В., Килин С.В., Соловьев С.В.** Оценка эффективности мероприятий по снижению несимметрии и несинусоидальности в распределительных сетях 0,4–10 кВ // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – № 2(18). – С. 3–19.

9. **Наумов И.В., Федоринова Э.С., Якупова М.А.** Снижение несимметрии загрузки фаз и сокращение потерь электрической энергии в сетях 0,4 кВ ОГУЭП «ОБЛКОММУНЭНЕРГО» и ОАО «ИЭСК» // Научно-исследовательская деятельность аспирантов в решении приоритетных задач развития агропромышленного комплекса: материалы науч.-практ. конф., посвященной 70-летию аспирантуры Иркутского ГАУ, п. Молодежный, 06 декабря 2023 г. – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2023. – С. 163–167.

10. **Наумов И.В., Федоринова Э.С., Якупова М.А.** Устройство для управления несимметричными режимами в компонентах низковольтных систем электроснабжения // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 175–186.

11. **Воронин В.А.** О допустимых отклонениях напряжения для асинхронных двигателей // Сборник материалов VIII Всерос., науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием «Россия молодая», Кемерово, 19–22 апреля 2016 г. / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; отв. ред. О.В. Тайлаков. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2016. – С. 327.

12. **Дулепов Д.Е., Тюндина Т.Е.** Расчет несимметрии напряжений СЭС // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 4(47). – С. 35–42.

13. **Булатов Ю.Н., Крюков А.В.** Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на работу генераторов установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 3(35). – С. 40–49. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-3-40-49.

14. **Самарин Г.Н., Сукиасян С.М., Егоров М.Ю.** Проблема несимметрии напряжений в сельских сетях и ее решение посредством разработки устройства симметрирования напряжений // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 3. – С. 42–46.

15. **Наумов И.В.** Симметрирование режимов работы внутренних электрических трехфазных сетей как средство снижения пожарной опасности // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2021. – № 38. – С. 19–26.

16. **Лыкин А.В.** Электрические системы и сети: учебник [Электронный ресурс]. Лань: электронно-библиотечная система. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/118089

17. **Улучшение** показателей качества электроэнергии в распределительных сетях напряжением 0,4–10 кВ / Э.Ю. Абдуллазянов, С.Н. Зарипова, А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин // Энергетика Татарстана. – 2012. – № 1(25). – С. 3–7.

18. **Voltage** Unbalance Mitigation in Low Voltage Distribution Networks with Photovoltaic Systems / K.H. Chua, Y.S. Lim, J. Wong, et al. // Journal of Electronic Science and Technology. – 2012. – Vol. 10, Issue 1. – P. 1–6.

19. **Energy** management in unbalanced low voltage distribution networks with microgeneration and storage by using a multi-objective optimization algorithm / F.M. Camilo, R. Castro, M.E. Almeida, V. Fernão Pires // Journal of Energy Storage. – 2021. – Vol. 33. – P. 102100. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102100.

20. **Mitigation** of Voltage Unbalance in Low Voltage Distribution Network with High Level of Photovoltaic System / K.H. Chua, J. Wong, Y.S. Lim, et al. // Energy Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 495–501. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.066.

21. **Alabri W., Jayaweera D.** Voltage regulation in unbalanced power distribution systems with residential PV systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – Vol. 131. – P. 107036.

22. **Tang N.C., Chang G.W.** A stochastic approach for determining PV hosting capacity of a distribution feeder considering voltage quality constraints // Proceedings of the International Conference on Harmonics and Quality of Power, Ljubljana, Slovenia, 13–16 May 2018. – Ljubljana, Slovenia, 2018. – P. 1–5.

23. **Photovoltaic** Power Converter Management in Unbalanced Low Voltage Networks with Ancillary Services Support / F. Barrero-González, V.F. Pires, J.L. Sousa, et al. // Energies. – 2019. – Vol. 12, Issue 6. – P. 972. https://doi.org/10.3390/en12060972.

24. **LoadProfileGenerator:** An Agent-Based Behavior Simulation for Generating Residential Load Profiles / N. Pflugradt, P. Stenzel, L. Kotzur, D. Stolten // Journal of Open Source Software. – 2022. – Vol. 7, Issue 71. – P. 3574. https://doi.org/10.21105/joss.03574

25. **Кугучева Д.К., Харитонов М.С.** Некоторые решения по оценке потенциала и повышению эффективности использования энергии солнца на примере Калининградской области // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2021. – № 5(86). – С. 7–17. DOI: 10.37493/2307-907X.2021.5.1. – EDN RXUFZP.

26. **Кугучева Д.К., Харитонов М.С.** Оценка влияния условий эксплуатации на функционирование фотоэлектрических панелей // Балтийский морской форум: материалы IX Междунар. Балтийского морского форума. В 6 т. Т. 1. XIX Междунар. науч. конф., Калининград, 04–09 октября 2021 г. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2022. – С. 599–605. – EDN WCAOLQ.

27. **Methods** and Tools for PV and EV Hosting Capacity Determination in Low Voltage Distribution Networks – A Review / V. Umoh, I. Davidson, A. Adebiyi, U. Ekpe // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 3609. https://doi.org/10.3390/en16083609

28. **Additional** electric loss in rural distribution networks 0,38 kV / I. Naumov, D. Karamov, A. Tretyakov, et al. // E3S Web Conf. – 2020. – Vol. 209. – P. 07007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007

29. **Qemali M., Bualoti R., Celo M.** Voltage Stability Analysis in the Albanian Power System // Asian Online Journals (www.ajouronline.com) Asian Journal of Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 2. – P. 119–128.

30. **Stanchev P., Vacheva G., Hinov N.** Evaluation of Voltage Stability in Microgrid-Tied Photovoltaic Systems // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 4895. https://doi.org/10.3390/ en16134895.

31. **Section 5**: Power Flow: Energy Distribution Systems (Oregon State University). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: clck.ru/37KXHC.

32. **Seedahmed M., Mokred S., Kamara G.** Voltage Stability Estimation for Complex Power System Based on Modal Analytical Techniques // 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. – Noida, India, 2019. – P. 1035–1041. DOI: 10.1109/SPIN.2019.8711683.

33. **Оморов Т.Т.** Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 3. – С. 194–200.

References

1. Kharitonov, M.S., Kugucheva, D.K. Issledovanie vliyaniya ob"ektov mikrogeneratsii na uroven' napryazheniya v elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya [Study of the influence of microgeneration objects on the voltage level in low-voltage electrical networks]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2024, no. 1(82), pp. 34–43.

2. Zakaryukin, V.P., Kryukov, A.V. Utochnennaya metodika opredeleniya vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy smezhnykh liniy elektroperedachi [Refined methodology for determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2015, no. 3-4, pp. 29–35.

3. Soldatov, V.A., Popov, N.M. Raschet nesimmetrichnykh rezhimov setey 0,38 kV v faznykh koordinatakh [Calculation of asymmetric modes of 0,38 kV networks in phase coordinates]. *Trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skomhozyajstve», Moskva, 14–15 maya 2003 g.* [Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference “Power supply and energy saving in agriculture”, Moscow, May 14–15, 2003]. Moscow: VIESKh, 2003, part 1, pp. 136–141.

4. Zakaryukin, V.P., Kryukov, A.V., Tkhao, V.L. *Kompleksnoe modelirovanie mul'tifaznykh, mnogotsepnykh i kompaktnykh liniy elektroperedachi* [Integrated modeling of multiphase, multi-circuit and compact power transmission lines]. Irkutsk: IrGUPS, 2020. 296 p.

5. Frolov, Yu.M., Shelyakin, V.P. *Osnovy elektrosnabzheniya* [Basics of power supply]. Saint-Petersburg: Lan', 2022. Available at: https://e.lanbook.com/book/211058.

6. Furfari, F.A., Brittain, J. Charles LeGeyt Fortescue and the method of symmetrical components. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002, vol. 8(3), p. 7. DOI.org/10.1109/MIA.2002.999605.

7. Kosoukhov, F.D., Vasil'ev, N.V., Filippov, A.O. Snizhenie poter' ot nesimmetrii tokov i povyshenie kachestva elektricheskoy energii v setyakh 0,38 kV s kommunal'no-bytovymi nagruzkami [Reducing losses from current asymmetry and improving the quality of electrical energy in 0,38 kV networks with household loads]. *Elektrotekhnika*, 2014, no. 6, pp. 8–12.

8. Vendin, S.V., Kilin, S.V., Solov'ev, S.V. Otsenka effektivnosti meropriyatiy po snizheniyu nesimmetrii i nesinusoidal'nosti v raspredelitel'nykh setyakh 0,4–10 kV [Evaluation of the effectiveness of measures to reduce asymmetry and non-sinusoidality in distribution networks 0,4–10 kV]. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*, 2018, no. 2(18), pp. 3–19.

9. Naumov, I.V., Fedorinova, E.S., Yakupova, M.A. Snizhenie nesimmetrii zagruzki faz i sokrashchenie poter' elektricheskoy energii v setyakh 0,4 KV OGUEP «OBLKOMMUNENERGO» i OAO «IESK» [Reducing phase load asymmetry and reducing electrical energy losses in 0,4 kV networks of OGUEP “OBLKOMMUNENERGO” and JSC “IESK”]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchno-issledovatel'skaya deyatel'nost' aspirantov v reshenii prioritetnykh zadach razvitiya agropromyshlennogo kompleksa», posvyashchennoy 70-letiyu aspirantury Irkutskogo GAU, p. Molodezhnyy, 06 dekabrya 2023 g.* [Proceedings of the scientific-practical conference “Research activities of postgraduate students in solving priority problems of agricultural complex development”, dedicated to the 70th anniversary of postgraduate studies of Irkutsk State Agrarian University, Molodezhnyy, December 6, 2023]. Molodezhnyy: Irkutskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. A.A. Ezhevskogo, 2023, pp. 163–167.

10. Naumov, I.V., Fedorinova, E.S., Yakupova, M.A. Ustroystvo dlya upravleniya nesimmetrichnymi rezhimami v komponentakh nizkovol'tnykh sistem elektrosnabzheniya [Device for controlling asymmetric modes in components of low-voltage power supply systems]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 175–186.

11. Voronin, V.A. O dopustimykh otkloneniyakh napryazheniya dlya asinkhronnykh dvigateley [On permissible voltage deviations for asynchronous motors]. *Sbornik materialov VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya», Kemerovo, 19–22 aprelya 2016 g.* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with International Participation “Young Russia”, Kemerovo, April 19–22, 2016]. Kemerovo: Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2016, p. 327.

12. Dulepov, D.E., Tyundina, T.E. Raschet nesimmetrii napryazheniy SES [Calculation of voltage asymmetry of solar power plants]. *Vestnik NGIEI*, 2015, no. 4(47), pp. 35–42.

13. Bulatov, Yu.N., Kryukov, A.V. Vliyanie nelineynoy i nesimmetrichnoy nagruzki na rabotu generatorov ustanovok raspredelennoy generatsii [Influence of nonlinear and asymmetrical load on the operation of generators of distributed generation installations]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2017, no. 3(35), pp. 40–49. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-3-40-49.

14. Samarin, G.N., Sukiasyan, S.M., Egorov, M.Yu. Problema nesimmetrii napryazheniy v sel'skikh setyakh i ee reshenie posredstvom razrabotki ustroystva simmetrirovaniya napryazheniy [The problem of voltage asymmetry in rural networks and its solution through the development of a voltage balancing device]. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2013, no. 3, pp. 42–46.

15. Naumov, I.V. Simmetrirovanie rezhimov raboty vnutrennikh elektricheskikh trekhfaznykh setey kak sredstvo snizheniya pozharnoy opasnosti [Balancing operating modes of internal electrical three-phase networks as a means of reducing fire danger]. *Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki*, 2021, no. 38, pp. 19–26.

16. Lykin, A.V. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Novosibirsk: NGTU, 2017. Available at: https://e.lanbook.com/book/118089

17. Abdullazyanov, E.Yu., Zaripova, S.N., Fedotov, A.I., Akhmetshin, A.R. Uluchshenie pokazateley kachestva elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh napryazheniem 0,4–10 kV [Improving power quality

indicators in distribution networks with voltage 0,4–10 kV]. *Energetika Tatarstana*, 2012, no. 1(25), pp. 3–7.

18. Chua, K.H., Lim, Y.S., Wong, J., Taylor, P., Morris, E., Morris, S. Voltage Unbalance Mitigation in Low Voltage Distribution Networks with Photovoltaic Systems. *Journal of Electronic Science and Technology,* 2012, vol. 10, issue 1, pp. 1–6.

19. Camilo, F.M., Castro, R., Almeida, M.E., Pires, F.V. Energy management in unbalanced low voltage distribution networks with microgeneration and storage by using a multi-objective optimization algorithm. *Journal of Energy Storage,* 2021, vol. 33, p. 102100. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102100.

20. Chua, K.H., Wong, J., Lim, Y.S., Taylor, P., Morris, E., Morris, S. Mitigation of Voltage Unbalance in Low Voltage Distribution Network with High Level of Photovoltaic System. *Energy Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 495–501. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.066.

21. Alabri, W., Jayaweera, D. Voltage regulation in unbalanced power distribution systems with residential PV systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 131, p. 107036.

22. Tang, N.C., Chang, G.W. A stochastic approach for determining PV hosting capacity of a distribution feeder considering voltage quality constraints. *Proceedings of the International Conference on Harmonics and Quality of Power, Ljubljana, Slovenia, 13–16 May 2018*. Ljubljana, Slovenia, 2018, pp. 1–5.

23. Barrero-González, F., Pires, V.F., Sousa, J.L., Martins, J.F., Milanés-Montero, M.I., González-Romera, E., Romero-Cadaval, E. Photovoltaic Power Converter Management in Unbalanced Low Voltage Networks with Ancillary Services Support. *Energies*, 2019, vol. 12, p. 972. https://doi.org/10.3390/en12060972

24. Pflugradt, N., Stenzel, P., Kotzur, L., Stolten, D. LoadProfileGenerator: An Agent-Based Behavior Simulation for Generating Residential Load Profiles. *Journal of Open Source Software*, 2022, vol. 7, issue 71, p. 3574. https://doi.org/10.21105/josP.03574

25. Kugucheva, D.K., Kharitonov, M.S. Nekotorye resheniya po otsenke potentsiala i povysheniyu effektivnosti ispol'zovaniya energii solntsa na primere Kaliningradskoy oblasti [Some solutions for assessing the potential and increasing the efficiency of using solar energy using the example of the Kaliningrad region]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*, 2021, no. 5(86), pp. 7–17. DOI: 10.37493/2307-907X.2021.5.1. EDN RXUFZP.

26. Kugucheva, D.K., Kharitonov, M.S. Otsenka vliyaniya usloviy ekspluatatsii na funktsionirovanie fotoelektricheskikh paneley [Assessing the influence of operating conditions on the functioning of photovoltaic panels]. *Materialy IX Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. V 6 t. T. 1. XIX Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, Kaliningrad, 04–09 oktyabrya 2021 g.* [Proceedings of the IX International Baltic Maritime Forum. In 6 vols. Vol. 1. XIX International Scientific Conference, Kaliningrad, October 4–9, 2021]. Kaliningrad: Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2022, pp. 599–605.

27. Umoh, V., Davidson, I., Adebiyi, A., Ekpe, U. Methods and Tools for PV and EV Hosting Capacity Determination in Low Voltage Distribution Networks – A Review. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 3609. https://doi.org/10.3390/en16083609

28. Naumov, I., Karamov, D., Tretyakov, A., Fedorinova, E., Yakupova, M. Additional electric loss in rural distribution networks 0,38 kV. *E3S Web Conf*., 2020, vol. 209, p. 07007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007

29. Qemali, M., Bualoti, R., Celo, M. Voltage Stability Analysis in the Albanian Power System. Asian Online Journals (www.ajouronline.com) *Asian Journal of Engineering and Technology*, 2014, vol. 2, pp. 119–128.

30. Stanchev, P., Vacheva, G., Hinov, N. Evaluation of Voltage Stability in Microgrid-Tied Photovoltaic Systems. *Energies*, 2023, vol. 16, p. 4895. https://doi.org/10.3390/ en16134895

31. Section 5: Power Flow: Energy Distribution Systems (Oregon State University). Available at: clck.ru/37KXHC.

32. Seedahmed, M., Mokred, S., Kamara, G. Voltage Stability Estimation for Complex Power System Based on Modal Analytical Techniques. *6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks*. Noida, India, 2019, pp. 1035–1041. DOI: 10.1109/SPIN.2019.8711683.

33. Omorov, T.T. Simmetrirovanie raspredelennoy elektricheskoy seti metodom tsifrovogo regulirovaniya [Balancing of a distributed electrical network using the digital control method]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 194–200.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-185.7

Юрий Борисович Казаков
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: dr.kazakov@mail.ru

Иван Сергеевич Егоров
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: elmash@em.ispu.ru

Электротехническая система преобразования энергии колебаний на основе совместной работы линейного генератора и магнитожидкостного демпфера

Авторское резюме

Состояние вопроса. Линейные генераторы, применяемые, в том числе, как автономные источники электроэнергии и электромеханические амортизаторы, преобразуют энергию колебаний в электрическую энергию с линейным возвратно-поступательным движением индуктора. ЭДС генератора имеет несинусоидальную форму из-за высших пространственных и временных гармоник. Изменение скорости движения индуктора определяется характером воздействующих усилий, но при анализе обычно принимается гармоническим при синусоидальном распределении магнитной индукции. Снижение гармоник ЭДС возможно в электротехнической системе, содержащей линейный генератор и магнитожидкостный демпфер, за счет совершенствования конструкций на основе уточненного анализа.
Материалы и методы. Снижение пространственных гармоник ЭДС осуществлено путем совершенствования зубцовой зоны и обмотки якоря, применения магнитной жидкости, снижения временных гармоник за счет обеспечения электротехнической системой необходимого изменения линейной скорости индуктора. Анализ проведен в пакетах ANSYS Electronics Desktop, ANSYS MAXWELL и Elcut.
Результаты. Разработана электротехническая система преобразования энергии колебаний на основе линейного генератора и магнитожидкостного демпфера, описаны ее функции, особенности и режимы работы. Разработаны совмещенные конструкции устройства, трехфазная совмещенная обмотка с повышенной на 2 % ЭДС и сниженным на 20 % коэффициентом искажения синусоидальности. Предложены математические аналитическая и численная на основе конечно-элементного моделирования методики расчета характеристик.
Выводы. Разработанная электротехническая система позволяет эффективно перераспределять энергию колебаний между линейным генератором и магнитожидкостным демпфером, обеспечивает снижение высших гармоник в ЭДС. Применение управляемой магнитным полем магнитной жидкости позволяет регулировать силу сопротивления движению индуктора, осуществлять управляемую вязкостную диссипацию энергии в слоях жидкости, демпфирование колебаний, увеличивать магнитную проводимость зазора, повышать магнитный поток, снижать пульсации зубцовых гармоник магнитной индукции, повышать теплоотвод от магнитов и обмоток, обеспечивать эффективную смазку.

Ключевые слова: энергия колебаний, электротехническая система**,** линейный генератор, магнитожидкостный демпфер, совмещенная конструкция ЛГ–МЖД, конечно-элементное моделирование

© Казаков Ю.Б., Егоров И.С., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 67–74.

Yurii Borisovich Kazakov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dr.kazakov@mail.ru

Ivan Sergeevich Egorov
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, e-mail: elmash@em.ispu.ru

Electrical system for converting vibration energy based on the combined operation of a linear generator and a magnetic fluid damper

Abstract

Background. Linear generators used as autonomous sources of electric power and electromechanical shock absorbers convert vibration energy into electric energy with a linear reciprocating motion of the inductor. The EMF of the generator has a non-sinusoidal shape due to higher spatial and temporal harmonics. The change in the speed of the inductor is determined by the nature of the acting forces, but during the analysis, it is usually taken as harmonic with a sinusoidal distribution of magnetic induction. Reduction of EMF harmonics is possible in an electrical system with a linear generator and a magnetic liquid damper, by improving the designs based on a refined analysis.
Materials and methods. The reduction of spatial harmonics of EMF has been achieved by improving the tooth zone and armature winding, using magnetic fluid. The reduction of time harmonics has been achieved by providing the electrical system with the necessary change in the linear speed of the inductor. The analysis has been carried out using the ANSYS Electronics Desktop, ANSYS MAXWELL and Elcut packages.
Results. An electrical system to convert vibration energy based on a linear generator and a magnetic liquid damper has been developed; its functions, features and operating modes have been described. The authors have developed combined device designs, a three-phase combined winding with an EMF increased by 2 % and a sinusoidal distortion coefficient reduced by 20 %. Mathematical analytical and numerical methods to calculate characteristics based on finite element modeling have been proposed.
Conclusions. The developed electrical system allows efficient redistribution of vibration energy between the linear generator and the magnetic liquid damper and ensures reduction of higher harmonics in the EMF. The use of magnetic liquid controlled by a magnetic field allows us to regulate the resistance force to the inductor movement, to control viscous energy dissipation in liquid layers, to dampen vibrations, to increase the magnetic conductivity of the gap and the magnetic flux, to reduce the pulsations of the tooth harmonics of magnetic induction, to increase heat removal from magnets and winding, and to ensure efficient lubrication.

Key words: vibration energy, electrical system, linear generator, magnetic fluid damper, combined design of LG-MFD, finite element modeling

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.067-074

Состояние вопроса. Линейные генераторы (ЛГ) применяются в качестве автономных источников электроэнергии для питания территориально удаленных устройств, подводных и космических аппаратов, в качестве электромеханических амортизаторов с электромагнитным демпфированием колебаний кузова при движении транспортных средств и др. ЛГ преобразуют энергию колебаний в электрическую энергию при линейном возвратно-поступательном движении возбужденного индуктора – подвижного элемента (ПЭ), относительно неподвижных якорных обмоток [1–3]. ЛГ могут работать с приводом от резервуаров со сжатым газом при стравливании дискретных порций газа через мембранно-клапанную систему, или от подвески транспортных средств, или от свободно-поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) без промежуточного кривошипно-шатунного механизма, или от двигателей Стирлинга.

Характер изменения линейной скорости движения ПЭ определяется характером изменения воздействующих усилий и может быть усложненным, как например, в рабочем цикле поршневых ДВС на этапах сжатия и воспламенения горючей смеси и последующего ее расширения в цилиндрах (рис. 1)[1].

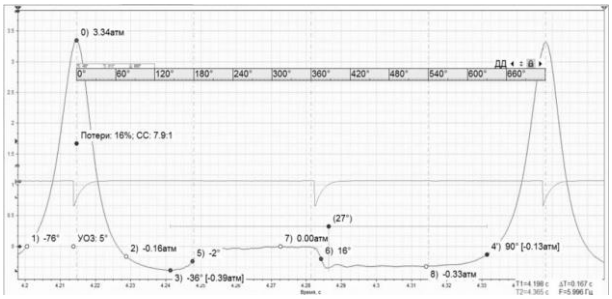


Рис. 1. Осциллограмма изменения давления в цилиндре ДВС а/м ВАЗ-21114 на этапах рабочего цикла

Генерируемая в обмотке якоря традиционных ЛГ электродвижущая сила (ЭДС) обычно имеет несинусоидальную форму из-за наличия высших пространственных и временных гармоник. Для генераторов с приводом от ДВС коэффициент искажения синусоидальности напряжения

[1] Сайт https://rotkee.com/ru/waveform-library (Дата обращения 11.07.2024).

Ku не должен превышать 8 %[2]. В связи с этим целесообразна разработка мероприятий, обеспечивающих снижение высших гармоник в ЭДС ЛГ.

Анализ работы ЛГ часто проводится с допущениями о гармоническом законе изменения линейной скорости движения индуктора ЛГ при возвратно-поступательном движении ПЭ и синусоидальном изменении индукции в зазоре ЛГ [4–5]. Оценка мер по снижению высших гармоник в ЭДС ЛГ должна проводиться на основе уточненных методик расчета ЛГ с использованием численного моделирования магнитного поля в ЛГ с учетом нелинейности магнитных характеристик, зубчатости сердечников и дискретности распределения витков обмотки по пазам, а также с использованием моделирования динамических режимов ЛГ с учетом рабочего цикла источника колебаний и временного характера изменения действующих сил.

Конструкции и материалы. Зубчатость сердечника якоря и явнополюсность индуктора ЛГ вызывают при линейном возвратно-поступательном движении ПЭ спектры гармоник магнитной проводимости зазора ЛГ и магнитной индукции, пространственные гармоники ЭДС в дискретно распределенной обмотке якоря. Снижение пульсаций индукции в зазоре ЛГ с приближением распределения индукции к синусоидальному возможно за счет корректного выбора числа пазов, совершенствования конструкции зубцово-пазовой зоны и структуры обмотки якоря, заполнения зазора магнитной жидкостью (МЖ).

При неравномерности линейной скорости индуктора в обмотке наводится ЭДС изменяемой величины и частоты, появляются временные гармоники ЭДС. Снижение временных гармоник возможно обеспечением требуемого характера изменения скорости движения индуктора.

Гармоники напряжения ЛГ могут быть сглажены последующим управляемым полупроводниковым выпрямителем в сочетании с преобразователями напряжения и частоты, рассчитанными на полную мощность ЛГ, выходное напряжение которого все равно может быть не строго синусоидальной формы.

Другим способом выработки в ЛГ электроэнергии с синусоидальным напряжением при неравномерной линейной скорости движения ПЭ может быть разделение энергии колебаний на две части: 1) частично на диссипацию энергии в управляемом магнитожидкостном демпфере (МЖД) [6–7]; 2) преобразованием другой части энергии в ЛГ в электрическую энергию требуемых параметров. Совместную работу в раздельных ЛГ и МЖД можно реализовать в составе электротехнической системы преобразования энергии колебаний (рис. 2) [8].

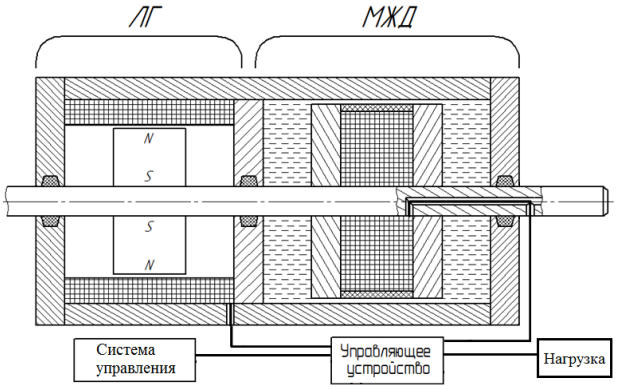


Рис. 2. Совместная работа раздельных линейного генератора и магнитожидкостного демпфера в составе электротехнической системы

Система управления через управляющее устройство перераспределяет энергию колебаний ПЭ между ЛГ и МЖД. Например, при необходимости поглощения излишней механической энергии при ее резком изменении основную роль может брать на себя МЖД. Работа электротехнической системы возможна с реализацией нескольких режимов: рекуперативное торможение (энергия торможения преобразуется в электрическую энергию и выдается в сеть), динамическое торможение, нагрузочный режим (подключение к обмотке ЛГ электрических нагрузок разного характера: активной, индуктивной, емкостной, смешанной), режим активного управления от контроллера.

Так как для наведения в обмотке якоря синусоидальной ЭДС постоянной частоты при синусоидальном изменении индукции в зазоре требуется постоянная скорость движения индуктора, то основная задача системы управления должна заключаться в поддержании как можно дольше на этапах рабочего цикла постоянной скорости движения индуктора с быстрым набором им скорости в начале цикла работы и быстрым же замедлением в конце цикла. Временной график изменения скорости движения индуктора на рабочем цикле должен представлять трапецию с как можно более короткими временными интервалами набора и снижения скорости. В этом случае временные гармоники ЭДС в обмотке якоря ЛГ будут снижены.

Функции ЛГ и МЖД можно совместить в одной цилиндрической конструкции (рис. 3) [9].

Совмещенная конструкция ЛГ–МЖД содержит кольцевые катушки в пазах неподвижного якоря. В индукторе расположены кольцевые полюсы, между которыми располагаются кольцевые постоянные магниты осевой намагниченности. Применение в индукторе магнитов повышает удельную мощность и КПД ЛГ по сравнению с использованием обмотки возбуждения,

[2] ГОСТ Р 53986-2010«Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателей внутреннего сгорания».

исключает организацию подвода тока в обмотку движущегося индуктора.

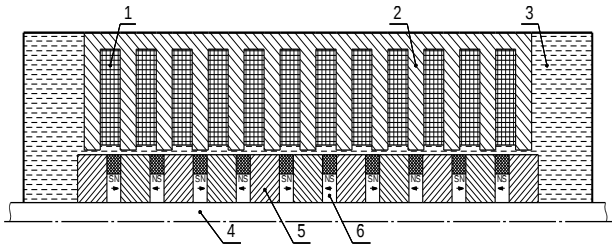


Рис. 3. Совмещенная конструкция ЛГ и МЖД: 1 – обмотка якоря; 2 – сердечник якоря; 3 – МЖ; 4 – шток; 5 – полюс индуктора; 6 – магнит

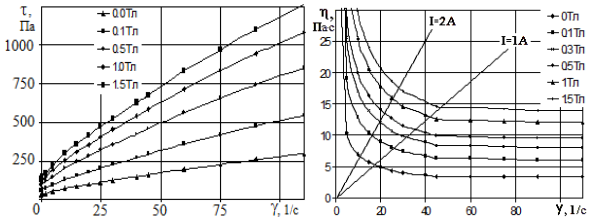
Использование в ЛГ большого числа полюсов 2*p* позволяет снизить требуемую толщину спинки якоря и, соответственно, уменьшить внешний диаметр ЛГ, но требует большего числа пазов в удлиненном якоре. Для уменьшения числа пазов в многополюсных ДГ возможно использование кольцевых сосредоточенных обмоток с числом пазов на полюс и фазу $q < 1$. Применение распределенной по пазам обмотки позволяет снизить пространственные гармоники в кривой ЭДС. Дополнительное снижение влияния пространственных гармоник ЭДС в трехфазных дискретно распределенных обмотках также возможно путем использования совмещенной двухслойной обмотки [10] с последовательно соединенными частями обмотки, собранными по схемам «звезда» и «треугольник».

Зазор и концевые зоны совмещенной конструкции ЛГ–МЖД заполняются МЖ. Применение МЖД с управляемой магнитным полем МЖ в составе электротехнической системы преобразования энергии колебаний позволяет регулировать силу сопротивления МЖД движению ПЭ, осуществлять управляемую вязкостную диссипацию энергии в слоях МЖ, реализовать демпфирование колебаний. В отличие от применения пружины в электромеханических амортизаторах [3], где возникает механический колебательный процесс, применение МЖ предотвращает возникновение колебательных процессов.

В МЖ при воздействии магнитного поля изменяется вязкость η и положение МЖ. В отличие от ньютоновской жидкости МЖ имеет нелинейную реологическую характеристику, нелинейную зависимость η от концентрации магнитных частиц в МЖ и скорости сдвига слоев МЖ $\gamma = dv_{мж}/dr$, где $v_{мж}$ – скорость течения МЖ; r – координатная ось, перпендикулярная направлению скорости $v_{мж}$. Индуктор и МЖ перемещаются вдоль зазора ЛГ в противоположных направлениях. Скорость течения МЖ $v_{мж}$ и скорость движения индуктора $v_{пэ}$ различаются в соотношении различия объемов индуктора и МЖ (обычно $v_{мж} >> v_{пэ}$).

В статическом режиме при воздействии магнитного поля в МЖ формируется структура из магнитных частиц. Для приведения МЖ в движение необходимо приложить усилие страгивания. Начавшееся от состояния покоя движение МЖ приводит к разрушению структуры частиц и снижению силы сопротивления структуры. С ростом $v_{мж}$ увеличивается вязкостная сила сопротивления МЖ. МЖ можно рассматривать как вязкопластичное тело с динамическим напряжением сдвига МЖ $\tau_д$. При начавшемся движении напряжение сдвига слоев МЖ определяется как $\tau = (\tau_д + k\gamma)$, где k – коэффициент для данной МЖ; $\eta = \tau/\gamma$ – динамическая вязкость.

Воздействие магнитной индукции B усиливает взаимодействие магнитных частиц в МЖ, увеличивает η, $\tau_д$ и τ (рост может быть более чем на порядок). Изменение B и $v_{мж}$ приводит к изменениям свойств МЖ с миллисекундными задержками. Возникающий при электрической нагрузке ЛГ ток обмотки якоря I создает подмагничивающее действие на МЖ, изменяя η и τ. Таким образом, МЖ обладает нелинейными характеристиками: $\tau = f(B, v_{мж}, I)$, $\eta = f(B, v_{мж}, I)$ (рис. 4).



а) б)

Рис. 4. Магнитореологические характеристики МЖ: а – напряжение сдвига; б – вязкость

Размещение МЖ в зазоре увеличивает его магнитную проводимость и несколько повышает магнитный поток, снижает пульсации зубцовых гармоник магнитной индукции в зазоре вследствие магнитного сглаживания зубчатости сердечника. МЖ в качестве охлаждающей среды повышает теплоотвод от магнитов и обмоток, улучшает условия охлаждения.

При работе удлиненных ЛГ при значительном рабочем ходе индуктора может возникнуть проблема со смазкой скользящих поверхностей. При прогибе индуктора возможно выдавливание традиционных смазок из зоны трения. Обычные смазки могут обеспечить гидродинамическое «всплывание» перемещающегося индуктора и низкий коэффициент трения $K_{ТР}$ в подшипниках скольжения и индуктора только при высоких линейных скоростях ПЭ, для околонулевых скоростей возможно почти «сухое» трение со значительным повышением $K_{ТР}$. Обычные смазки выносятся из зоны трения во время движения индуктора.

МЖ обеспечивает хорошие смазочные свойства [11], обволакивая полюсы и магниты индуктора, зубцы якоря, заполняя неровности

поверхностей скольжения. МЖ удерживается магнитным полем в зазоре, в том числе в зонах трения подшипников скольжения, что обеспечивает жидкостную смазку по всей длине индуктора и его «всплывание» при разных линейных скоростях. При использовании МЖ $K_{ТР}$ может снизиться на порядок по сравнению с «сухим» трением скольжения [11].

Расчетные модели и методы. При работе системы ЛГ–МЖД силе $F_{ШТ}(t)$ от источника колебаний, заставляющей ПЭ (шток вместе с индуктором ЛГ) совершать движение, противодействуют электромагнитная сила ЛГ $F_{ЭЛГ}(t)$, сила сопротивления МЖД $F_{МЖД}(t)$ и сила трения элементов конструкции ЛГ–МЖД $F_{ТР}$ (рис. 5).

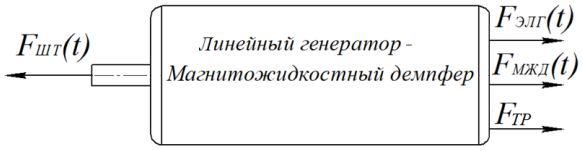


Рис. 5. Баланс сил в системе

Характер перемещения ПЭ массой $G_{ПЭ}$ с линейной скоростью $v_{ПЭ}(t)$ в координате $x_{ПЭ}(t)$ определяется дифференциальным уравнением баланса сил:

$$F_{ПЭ}(t) = F_{ШТ}(t) - F_{ЭЛГ}(t) - F_{МЖД}(t) - F_{ТР} = \\ = G_{ПЭ}\frac{dv_{ПЭ}(t)}{dt} = G_{ПЭ}\left(\frac{d^2x_{ПЭ}(t)}{dt^2}\right). \quad (1)$$

Вызывающая колебания сила приводного механизма $F_{ШТ}(t)$ задается временной зависимостью (см. рис. 1).

Создаваемая в МЖД сила сопротивления рассчитывается как

$$F_{МЖД}(t) = F_{\tau}(t) + F_{\eta}(t) = \frac{cL_{ПЭ}S_{ПЭ}\tau_{д}(B, v_{МЖ}, I)}{2R} + \\ + \frac{3L_{ПЭ}S_{ПЭ}\left[Q + Rwv_{МЖ}(t)\right]\eta(B, v_{МЖ}, I)}{2QwR^3}, \quad (2)$$

где $F_{\tau}(t)$ – сила, вызываемая напряжением сдвига МЖ; c – константа, зависящая от МЖ и конструкции МЖД; R – величина зазора; $L_{ПЭ}$, $S_{ПЭ}$ – длина (рабочий ход, обычно равный длине ПЭ) и сечение ПЭ; $F_{\eta}(t)$ – сила вязкостного сопротивления трения слоев МЖ; w – окружная длина щелевого канала МЖД; Q – расход МЖ; I – ток якоря ЛГ.

Сила трения составляет

$$F_{тр} = K_{тр}\left(P \pm F_{м.тяж}\right), \quad (3)$$

где P – сила тяжести ПЭ; $F_{м.тяж}$ – сила одностороннего магнитного тяжения, возникающая в протяженном ЛГ–МЖД при эксцентриситете ε_0 воздушного зазора δ:

$$F_{м.тяж} = 294000DL_{ПЭ}\varepsilon_0 / \delta. \quad (4)$$

Электромагнитная сила ЛГ составляет

$$F_{ЭЛГ}(t) = mB_{\delta}(t)\, I(t)\, W\, l, \quad (5)$$

где $B_{\delta}(t)$ – магнитная индукция в зазоре; m – число фаз; l, W – длина витка и число витков фазы обмотки якоря.

Так как наводимая в проводнике обмотки якоря ЛГ ЭДС определяется как

$$E_{пр} = B_{пр}\, l_{пр}\, v_{пр}, \quad (6)$$

где $B_{пр}$ – магнитная индукция в зоне проводника; $l_{пр}$ – длина проводника; $v_{пр}$ – линейная скорость движения проводника, то для заданной $l_{пр}$ наводимая $E_{пр}$ будет иметь синусоидальную форму при синусоидальном изменении $B_{пр}$ и постоянной $v_{пр}$. Несинусоидальное распределение $B_{пр}$ в зазоре ЛГ и/или изменяющаяся во времени $v_{пр}$ не обеспечивают синусоидальную форму $E_{пр}$.

При гармоническом возвратно-поступательном движении ПЭ линейная скорость составляет

$$v_{ПЭ}(t) = v_{ПЭ.max}\sin(\omega_x t), \quad (7)$$

где $v_{ПЭ.max} = L_{ПЭ}\pi f_x = x_{ПЭ.max}\omega_x$ – амплитуда скорости движения ПЭ; $\omega_x = 2\pi f_x$ – угловая частота изменения $x_{ПЭ}(t)$; f_x – механическая частота колебаний штока.

Изменение координаты ПЭ составляет

$$x_{ПЭ}(t) = -\frac{v_{ПЭ.max}}{\omega_x}\cos(\omega_x t). \quad (8)$$

В фазе обмотки якоря ЛГ наводится ЭДС

$$E_{ф}(t) = B_{\delta}(t)\frac{dx_{ПЭ}(t)}{dt} l\, W. \quad (9)$$

При синусоидальном изменении индукции в зазоре по длине полюсного деления индуктора магнитная индукция составляет

$$B_{\delta}(t) = -B_{\delta.max}\sin(2\pi f_e t), \quad (10)$$

где $f_e = f_x L_{ПЭ}/h_{пол}$ – частота изменения B_{δ}; $B_{\delta.max}$ – максимальная индукция в зазоре; $h_{пол}$ – длина полюсного деления, при этом соотношение $L_{ПЭ}/h_{пол}$ должно составлять целое число полюсов $2p$ ЛГ.

В фазе обмотки якоря наводится ЭДС [5]

$$E_{ф}(t) = 2B_{\delta.max}\cos\left(\frac{2\pi L_{ПЭ}}{h_{пол}} f_x t\right) L_{ПЭ}\pi \times \\ \times f_x \sin(2\pi f_x t) l\, W. \quad (11)$$

Произведение двух гармонических функций в (11) – линейной скорости (7) и индукции (10) – дает несинусоидальную форму ЭДС. В трехфазном ЛГ при пространственном сдвиге катушек фаз на 1/3 двухполюсного деления ЭДС фаз сдвинуты во времени на 1/3 периода и имеют несимметрию по амплитуде (рис. 6).

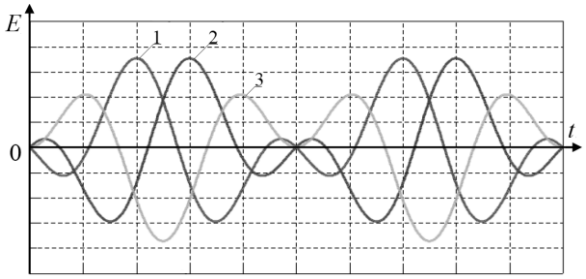


Рис. 6. Графики изменения фазных ЭДС: 1 – E_B; 2 – E_C; 3 – E_A

Электрический расчет системы «ЛГ–электрическая нагрузка» осуществляется на основе уравнения баланса электрического равновесия. При подключении нагрузки к обмотке ЛГ возникает ток $I(t)$, который создает собственное магнитное поле – поле реакции якоря, влияющее на МЖ. Поскольку $E_ф$ и I пропорциональны $v_{ПЭ}$ и, соответственно, γ, изменение тока $I(t)$ приводит к смещению рабочей точки МЖ на магнитореологической характеристике. При регулировке $I(t)$, например, в зависимости от условий работы происходит изменение вязкости МЖ $\eta(\gamma,B,I)$ (рис. 4,б) и усилий ЛГ (5) и МЖД (2).

Совместная работа ЛГ и МЖД имеет свои особенности. В ЛГ при $v_{ПЭ} = 0$, $E_ф = 0$, $I = 0$ и $F_{ЭЛГ} = 0$, т. е. при не начавшем движении ПЭ, ЛГ не создает демпфирующего усилия и подмагничивания МЖ. С ростом $v_{ПЭ}$ возрастают $E_ф$ и I, демпфирующее усилие $F_{ЭЛГ}$, возникает подмагничивание МЖ. В МЖД в начале движения штока при $\gamma = 0$ вследствие структурирования магнитных частиц в МЖ создается значительная $F_{МЖД}$.

Для расчетного анализа работы электротехнической системы использовалось моделирование магнитных полей и динамических процессов в пакетах ANSYS Electronics Desktop, ANSYS MAXWELL и Elcut.

Результаты. Разработан и проанализирован вариант конструкции трехфазного многополюсного ЛГ–МЖД с $2p = 10$ и $q = 2/5$, что обеспечивает небольшой наружный диаметр устройства при малом числе пазов $Z = 12$. Рассматривались кольцевые однослойная и двухслойная обмотки, в том числе совмещенная с последовательным соединением схем «звезда» и «треугольник» (рис. 7).

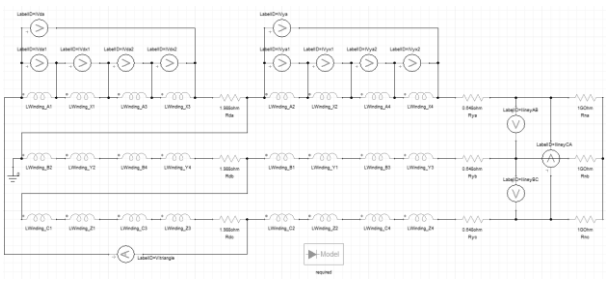
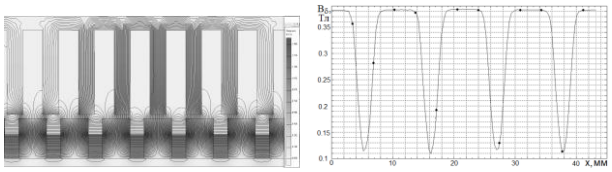


Рис. 7. Расчетная схема совмещенной двухслойной обмотки ЛГ–МЖД

В конструкции использованы редкоземельные магниты, размеры магнитной системы по результатам конечно-элементного моделирования подобраны так, чтобы $B_{δ.max}$ не превышало 0,4 Тл (рис. 8) для возможности реагирования магнитной системы на процессы подмагничивания и размагничивания МЖ током якоря.



а) б)

Рис. 8. Распределение линий магнитного потока в ЛГ–МЖД (а) и модуля индукции в зазоре (б)

Результаты конечно-элементного моделирования позволяет рассчитать изменения параметры ЛГ–МЖД. Выяснено, что амплитуда ЭДС ЛГ с совмещенной обмоткой на 2 % больше за счет повышения коэффициента распределения, чем у несовмещенной обмотки, а коэффициент искажения синусоидальности ЭДС для совмещенной обмотки на 20 % меньше, чем для стандартной обмотки.

Работа ЛГ на трехфазный шестидиодный выпрямитель вызывает значительные пульсации выходного напряжения (рис. 9). Результаты анализа частоты и, соответственно, амплитуды наводимой фазной ЭДС (рис. 10) показывают необходимость учета изменений $f_x(t)$ (7) и, соответственно, $f_e(t)$ (10) при неравномерности $v_{ПЭ}(t)$.

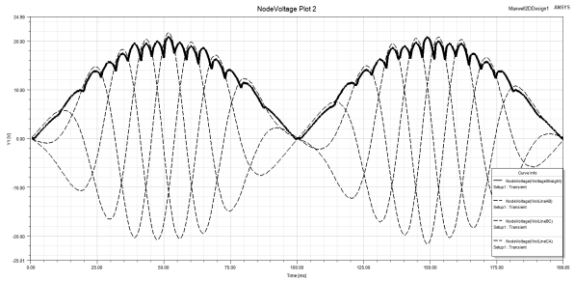


Рис. 9. Линейные и выпрямленное напряжения ЛГ

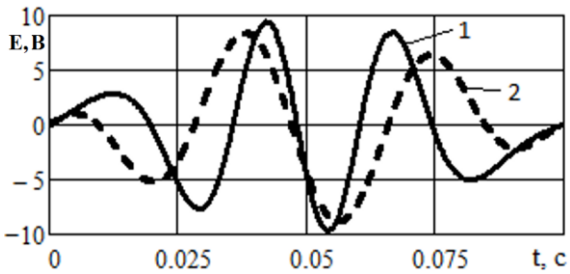


Рис. 10. ЭДС в фазе: 1 – при учете изменения $f_x(t)$ при неравномерности $v_{ПЭ}(t)$; 2 – $f_x(t)$ = const

Выводы. Напряжение линейных генераторов, преобразующих энергию колебаний в электрическую энергию с линейным возвратно-

поступательным движением индуктора, имеет несинусоидальную форму, содержит высшие пространственные и временные гармоники вследствие зубчатости сердечника якоря и явнополюсности индуктора, дискретности распределения обмотки якоря, неравномерности линейной скорости движения индуктора.

Разработанная электротехническая система преобразования энергии колебаний на основе совместной работы линейного генератора и магнитожидкостного демпфера позволяет осуществлять эффективное перераспределение энергии колебаний индуктора между линейным генератором и магнитожидкостным демпфером, что может обеспечить выходное напряжение требуемой формы.

Разработанные совмещенные конструкции линейного генератора и магнитожидкостного демпфера, структура трехфазной обмотки, в том числе эффективной совмещенной обмотки, применение управляемой магнитным полем магнитной жидкости позволяют регулировать силу сопротивления движению штока, осуществлять управляемую вязкостную диссипацию энергии в слоях жидкости, реализовать демпфирование колебаний, увеличить магнитную проводимость зазора, повысить магнитный поток, снизить пульсации зубцовых гармоник магнитной индукции, повысить теплоотвод от магнитов и обмоток, улучшить условия их охлаждения, обеспечить эффективную смазку поверхностей трения.

Предложенные математические аналитическая и численная на основе конечно-элементного моделирования методики расчета характеристик совмещенных линейного генератора и магнитожидкостного демпфера позволили выявить, что амплитуда ЭДС линейного генератора с совмещенной обмоткой на 2 % больше за счет повышения коэффициента распределения, коэффициент искажения синусоидальности ЭДС для совмещенной обмотки на 20 % меньше, чем для стандартной обмотки, работа ЛГ на трехфазный выпрямитель при движении индуктора по гармоническому закону вызывает значительные пульсации выходного напряжения.

Список литературы

1. **Хитерер М.Я., Овчинников И.Е.** Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: Корона принт, 2013. – 357 с.

2. **Линейные** электрические машины возвратно-поступательного действия – области применения / В.Б. Баль, В.Я. Геча, В.И. Гончаров и др. // Вопросы электромеханики. – 2015. – Т. 149. – С. 3–17.

3. **Соколова Е.М., Мощинский Ю.А., Шумов К.В.** Линейный генератор с постоянными магнитами в схеме электрического амортизатора // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 2(39). – С. 70–74.

4. **Математическое** моделирование и определение параметров регулирования линейной электрической машины возвратно-поступательного действия / П.Г. Колпахчьян, В.Г. Щербаков, А.Е. Кочин, А.Р. Шайхиев // Электротехника. – 2017. – № 5. – С. 18–24.

5. **Обзор** технических решений и методов проектирования линейных электрических генераторов с постоянными магнитами / А.С. Крамаров, Д.В. Батищев, А.В. Павленко, И.В. Троценко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 6. – С. 36–51.

6. **Randin D., Abakumov A., Goryachkin A.** Research of a nonlinear vibration isolation system with a controlled magnetorheological damper // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – С. 773–783.

7. **Accurate** and fast estimation for field-dependent nonlinear damping force of meandering valvebased magnetorheological damper using extreme learning machine method / I. Bahiuddin, F. Imaduddin, S.A. Mazlan, et al. // Sensors Actuators A Phys. – 2021. – Vol. 318. – P. 112479.

8. **Пат**. на полезную модель 205731 U1. Магнитожидкостный электромеханический демпфер / С.А. Нестеров, И.С. Егоров, Н.А. Морозов; заяв. № 2021112961 от 04.05.2021; опубл. 30.07.2021.

9. **Казаков Ю.Б., Егоров И.С., Нестеров С.А.** Магнитожидкостный демпфер – линейный генератор // XXI Всерос. с междунар. участием Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. – Иваново, 2024. – С. 198–204.

10. **The Use** of Combined Star–Triangle Windings in Three-Phase Electric Motors: a Refined Analysis / Y.B. Kazakov, D.S. Smirnov, M.A. Kiselev, et al. // Russian Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 95, No. 3. – P. 165–174.

11. **Линейный** двигатель-маховик с магнитной смазкой / В.Я. Геча, А.Б. Захаренко, Н.А. Белокурова, А.К. Надкин // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 72–75.

References

1. Khiterer, M.Ya., Ovchinnikov, I.E. *Sinkhronnye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* [Synchronous electric machines with reciprocating motion]. Saint-Petersburg: Korona print, 2013. 357 p.

2. Bal', V.B., Gecha, V.Ya., Goncharov, V.I., Ezhov, E.V., Chirkin, V.G., Shirinskiy, S.V., Lezhnev, L.Yu. Lineynye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo deystviya – oblasti primeneniya [Linear electric machines with reciprocating action – areas of application]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2015, vol. 149, pp. 3–17.

3. Sokolova, E.M., Moshchinskiy, Yu.A., Shumov, K.V. Lineynyy generator s postoyannymi magnitami v skheme elektricheskogo amortizatora [Mathematical modeling and determination of control parameters of a linear electric reciprocating machine]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2018, no. 2(39), pp. 70–74.

4. Kolpakhch'yan, P.G., Shcherbakov, V.G., Kochin, A.E., Shaykhiev, A.R. Matematicheskoe modelirovanie i opredelenie parametrov regulirovaniya lineynoy elektricheskoy mashiny vozvratno-postupatel'nogo deystviya [Mathematical modeling and determination of control parameters of a linear electric reciprocating machine]. *Elektrotekhnika*, 2017, no. 5, pp. 18–24.

5. Kramarov, A.S., Batishchev, D.V., Pavlenko, A.V., Trotsenko, I.V. Obzor tekhnicheskikh resheniy i metodov proektirovaniya lineynykh elektricheskikh generatorov s postoyannymi magnitami [Overview of solutions and design methods for linear electric generators with

permanent magnets]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 36–51.

6. Randin, D., Abakumov, A., Goryachkin, A. Research of a nonlinear vibration isolation system with a controlled magnetorheological damper. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2022, pp. 773–783.

7. Bahiuddin, I., Imaduddin, F., Mazlan, S.A., Ariff, M.H.M., Mohmad, K.B., Sabino, U., Choi, S.B. Accurate and fast estimation for field-dependent nonlinear damping force of meandering valvebased magnetorheological damper using extreme learning machine method. *Sensors Actuators A Phys*., 2021, vol. 318, p. 112479.

8. Nesterov, S.A., Egorov, I.S., Morozov, N.A. *Magnitozhidkostnyy elektromekhanicheskiy dempfer* [Magnetic fluid electromechanical damper]. Patent RF, no. 205731, 2021.

9. Kazakov, Yu.B., Egorov, I.S., Nesterov, S.A. Magnitozhidkostnyy dempfer – lineynyy generator [Magnetic fluid damper – linear generator]. *Sbornik nauchnykh trudov XXI Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem Plesskoy nauchnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Proceedings of XXI All-Russian Plyos scientific conference with international participation on nano dispersed magnetic fluids]. Ivanovo, 2024, pp. 198–204.

10. Kazakov, Yu.B., Smirnov, D.S., Kiselev, M.A., Novikov, I.V., Zakharov, A.V. The Use of Combined Star–Triangle Windings in Three-Phase Electric Motors: a Refined Analysis. *Russian Electrical Engineering*, 2024, vol. 95, no. 3, pp. 165–174.

11. Gecha, V.Ya., Zakharenko, A.B., Belokurova, N.A., Nadkin, A.K. Lineynyy dvigatel'–makhovik s magnitnoy smazkoy [Linear flywheel motor with magnetic lubrication]. *Elektrotekhnika*, 2018, no. 10, pp. 72–75.

УДК 621.3+62-5

Игорь Сергеевич Полющенков
ООО НПО «Рубикон – Инновация», кандидат технических наук, инженер отдела № 36, Россия, Смоленск, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Разработка программного обеспечения для проверки исправности аппаратных средств электропривода

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современные электроприводы имеют конструкционную форму электронных блоков с микропроцессорным управлением. При серийном производстве электроприводов требуется их технический контроль, а именно, проверка исправности аппаратных средств, в том числе логических и аналоговых входных и выходных цепей, силовых цепей, цифровых интерфейсов, встроенных датчиков и специализированных микросхем. Для осуществления таких проверок и их автоматизации требуется разработка программных и аппаратных средств из состава контрольно-проверочного и управляющего оборудования, а также специализированного программного обеспечения для электропривода, подлежащего проверке. В связи с этим разработка такого программного обеспечения для электропривода является актуальной.
Материалы и методы. Применены методы алгоритмизации процессов управления, системного анализа, модельно-ориентированной разработки программного обеспечения и его отладки, а также методы экспериментальных исследований.
Результаты. Предложен алгоритм выполнения проверок аппаратных средств электропривода, представляющий последовательность действий и вычислений, связанных с вводом, выводом и обработкой логических и аналоговых сигналов, формированием токов и напряжений в силовых цепях, а также контролем доступа к встроенным элементам, распределенных между электроприводом, подлежащим проверке, контрольно-проверочной аппаратурой и персональным компьютером, используемым в качестве управляющего устройства, координация информационных сообщений между которыми осуществляется по цифровым интерфейсам. В программное обеспечение электропривода введен режим проверки, обособленный от работы электропривода по его назначению в основном режиме, для чего предусмотрены обработчики аппаратных средств, а также набор параметров и команд.
Выводы. Осуществление технического контроля электропривода позволяет своевременно выявить его неисправности непосредственно после изготовления. Предложенный алгоритм проверок аппаратных средств электропривода и автоматизация их выполнения способствует внедрению его технического контроля в технологический процесс производства.

Ключевые слова: электропривод, технический контроль электропривода, микропроцессорное управление, микроконтроллер, модельно-ориентированное программирование

Igor Sergeevich Polyuschenkov
LLC R&D Company “Rubicon – Innovation”, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Engineer, Department № 36, Russia, Smolensk, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Software development for checking the serviceability of electric drive hardware parts

Abstract

Background. Modern electric drives have the structural form of electronic units with microprocessor control. In the process of serial production of electric drives, their technical control is required, namely, checking the serviceability of hardware, including logical and analog input and output circuits, power circuits, digital interfaces, built-in sensors and specialized microchips. To carry out such tests and automate them, it is necessary to develop software and hardware for the test and control equipment, as well as specialized software for the electric drive subject to checking. Thus, the development of such software for the electric drive is relevant.
Materials and methods. The authors have applied the methods of algorithmization of control processes, methods of system analysis, methods of model-based development of software and its debugging, as well as the methods of experimental research.
Results. An algorithm is proposed to check the hardware of an electric drive, representing a sequence of actions and calculations associated with the input, output and processing of logical and analog signals, the formation of currents and voltages in power circuits, as well as access control to built-in elements distributed between the electric drive as a subject to check, the test and control equipment and the personal computer used as a control device, the coordination of

© Полющенков И.С., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 75–85.

messages which is carried out via digital interfaces. A test mode is introduced into the electric drive software, isolated from the operation of the electric drive for its intended purpose in the main mode. Hardware handlers as well as a set of parameters and commands are provided.
Conclusions. Technical control of the electric drive allows us to promptly identify its faults immediately after manufacture. The proposed algorithm to test the hardware of the electric drive and automation of its implementation facilitates introduction of its technical control in the technological process of production.

Key words: electric drive, technical control of electric drive, microprocessor control, microcontroller, model-based software development

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.075-085

Введение. При разработке программного обеспечения и конструкции электропривода (ЭП) его электронный блок (ЭБ), который является совокупностью вычислительных и измерительных элементов, а также элементов силовой электроники, существует, как правило, в единственном экземпляре или в количестве нескольких прототипов. На этом этапе разработчики электропривода, а именно электромеханик, выполняющий функции программиста [1], а также конструктор-схемотехник и конструктор-технолог имеют возможность тщательно отладить работу аппаратных средств электронного блока, убедившись в надлежащем качестве элементов и их монтажа. Кроме того, у них есть возможность вручную настроить параметры измерительных и силовых цепей, оказывающих существенное влияние на работу электропривода. После завершения разработки электропривода в начале его серийного изготовления технологический процесс уже не предусматривает детального исследования исправности каждого экземпляра электронного блока электропривода (ЭБЭП) его разработчиками. Какими бы квалифицированными и ответственными ни были монтажники и техники, непосредственно изготавливающие эти электронные блоки, нельзя исключить брак, например, при монтаже электронных элементов. Сами эти элементы вполне могут оказаться неисправными или не соответствовать заявленным характеристикам. Кроме того, многие неисправности электронных блоков, возникшие при их изготовлении, могут быть не выявлены при визуальном осмотре. Эти обстоятельства ставят вопрос о необходимости программных и аппаратных средств, которые позволят осуществить технический контроль электронного блока электропривода, состоящий из автоматизированных проверок его исправности [2].

При проверке исправности ЭБ необходимо убедиться, что его входы корректно вводят сигналы, а на его выходах корректно формируются сигналы, электрические и временные характеристики которых характерны для работы электропривода. Кроме того, требуется проверить вычислительные и измерительные элементы внутренней структуры электропривода, такие как встроенные датчики и специализированные микросхемы. Для контроля выходных сигналов ЭБ, установки сигналов на его входах и создания электрических нагрузок в силовых цепях предназначена контрольно-проверочная аппаратура (КПА), которая также имеет конструкцию в виде электронного блока с микропроцессорным управлением. Кроме того, для автоматизации технического контроля требуется управляющее устройство, имеющее пользовательский интерфейс и средства сопряжения с электронным оборудованием, например персональный компьютер (ПК) [2–5].

Сказанное в полной мере относится к двухдвигательному электроприводу панорамных стеклоочистителей, разработка полноценного прототипа которого описана в [6].

Целью исследования является разработка программного обеспечения этого электропривода для проверки его аппаратных средств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить состав аппаратных средств электронного блока электропривода, требующих проведения проверки работоспособности, а также состав оборудования, необходимого для автоматизации его технического контроля, и порядок взаимодействия этого оборудования;
- составить алгоритмическое описание проверок аппаратных средств электропривода, распределив между его электронным блоком и другим оборудованием выполнение вычислений, формирование, ввод и обработку сигналов;
- разработать программное обеспечение, входящее в состав программных средств электропривода и выполняющее возложенные на него задачи по проверке исправности аппаратных средств.

Методы исследования. В [6] описывается проектирование электропривода на базе микроконтроллера STM32, который осуществляет согласованное управление движением двух панорамных стеклоочистителей, имеющих индивидуальные электрические двигатели. При разработке его программного обеспечения использовалась модельно-ориентированная технология программирования [1]. Этот электропривод был применен в составе электрооборудования автобуса, разработанного «Группой ГАЗ», установочная партия которого выпущена Ликинским автобусным заводом. При серийном выпуске этого автобуса потребуется и серийный выпуск электропривода для стеклоочисти-

телей, что делает актуальным осуществление его технического контроля.

Электронный блок электропривода стеклоочистителей, согласно [6], имеет следующие аппаратные средства, предназначенные для соединения с внешними устройствами:

- логические входы для подключения датчиков направления движения стеклоочистителей и подключения трех переключателей для задания режимов работы электропривода;
- логические выходы контрольных сигналов готовности и положения парковки;
- аналоговые входы для подключения угловых датчиков положения стеклоочистителей;
- два нереверсивных силовых транзисторных преобразователя, имеющих датчики тока с аналоговыми выходами, для питания электрических двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов;
- интерфейс сетевой шины CAN (Controller Area Network) [7] для подключения к бортовому компьютеру автотранспортного средства;
- последовательный интерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) [7], преобразуемый к USB, для технологического подключения к персональному компьютеру.

Также ЭБ этого электропривода содержит встроенные аппаратные элементы, подключаемые к его микроконтроллеру:

- датчик питающего напряжения и термодатчики с аналоговыми выходами;
- микросхема энергонезависимого запоминающего устройства (ПЗУ) с интерфейсом I2C (Inter-Integrated Circuit) [7].

Согласно [2–5], принципиально возможны несколько способов взаимодействия между проверяемым электронным блоком, блоком КПА и персональным компьютером в качестве управляющего устройства с пользовательским интерфейсом. В зависимости от порядка взаимодействия перечисленного оборудования между ним распределяются задачи, последовательностью которых образованы проверки, и, следовательно, программные средства, осуществляющие их выполнение и координацию. Исходя из сказанного, на рис. 1 показана функциональная схема взаимодействия электронного блока электропривода с блоком КПА и персональным компьютером. Такая схема является наиболее удобной для реализации, так как, по сравнению с блоком КПА, основная часть программного обеспечения, связанного с выполнением проверок, входит в состав электропривода, а сам блок КПА подчинен ему. При этом в программном обеспечении электропривода целесообразно выделить режим проверки, имеющий систему параметров и переменных, используемых при выполнении вычислений, а также систему команд. В то же время работа электропривода согласно его назначению, описанная в [6], отнесена к основному режиму. Для переключения между этими режимами предназначена специальная команда, передаваемая электроприводу от персонального компьютера.

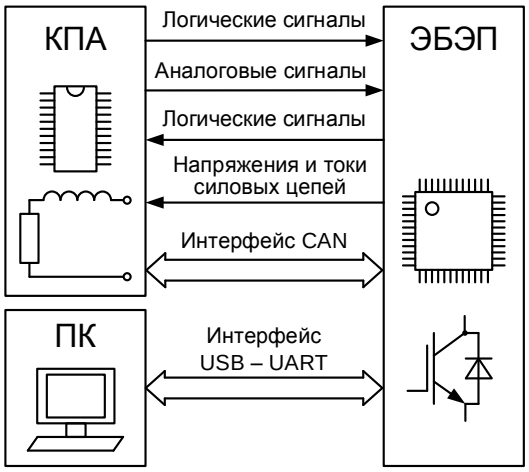


Рис. 1. Функциональная схема взаимодействия электронного блока электропривода, блока контрольно-проверочной аппаратуры и персонального компьютера при техническом контроле

В схеме, показанной на рис. 1, входы и выходы ЭБ электропривода соединены соответственно с выходами и входами блока КПА в зависимости от направления передачи сигналов. Ввод аналоговых сигналов в электронный блок электропривода осуществляют аналого-цифровые преобразователи (АЦП), встроенные в его микроконтроллер. Вывод аналоговых сигналов блоком КПА осуществляется на выходах с цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). Очевидным признаком исправности входных цепей электронного блока электропривода является корректный ввод эталонных сигналов, подаваемых на них блоком КПА. В то же время признаком исправности выходных цепей электропривода является корректный результат измерения их эталонных сигналов с помощью блока КПА, поэтому установка сигналов, их ввод и измерение, а также сопоставление результатов этих измерений с эталонными значениями должны быть скоординированы по последовательности выполнения и времени [8].

Для проверки силовых цепей и их датчиков тока предназначены нагрузочные *RL*-цепи из состава блока КПА, а для проверки датчиков и микросхемы ПЗУ, встроенных в электронный блок электропривода, блок КПА не требуется.

Разработка и исследование ЭБЭП в режиме проверки при взаимодействии с блоком КПА и персональным компьютером позволили выбрать компоновку программного обеспечения электропривода для этого режима, которая иллюстрируется блок-схемой, показанной на рис. 2. Согласно ей, программное обеспечение имеет обработчики приоритетных прерываний и фоновый цикл, вычисления в котором выполняются с низшим приоритетом в зависимости от счета системного таймера Systick.

Рис. 2. Блок-схема программного обеспечения электронного блока электропривода в режиме проверки

Задачи, выполняемые электроприводом в режиме проверки, были распределены между теми же элементами компоновки программного обеспечения, что и для основного его режима [6]. При этом ввод и вывод сигналов, управление формированием сигналов, имеющих широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), для силовых цепей, выполнение вычислений, а также получение и отправка сообщений по цифровым интерфейсам осуществляются по системным прерываниям, которые вызываются при переполнении таймеров или при программной установке системных флагов. Так, обработка сообщений, принятых электроприводом от персонального компьютера по интерфейсу UART, согласно функциональной схеме на рис. 1, осуществляется в индивидуальном обработчике прерывания при переполнении таймера 4 с интервалом повторения 500 мкс. Для отправки ответных сообщений предназначен обработчик прерывания, который вызывается при программной установке системного флага exti4. Отправка сообщений по сети CAN, которые требуются для взаимодействия электронного блока электропривода и блока КПА, осуществляется с помощью программной установки системного флага exti0. Обращение к приемному буферу CAN для обнаружения в нем сообщений, принятых от блока КПА, выполняется по прерыванию при переполнении таймера 6 через интервал 10 мс. Чем больше номера прерываний, указанных на рис. 2, тем ниже их приоритеты выполнения, как в микроконтроллере STM32 [9], использованном при разработке электропривода стеклоочистителей [6].

Рассмотрим выполнение проверок ЭБ электропривода, а также их автоматизацию с учетом схем, показанных на рис. 1 и рис. 2.

Для проверки входных логических цепей ЭБЭП персональный компьютер с помощью специального приложения отправляет ему сообщение с указанием вида проверки, т. е. проверяемого входа, и эталонного значения сигнала, который должен быть установлен на выходе КПА. Получив это сообщение, ЭБ электропривода преобразует его к формату обмена по сетевой шине CAN и пересылает блоку КПА. Вместе с этим ЭБЭП начинает отсчет интервала времени ожидания ответного сообщения, который имеет продолжительность несколько секунд. Получив сообщение от ЭБЭП с видом проверки и эталонным уровнем сигнала, блок КПА устанавливает его на выходе, соединенном с проверяемым входом электропривода, и отправляет ему ответное сообщение, подтверждая выполнение заданного действия. Закончив отсчет времени ожидания, ЭБЭП проверяет получение этого сообщения в приемном буфере CAN. Если оно получено, то ЭБЭП измеряет сигнал на проверяемом входе и сравнивает его с эталонным уровнем. В зависимости от результата этого сравнения электропривод отправляет персональному компьютеру ответное сообщение об исправности или неисправности логического входа, указав измеренный уровень сигнала. При этом требуется последовательно задать оба возможных логических уровня 0 или 1 эталонного сигнала и по окончании проверки вернуть сигнал на входе электропривода в ис-

ходное нулевое значение. Отсутствие ответного сообщения от блока КПА трактуется как неисправность подключения к сетевой шине CAN.

Проверка аналоговых входов ЭБ электропривода осуществляется подобным же образом, имитируя с помощью блока КПА подключение к ним датчиков положения, но с использованием нескольких значений эталонных аналоговых сигналов, коды которых с учетом их возможных диапазонов указываются в сообщениях. Эти сигналы выводятся на аналоговых выходах блока КПА, имеющих ЦАП.

Соответствие измеренных и эталонных уровней логических сигналов может быть установлено при их строгом равенстве. В то же время при оценке соответствия измеренных уровней аналоговых сигналов, преобразуемых АЦП микроконтроллера в цифровые коды, и их эталонных уровней на выходах блока КПА требуются некоторые диапазоны допуска.

Для проверки исправности выходных логических цепей электропривода персональный компьютер отправляет ему сообщение с указанием вида проверки, т. е. проверяемого выхода, и эталонного уровня сигнала. Получив это сообщение, ЭБ электропривода устанавливает на этом проверяемом выходе сигнал эталонного уровня, начинает отсчет интервала времени ожидания и по сети CAN отправляет блоку КПА сообщение с запросом измерить этот сигнал. После получения этого сообщения блок КПА спустя некоторый интервал времени, требуемый для окончания переходных процессов после установки сигнала, измеряет его уровень и отправляет ответное сообщение с результатом измерения. Закончив отсчет интервала времени ожидания, электронный блок электропривода проверяет получение ответного сообщения от блока КПА. Далее электронный блок электропривода сравнивает эталонный уровень сигнала, который ранее был установлен на его проверяемом выходе, и измеренное значение этого сигнала, полученное в ответном сообщении от блока КПА. Затем ЭБЭП отправляет сообщение персональному компьютеру с результатом проверки, указав измеренный уровень сигнала. Если ответное сообщение от блока КПА с результатом измерения сигнала не было получено, то соединение по сети CAN считается неисправным. Для проверки логических выходов требуется использовать оба возможных значения сигналов 0 и 1, а по окончании проверки установить исходное нулевое значение.

Описанные проверки входов и выходов электропривода с некоторыми упрощениями иллюстрируются блок-схемой, показанной на рис. 3.

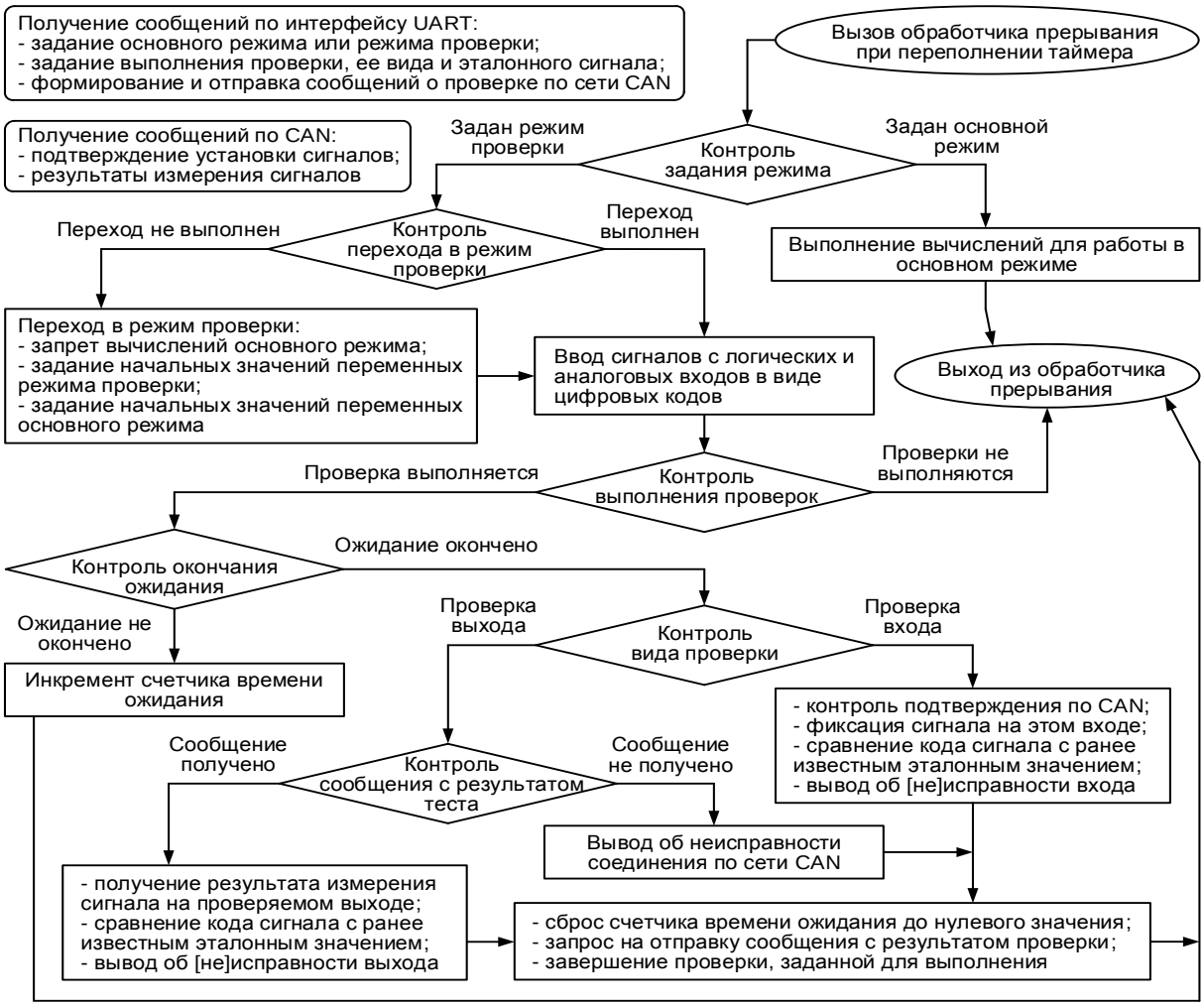


Рис. 3. Блок-схема программного обеспечения электропривода для проверки его входов и выходов

Вычисления выполняются итерационно по прерыванию при переполнении таймера 12, показанного на блок-схеме на рис. 2, через интервал времени 1 мс. Для контроля выполнения проверок и перехода между их стадиями используются программные флаги.

В отдельной секции блок-схемы на рис. 3 показано, что задание основного режима работы электропривода и режима проверки, а также вида проверок и их эталонных сигналов осуществляется с помощью сообщений, которые отправляются персональным компьютером по интерфейсу UART. Также на рис. 3 показана секция с указанием назначения сообщений по CAN для выполнения проверок входов и выходов.

Определение исправности микросхемы ПЗУ и интерфейса I2C для связи с ней основано на последовательных обращениях к проверяемой области ее памяти, чтобы выполнить чтение и запись данных, а также на контроле их результатов, как показано в блок-схеме на рис. 4. Действия распределены во времени, и, согласно рис. 2, выполняются в фоновом цикле, имея минимальный приоритет. Стрелки, соединяющие секции блок-схемы этой проверки, показывают последовательность вычислений, между которыми присутствуют интервалы времени. Признаком исправности ПЗУ является успешная модификация данных во всех регистрах проверяемой области памяти. После успешной ее проверки осуществляется восстановление исходных значений регистров, которые предварительно были прочитаны и сохранены в оперативной памяти микроконтроллера. Для определения исправности интерфейса I2C, соединяющего микросхему ПЗУ и микроконтроллер, осуществляется контроль программных флагов из состава его обработчиков, сгенерированных из модельных блоков вида I2C Master Read/Write, которые были использованы при модельно-ориентированной разработке программного обеспечения согласно блок-схеме, показанной на рис. 4.

Очевидным признаком исправности интерфейсов UART и CAN электронного блока электропривода является их бесперебойная работа при проведении описанных выше проверок, в которых они используются.

Для проверки двух силовых цепей электропривода на основе нереверсивных транзисторных схем [10] в блоке КПА для них имеются нагрузочные *RL*-цепи. На рис. 5 показано подключение одной из силовых цепей к нагрузке.

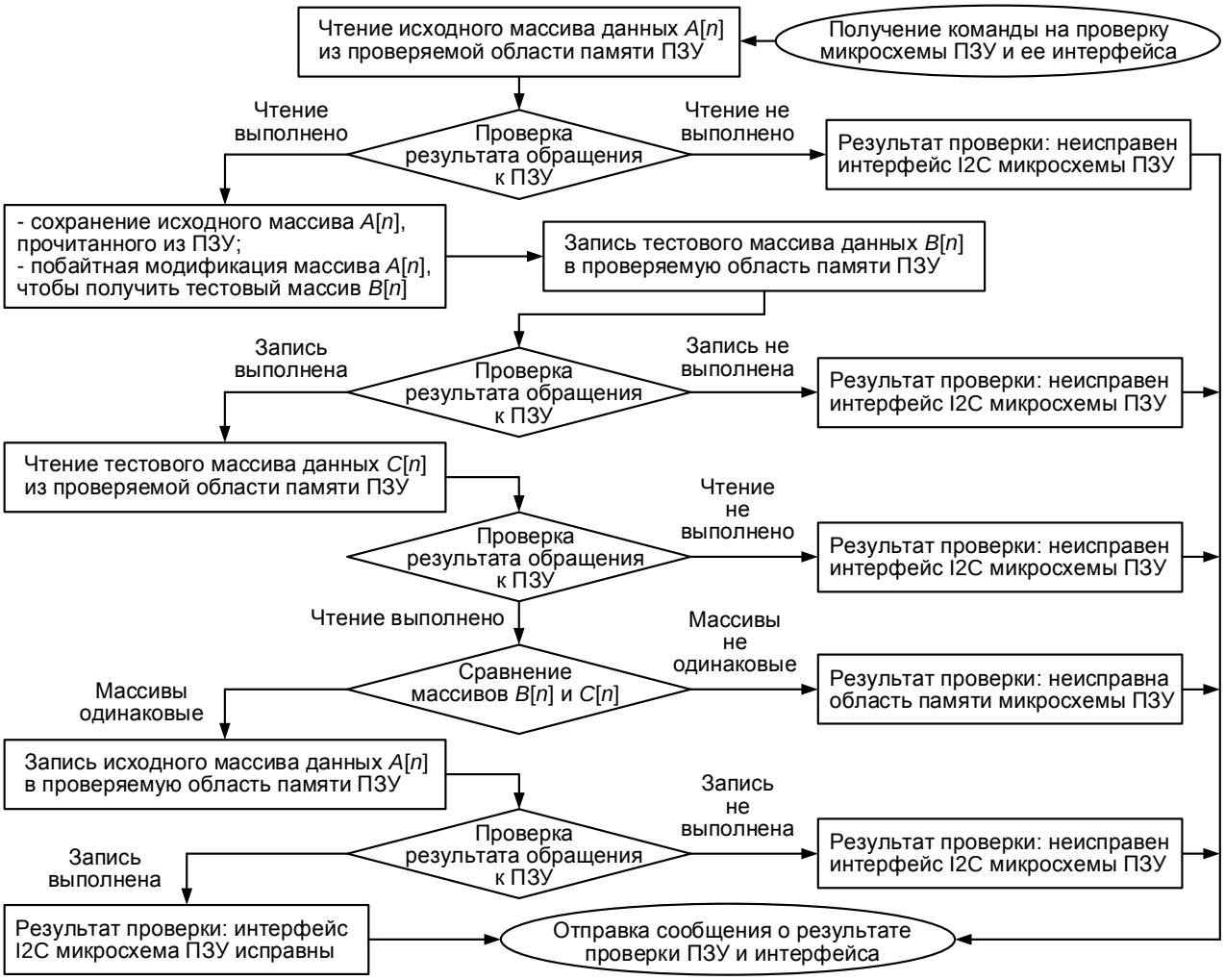


Рис. 4. Блок-схема проверки исправности микросхемы ПЗУ и ее интерфейса I2C

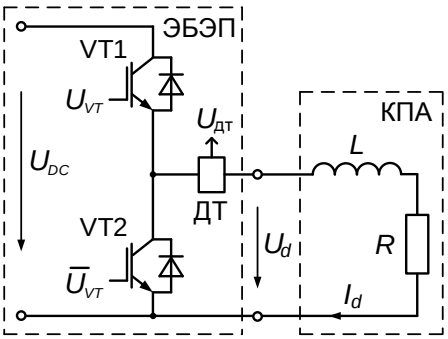


Рис. 5. Схема подключения силовой цепи электронного блока электропривода к нагрузке из блока КПА

Транзисторы VT1 и VT2 силового преобразователя противофазно управляются сигналом U_{VT}, имеющим широтно-импульсную модуляцию, и его инверсией. Напряжение U_d, приложенное к *RL*-нагрузке, линейно зависит от скважности ШИМ $\gamma = 0 – 0{,}95$ сигнала U_{VT}, ограничиваясь величиной напряжения питания U_{DC}:

$$U_d = \gamma U_{DC} . \quad (1)$$

Номинальная величина напряжения U_{DC} равна 25 В, что с учетом отклонения в некоторых пределах соответствует бортовой сети, обычной для транспортных средств. Частота ШИМ является важным параметром данного электропривода и может быть задана величиной от 2,5 кГц до 17,5 кГц с шагом 2,5 кГц. Индуктивность L в цепи нагрузки предназначена для сглаживания тока, а с ростом ее величины сокращается зона прерывистых токов [10]. Активное сопротивление R = 2 Ом цепи нагрузки предназначено для ограничения тока.

Если силовая схема электропривода, показанная на рис. 5, исправна, то в силовой цепи ее нагрузки протекает заданный ток I_d, который корректно измеряется датчиком ДТ, входящим в состав его электронного блока.

Очевидно, что при проверке датчика тока требуется определить, соответствует ли его коэффициент передачи $k_{дт}$ [11] эталонной или паспортной величине, которая используется при настройке электропривода [6]. Этот коэффициент рассчитывается следующим образом:

$$k_{дт} = \frac{U_{дт} - U_{дт0}}{I_d} , \quad (2)$$

где $U_{дт}$ – выходной сигнал датчика при протекании тока I_d; $U_{дт0}$ – выходной сигнал ДТ при отсутствии тока в силовой цепи, т. е. при $I_d = 0$.

Однополярное напряжение питания датчика тока, благодаря которому его удобно сопрягать с АЦП, приводит к тому, что при отсутствии тока в силовой цепи сигнал $U_{дт}$ имеет ненулевую величину, т. е. смещение $U_{дт0}$. Его величина, входя в (2), оказывает влияние на измерение тока и корректность автоматического регулирования координат [6, 11]. Из-за физических свойств самих датчиков и ограниченной точности элементов их внешних цепей действительная величина $U_{дт0}$ требует индивидуального измерения для всех таких датчиков каждого электропривода. Это измерение, осуществляемое автоматически в режиме проверки электропривода при получении им команды, имеет несколько этапов, последовательных по времени, что отражено в различных обработчиках в блок-схеме, показанной на рис. 2. После получения сообщения с запросом на измерение смещений датчиков тока работа генератора ШИМ запрещается, чтобы разомкнуть силовые цепи, исключив протекание по ним токов. Далее осуществляется серия измерений выходного сигнала $U_{дт}$ датчика тока первой из силовых схем, а затем вычисляется среднее значение этих измерений, которое и считается равным смещению $U_{дт0}$. Такие же действия осуществляются и для датчика тока из второй силовой схемы электропривода. Затем вновь разрешается работа генератора ШИМ. Значительное отклонение измеренной величины $U_{дт0}$ от половины напряжения питания датчика тока является признаком неисправности самого датчика или его внешних цепей. Измеренные значения смещений датчиков тока сохраняются в ПЗУ и используются в качестве параметров электропривода при работе в основном режиме.

Проверку коэффициента передачи требуется осуществить индивидуально для каждого из датчиков тока электропривода. В основу этой проверки положено обстоятельство, что по (1) при некоторой скважности ШИМ напряжение U_d пропорционально ей, а ток I_d определяется законом Ома. Если активное сопротивление R цепи нагрузки и напряжение питания U_{DC} силовой схемы имеют известные величины, то в случае заведомо исправного ЭБ электропривода для каждого j-го значения скважности γ_j могут быть получены значения тока $I_{dэ.j}$, а значит, и сигнала $U_{дтэ.j}$, которые далее используются как эталон при проверках других его экземпляров.

Чтобы проверить коэффициент $k_{дт}$ датчика тока одной из силовых схем, электроприводу в сообщениях от персонального компьютера последовательно задаются скважности $\{\gamma_j\}$ от нуля до 90 % с шагом 10 %, для которых известны эталонные значения $\{U_{дтэ.j}\}$. Между заданием очередного значения скважности и измерением сигнала датчика тока, коды которого вводятся в микроконтроллер электропривода [6], необходим интервал времени для завершения переходных процессов. Совпадение каждого j-го измеренного значения сигнала $\{U_{дт.j}\}$ с j-м заранее известным эталонным значением $\{U_{дтэ.j}\}$ в пределах некоторого допуска означает, что коэффициент передачи датчика тока соответствует эталонной величине и, следовательно, сам он исправен.

Исправность датчика тока, определенная в ходе описанной его проверки, является также и косвенным признаком исправности транзисторов силовой схемы. Неисправность же транзисторов, приводя к некорректным величинам тока, детектируется как неисправность датчика.

Важно заметить, что описанная проверка датчиков тока, индивидуальная для каждого из них, должна проводиться и при тех же значениях напряжения U_{DC} и сопротивления R, для которых была получена эталонная зависимость $\{U_{\text{дтэ}.j}\}$ от $\{\gamma_j\}$. Для контроля этого условия в ЭБ электропривода встроенный датчик измеряет напряжение U_{DC}. Его сигнал подается на вход микроконтроллера, имеющий АЦП.

Также при проверке датчиков тока в качестве параметра используется уровень их сигнала $U_{\text{дт.max}}$, который превышает все эталонные значения $\{U_{\text{дтэ}.j}\}$. Этот уровень предназначен для релейного токоограничения при защите силовой схемы от перегрузки, если ток достигает пропорциональную ему величину. Кроме того, при проверке силовых схем действует защита от превышения аварийного тока, задаваемого в качестве параметра, поэтому превышение аварийного тока приводит к закрытию транзисторов и запрету генерирования ШИМ, чтобы разомкнуть силовые цепи. Для защиты силовых цепей в режиме проверки электропривода также предусмотрен интервал, имеющий программируемую в широких пределах продолжительность и ограничивающий время протекания токов. По истечении этого интервала времени автоматически задается нулевая скважность ШИМ, которая остается такой до задания ее нового ненулевого значения в сообщении от персонального компьютера.

Помимо проверки силовой схемы, подключение электропривода к нагрузочным цепям согласно схеме на рис. 5 предназначено для его испытания на нагрев при продолжительном протекании тока в различных искусственно создаваемых климатических условиях. Такое испытание требуется на этапе разработки конструкции ЭБ электропривода, чтобы оценить эффективность теплоотвода, определив изменение температуры тепловыделяющих элементов при изменении тока нагрузки и превышение их температуры над температурой окружающего воздуха. Ввод сигналов от термодатчиков, встроенных в электронный блок электропривода, осуществляется по прерыванию при переполнении таймера. Для каждого из них предусмотрено программная регистрация аварийного события с запретом работы транзисторов силовых схем.

Проверка измерения напряжения питания U_{DC} датчиком, встроенным в ЭБ электропривода, осуществляется визуальным контролем соответствия его показаний величине напряжения, установленного на источнике, в том числе при его регулировании в допустимых пределах. Проверка термодатчиков также осуществляется визуальным контролем их показаний при известной температуре окружающего воздуха, учитывая продолжительность работы электропривода с протеканием токов в силовых цепях.

Результаты исследования. Рассмотрим некоторые решения, примененные при разработке программного обеспечения для электропривода в режиме проверки. Согласно блок-схеме, показанной на рис. 2, от него требуется выполнение ввода, вывода и обработки сигналов, осуществление вычислений в зависимости от программных и системных флагов, а также отправка и получение сообщений. Программное обеспечение блока КПА здесь не рассматривается, ограничиваясь его алгоритмическим описанием, приведенным выше при описании проверок электропривода.

Для разработки программного обеспечения электропривода были использованы средства модельно-ориентированного программирования, а именно библиотека Waijung Blockset из состава Matlab, предназначенная для микроконтроллеров семейства STM32. При этом модельные блоки и конструкции из них, примеры которых показаны на рис. 6, использовались для компоновки программного обеспечения в виде графической исполняемой модели, а также для инициализации встроенных модулей микроконтроллера и доступа к ним в процессе выполнения кода, который автоматически генерируется из этой модели. Математическое программное обеспечение, зависящее от аппаратных средств электропривода и его назначения, было разработано на языке С и включено в исполняемую модель с помощью специальных модельных блоков вида Basic Custom Code.

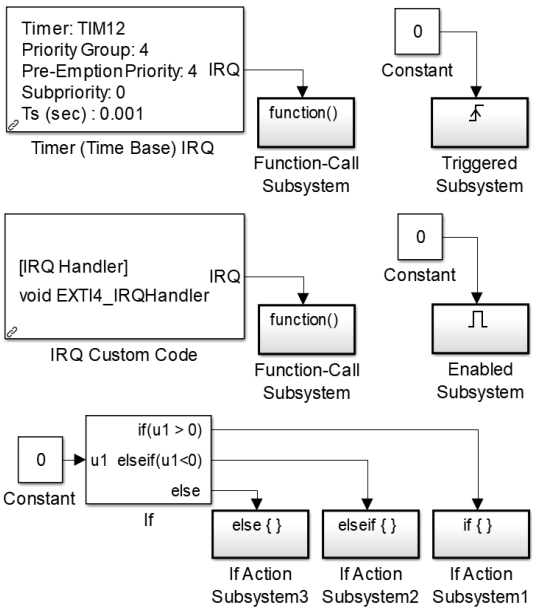


Рис. 6. Модельные конструкции для компоновки программного обеспечения в виде исполняемой модели

Подпрограммы и модельные схемы, разработанные для режима проверки электропривода и его основного режима, были помещены в общие для них элементы компоновки программного обеспечения из состава исполняемой модели. Чтобы проиллюстрировать сказанное, на рис. 7 показана модельная схема для ввода и обработки логических сигналов и кодов аналоговых сигналов.

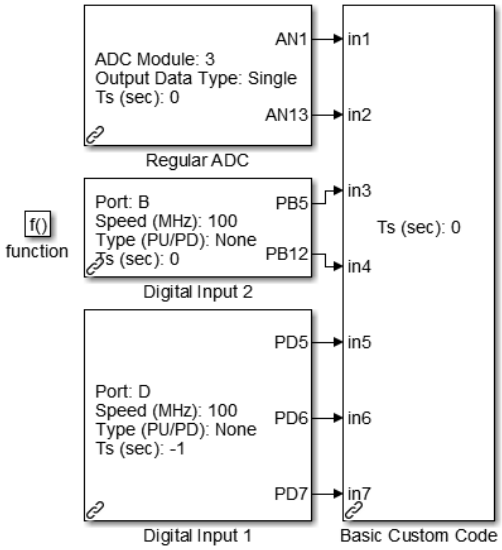


Рис. 7. Модельная схема для ввода и обработки логических и аналоговых сигналов

Подпрограмма, включаемая в состав этой модельной схемы с помощью блока вида Basic Custom Code, была разработана на языке С. В исполняемой модели эта схема помещена в обработчике прерывания таймера 12, поэтому подпрограмма, сгенерированная из этой схемы, выполняется при каждом его переполнении и осуществляет вычисления по обработке введенных сигналов согласно блок-схеме, показанной на рис. 2, для режима проверки либо для основного режима работы электропривода [6] в зависимости от программного флага, указывающего на режим. Аналогичным образом устроены и другие обработчики прерываний, показанные на блок-схеме на рис. 2, если выполнение вычислений должно осуществляться в зависимости от режима электропривода.

Модельный блок вида Advanced PWM, показанный на рис. 8, предназначен для применения таймера в качестве генератора сигналов с ШИМ, формирующего их противофазно на каждой из пар используемых выходов.

Подпрограмма, генерируемая при наличии этого блока в исполняемой модели, позволяет осуществить доступ к заданию скважности ШИМ по мере вычисления ее значения в подпрограммах, управляющих работой электропривода. Если генератор ШИМ выключен, то на всех его выходах установлен логический сигнал, равный нулю. При этом транзисторы силовой схемы, показанной на рис. 5, управляемые этим генератором, закрыты, а цепь нагрузки разомкнута.

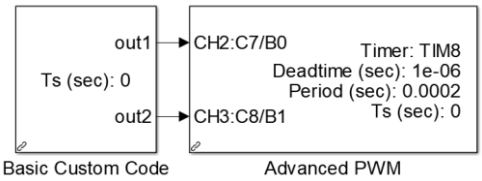


Рис. 8. Модельный блок генератора ШИМ

Чтобы автоматизировать описанный выше технический контроль ЭБ электропривода, разработано приложение для персонального компьютера, экранная форма которого показана на рис. 9. Оно отправляет электроприводу сообщения с запросами на выполнение проверок, принимает ответные сообщения с результатами и отображает полученную информацию. Выполнение предусмотренных проверок может осуществляться автоматически в предусмотренной последовательности либо вручную с их заданием и указанием параметров оператором персонального компьютера. Элементы для управления, задания параметров и отображения информации в экранной форме приложения сгруппированы в функциональные секции.

В экранной форме приложения предусмотрено задание параметров, от которых существенно зависит работа электропривода, в том числе, в режиме проверки. Среди этих параметров частота ШИМ и величина аварийного тока, достижение которой требует немедленного отключения электропривода. Также в экранной форме приложения отображаются напряжение питания электропривода и температура в контролируемых зонах тепловыделения его электронного блока, измеряемые встроенными датчиками. Эти данные персональный компьютер получает от электропривода по запросу. Кроме того, приложение отображает полученные от электропривода величины токов, протекающих в цепях питания электрических двигателей, а также индикацию неисправностей – перегрева и превышения аварийного тока. С помощью специальной команды, предусмотренной в программном обеспечении электропривода, приложение получает идентификационный номер микроконтроллера [9], используемый в качестве идентификатора электронного блока в базе его выпущенных экземпляров.

Чтобы показать работоспособность программного обеспечения электропривода, разработанного по блок-схеме на рис. 2 для режима проверки, осуществлялась имитация неисправностей его аппаратных средств. После выявления они были отображены приложением.

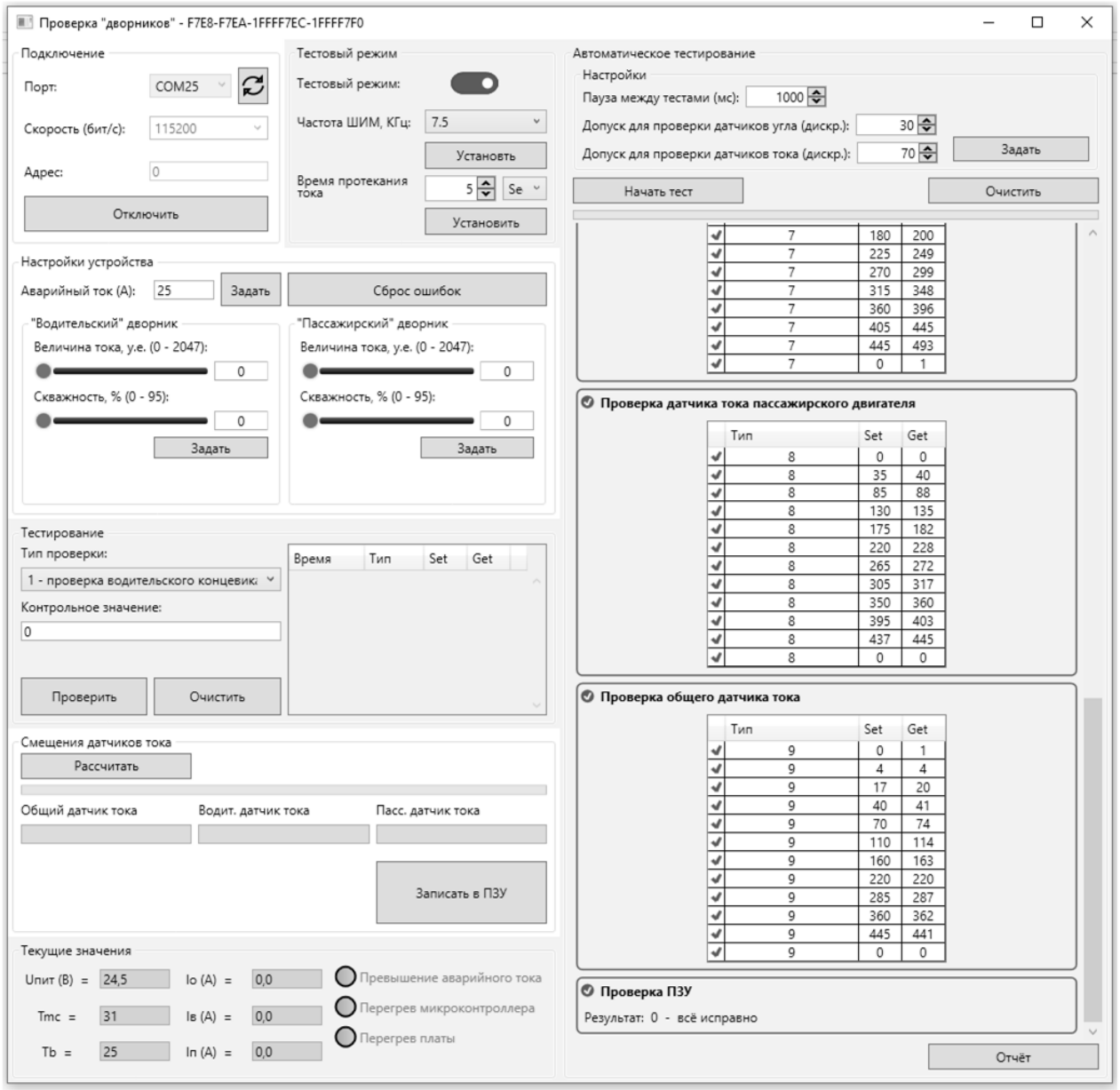


Рис. 9. Экранная форма приложения для технического контроля электронного блока электропривода

Исходя из функциональности этого приложения, оператору с помощью его элементов управления требуется установить соединение электропривода с персональным компьютером по линии связи USB – UART, перевести его в режим проверки и задать параметры – аварийный уровень тока, частоту ШИМ и допуски для измерения сигналов на аналоговых входах. Далее, начав проверки по заранее предусмотренной программе, требуется контролировать их выполнение по цветовой и мнемонической индикации результатов. Убедившись в исправности электропривода, следует сохранить в ПЗУ его параметры, так как ранее были заданы аварийный уровень тока и частота ШИМ, а действительные смещения датчиков тока были измерены в ходе выполнения их проверки. Затем требуется вывести электропривод из режима проверки и отключить его соединение с персональным компьютером. Экспериментально показано, что выполнение технического контроля электропривода, автоматизированного с помощью этого приложения и подкрепленного детальной инструкцией, оказалось доступным для регулировщиков электронной аппаратуры.

Выводы. В целях осуществления автоматизированного технического контроля аппаратных средств разработанного электропривода, вычисления и действия, которыми выполняются проверки, распределены между его электронным блоком, контрольно-проверочной аппаратурой и персональным компьютером.

Выполнение каждой из проверок образовано последовательностью действий, связанных с вводом, выводом и обработкой логических и аналоговых сигналов, а также с форми-

рованием напряжений и токов в силовых цепях. Координация выполнения проверок между оборудованием осуществляется сообщениями, передаваемыми по цифровым интерфейсам.

Для технического контроля исправности электронного блока электропривода в его программном обеспечении предусмотрен обособленный режим проверки, вычисления для которого распределены по интервалам повторения и приоритетам в зависимости от их значимости и необходимости своевременного выполнения.

Список литературы

1. **Полющенков И.С.** Модельно-ориентированное программирование как инструмент инженера-электромеханика // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 1. – С. 60–70. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.060-070.
2. **Липатов Г.И.** Автоматизация измерений, контроля и испытаний: учеб. пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. – 138 с.
3. **Гелль П.** Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс. – М.: ДМК, 1999. – 144 с.
4. **Бутырин П.А.** Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
5. **Пейч Л.И.** LabVIEW для новичков и специалистов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 384 с.
6. **Полющенков И.С.** Разработка системы управления электропривода панорамных стеклоочистителей и ее исследование // Известия МГТУ “МАМИ“. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 345–356. DOI: 10.17816/2074-0530-109188.
7. **Денисенко В.В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
8. **Sommerville Ian.** Software engineering. – 9th ed. – Wokingham etc.: Addison–Wesley, 2011.
9. **Mastering STM32** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://leanpub.com/mastering-stm32-2nd (дата обращения 27.11.2024).
10. **Розанов Ю.К., Соколова Е.М.** Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 272 с.
11. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.

References

1. Polyushchenkov, I.S. Model'no-orientirovannoe programmirovanie kak instrument inzhenera-elektromekhanika [Model-based programming as a technique of electromechanical engineer]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 1, pp. 60–70. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.060-070.
2. Lipatov, G.I. *Avtomatizatsiya izmereniy, kontrolya i ispytaniy* [Automation of measurements, control and testing]. Voronezh, 2011. 138 p.
3. Gell', P. *Kak prevratit' personal'nyy komp'yuter v izmeritel'nyy kompleks* [How to turn a personal computer into a measuring complex]. Moscow: DMK, 1999. 144 p.
4. Butyrin, P.A. *Avtomatizatsiya fizicheskikh issledovaniy i eksperimenta: komp'yuternye izmereniya i virtual'nye pribory na osnove LabVIEW 7* [Automation of physical research and experiment: computer measurements and virtual tools based on LabVIEW 7]. Moscow: DMK Press, 2005. 264 p.
5. Peych, L.I. *LabVIEW dlya novichkov i spetsialistov* [LabVIEW for beginners and experts]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004. 384 p.
6. Polyushchenkov, I.S. Razrabotka sistemy upravleniya elektroprivoda panoramnykh stekloochistiteley i ee issledovanie [Development and research of the control system of the electric drive of panoramic windscreen wipers]. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2022, vol. 16, no. 4, pp. 345–356. DOI: 10.17816/2074-0530-109188.
7. Denisenko, V.V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of process, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 608 p.
8. Sommerville, Ian. Software engineering. Wokingham etc.: Addison – Wesley, 2011.
9. Mastering STM32. Available at: https://leanpub.com/mastering-stm32-2nd (Date of appeal 27.11.2024).
10. Rozanov, Yu.K., Sokolova, E.M. *Elektronnye ustroystva elektromekhanicheskikh sistem* [Electronic equipment of electromechanical systems]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 272 p.
11. Anuchin, A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-52-83:656.56

Алексей Руфимович Колганов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: klgn@drive.ispu.ru

Олег Викторович Крюков
ООО «ТСН-электро», доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Леонид Романович Романов
ООО «ТСН-электро», аспирант, технико-коммерческий инженер, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: romanovl.r@yandex.ru

Автоматизация мониторинга технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Компрессорные станции магистральных газопроводов относятся к объектам повышенной опасности. В качестве приводов газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях используются газотурбинные, поршневые и электроприводные установки. Но именно автоматизированный электропривод мощностью 4–25 МВт является наиболее перспективной системой благодаря низким капитальным и эксплуатационным затратам, высоким энергетическим показателям в совокупности с высокой надежностью и экологичностью. Однако требования обеспечения безаварийной работы агрегатов компрессорных станций постоянно ужесточаются в соответствии с отраслевой нормативной базой. На отечественном электротехническом рынке сегодня отсутствуют надежные и адекватные технические средства и методы превентивного прогнозирования состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов. В этой связи целью исследования является обеспечение теоретически обоснованной методологией оценки технического состояния электропривода в режиме *on-line* и среднесрочного прогноза его эксплуатационных параметров.
Материалы и методы. Данные о состоянии электропривода снимаются с датчиков и подаются на подсистему прогнозирования технического состояния. В случае формирования решения о наступающем отказе подсистема обслуживания выполняет действия по предотвращению отказов.
Результаты. Предлагается метод управления техническим состоянием на основе Байесовских моделей прогнозирования состояния по контролируемым параметрам и их соответствию заложенной базе знаний. Разработана и исследована автоматизированная система прогнозирования состояния электропривода газоперекачивающих агрегатов. Показано, что сокращение времени простоя и увеличение коэффициента технического использования системы достигается за счет применения прогнозирования в составе системы управления техническим состоянием электропривода, которое позволяет инициировать превентивные действия для предотвращения отказа или подготовки к ремонту.
Выводы. Использование автоматизированных систем прогнозирования технического состояния электропривода газоперекачивающего агрегата позволяет планировать капитальные и текущие ремонты на основе фактического состояния; контролировать работу системы охлаждения мощных машин и поддерживать оптимальные режимы,

© Колганов А.Р., Крюков О.В., Романов Л.Р., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 1, с. 86–92.

позволяющие увеличить ресурс изоляции; при совместном использовании данных вибрационного анализа и FFT-анализа потребления мощности точно выявлять причины повышенных уровней вибрации, а также исключить тепловое действие токов, снизить стоимость капитальных ремонтов, снизить общие эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: техническая диагностика, оперативное прогнозирование, электропривод, газоперекачивающие агрегаты, диагностическая экспертная система

Alexey Rufimovich Kolganov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electric Drive and Industrial Installations Automation Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: klgn@drive.ispu.ru

Oleg Viktorovich Kryukov
LLC “TSN-Electro”, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Associate Professor, Deputy Director for Science, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Leonid Romanovich Romanov
LLC “TSN-Electro”, Postgraduate Student, Technical and Commercial Engineer, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: romanovl.r@yandex.ru

Automation of monitoring the technical condition of electric-driven gas pumping units

Abstract

Background. Compressor stations of main gas pipelines are classified as high-risk facilities. Gas turbines, piston and electric drive units are used as drives of gas pumping units at compressor stations. But it is the automated electric drive with a capacity of 4–25 MW that is the most promising system due to low capital and operating costs, high energy performance combined with high reliability and environmental friendliness. However, the requirements to ensure trouble-free operation of compressor station units are constantly being tightened in accordance with the industry regulatory framework. In the domestic electrical engineering market today, there are no reliable and adequate technical means and methods of preventive forecasting of the condition of electric drive gas pumping units. In this regard, the aim of the study is to provide a theoretically sound methodology to assess the technical condition of an electric drive in the on-line mode and a medium-term forecast of its operational parameters.
Materials and methods. Data on the condition of the electric drive is taken from the sensors and fed to the subsystem for predicting the technical condition. In case, a decision is made about an upcoming failure, the maintenance subsystem prevents failures.
Results. The authors have proposed a method of technical condition management based on Bayesian models of condition forecasting based on controlled parameters and their compliance with the embedded knowledge base. An automated system for forecasting the condition of an electric drive of gas pumping units is developed and studied. It is shown that a reduction in downtime and an increase of the utilization factor of the system is achieved due to forecasting as part of the electric drive technical condition management system, which allows us to initiate preventive actions or to prepare for repair.
Conclusions. The use of automated systems for predicting the technical condition of the electric drive of the gas pumping unit allows us to plan capital and routine repairs based on the actual condition, to eliminate the thermal effect of currents and reduce the cost of overhauls, to monitor the operation of the cooling system of powerful machines and maintain optimal modes that increase the insulation life; with the combined use of vibration analysis and FFT analysis of power consumption, accurately identify the causes of increased vibration levels, as well as to lower overall operating costs.

Key words: technical diagnostics, operational forecasting, electric drive, gas pumping units, diagnostic expert system

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.1.086-092

Введение. В настоящее время все магистральные газопроводы (МГ) Российской Федерации и стран ближнего зарубежья относятся к промышленным объектам повышенной опасности [1–3] и независимо от режимов работы электроприводных компрессорных станций (КС) с каждым годом федеральными и отраслевыми нормативно-техническими документами ужесточаются требования обеспечения повышенной надежности и безаварийности работы всего оборудования [4–6]. Это обусловлено не только объективными причинами (устаревшее оборудование, ненадежное электроснабжение КС и т.п.), но и нередко наличием неквалифицированного обслуживания и попыток внешнего проникновения.

В системах оперативного мониторинга технического состояния (ТС) ответственных агрегатов газотранспортных систем наиболее эффективной процедурой является не традиционное диагностирование электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [7–10], а достоверное прогнозирование их ТС с оценкой остаточного ресурса агрегата. Это позволяет

предотвратить внезапные нештатные аварии и перейти от планово-предупредительных процедур технического обслуживания и ремонта (ТОиР) к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования [11–13].

Принцип управления техническим состоянием на основе прогнозирования иллюстрирует рис. 1 [14–16]. Данные о состоянии объекта снимаются с датчиков и подаются на подсистему прогнозирования технического состояния.

При условии формирования решения о наступающем отказе подсистема ТОиР выполняет действия, которые направлены:

- на предотвращение отказов, включая комплекс мероприятий по обеспечению функционирования системы без прерывания;
- минимизацию последствий отказа за счет подготовки к ожидаемому отказу, что позволяет сократить время ремонта, а следовательно, и продолжительность неработоспособного состояния.

Большинство известных методов (рис. 2) [17–20] основываются на определении объективных закономерностей развития дефектов и повреждений, статистической обработке данных, экстраполяции трендов до предельно допустимых значений и на вероятностной оценке значений показателей.

Методология систем прогнозирования технического состояния ЭГПА. В подсистеме прогнозирования определяется вероятность $P(\mathbf{z}=1/\mathbf{x})$ наступления отказа на рассматриваемом интервале времени. Здесь **z** – переменная, характеризующая состояние технического объекта, **x** – данные наблюдения, снимаемые с датчиков. В условиях априорной неопределенности используется оценка $\hat{P}(z=1|\mathbf{x})$, которая находится в результате структурно-параметрического синтеза (обучения) предиктора на основе эмпирических данных, составляющих обучающую выборку **D**.

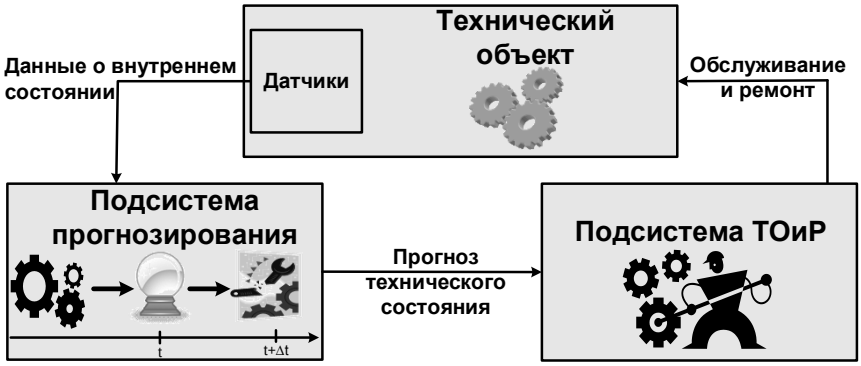


Рис. 1. Система управления состоянием ЭГПА на основе прогнозирования

Рис. 2. Классификация методов прогнозирования ЭГПА

Решение о формировании сигнала-предупреждения о наступающем отказе выносится в результате сравнения с пороговым значением найденной вероятности наступления отказа на заданном интервале. Нахождение этого значения представляет отдельную задачу и связано с используемым критерием, который определяет эффективность прогнозов.

Применение прогнозирующего контроля направлено на сокращение издержек, вызванных простоем технического объекта. Эффект от внедрения прогнозирующего контроля можно оценить с помощью коэффициента технического использования, который определяется выражением

$$K = t_F / (t_F + t_R).$$

Для системы управления техническим состоянием с использованием прогнозирования можно записать аналогичную формулу:

$$K' = t'_F / (t'_F + t'_R),$$

где t_F и t'_F – среднее время наработки на отказ, t_R и t'_R – среднее время ремонта системы без применения и с применением прогнозирующего контроля соответственно.

Эффект от применения прогнозирующего контроля охарактеризуем величиной

$$v = \frac{1-K'}{1-K} = \frac{(t_F + t_R)t'_R}{(t'_F + t'_R)t_R}, \quad (1)$$

которая показывает, во сколько раз изменяется среднее время неработоспособного состояния технического объекта. Эффект от применения прогнозирующего управления техническим состоянием имеет место при $v < 1$ и возрастает по мере уменьшения неотрицательной величины v. Для проведения анализа эффективности применения процедур прогнозирования в составе системы управления техническим состоянием охарактеризуем подсистему ТОиР вероятностью $\boldsymbol{P_P}$ возникновения (не предотвращения) отказа при условии правильного предсказания и вероятностью $\boldsymbol{P_E}$ привнесения отказа при условии ошибочного предсказания (ложной тревоги).

Подсистема прогнозирования отказов может быть охарактеризована вероятностью ложной тревоги (ошибки первого рода) α и вероятностью пропуска наступающего неисправного состояния технического объекта (ошибки второго рода) β.

Если выполненные превентивные действия при правильном предсказании не позволили предотвратить отказ, то, как правило, устранение отказа выполняется за меньшее время. Соответствующее среднее время ремонта с подготовкой обозначим t_{RP}, а изменение (сокращение) среднего времени ремонта за счет подготовки охарактеризуем коэффициентом

$$k_R = t_{PR} / t_R. \quad (2)$$

Среднее время ремонта, вызванного привнесенным отказом, обозначим t_{RE} и, аналогично (2), введем коэффициент

$$k_E = t_{RE} / t_R. \quad (3)$$

После преобразований (1)–(3) получаем выражение для оценки эффекта от применения прогнозирования:

$$v = K_P + \alpha K_E (1 - P_F) / P_F + \beta(1 - K_P), \quad (4)$$

где $\boldsymbol{P_F}$ – априорная вероятность возникновения неисправного состояния за анализируемый интервал времени; $K_P = k_P P_P$; $K_E = k_E P_E$.

Согласно (4), эффективность прогнозирования технического состояния возрастает (величина ν уменьшается) при уменьшении $\boldsymbol{K}_\text{P}$ и $\boldsymbol{K}_\text{E}$. Для идеальной подсистемы ТОиР $\boldsymbol{K}_\text{P} = 0$ и $\boldsymbol{K}_\text{E} = 0$, что может быть обеспечено, если $\boldsymbol{P}_\text{P} = 0$ и $\boldsymbol{P}_\text{E} = 0$. При этом все правильно предсказанные отказы предотвращаются, а обработка ложных тревог не приводит к дополнительному простою. В этом случае величина выигрыша $\boldsymbol{v = \beta}$ полностью определяется вероятностью пропуска при прогнозировании отказа.

Выигрыш от применения прогнозирования технического состояния возрастает при уменьшении α и β. При высокой точности прогнозирования ($\alpha \approx 0$, $\beta \approx 0$) величина выигрыша составляет $v \approx K_\text{P}$. Однако уменьшение одной из вероятностей α или β сопровождается увеличением другой в соответствии с рабочей характеристикой предиктора. При этом возникает необходимость синтеза решающего правила для принятия решений о наступающем отказе из условия минимизации целевой функции (4).

Анализ выражения (4) свидетельствует о том, что целевая функция представляет собой взвешенную сумму вероятностей ошибок первого и второго рода и по своей структуре близка к выражению для среднего риска. Применяя критерий минимума среднего риска, приходим к следующему правилу принятия решения о наступающем отказе:

$$\hat{z} = H(\Lambda(x) - h), \quad (5)$$

где $H(a)$ – функция Хевисайда такая, что $H(a) = 1$ при $a \geq 1$ и $H(a) = 0$ при $a < 0$; $\Lambda(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}) / f_0(\mathbf{x})$ – отношение правдоподобия ($f_1(\mathbf{x})$ и $f_0(\mathbf{x})$ – плотности вероятности признаков для прогнозируемого исправного и неисправного состояний соответственно); h – порог, определяемый выражением

$$h = \frac{(1 - P_F)K_E}{P_F(1 - K_P)}. \quad (6)$$

Переходя к использованию апостериорных вероятностей, решающее правило (5) представим в виде

$$\hat{z} = H\left(P(z=1|\,\mathbf{x}) - h_p\right), \quad (7)$$

где h_p – порог, определяемый с учетом (6) выражением

$$h_p = \frac{K_E}{1-K_P+K_E}. \quad (8)$$

Эффект от перехода к прогнозированию ТС. Выигрыш от применения прогнозирования уменьшается при уменьшении априорной вероятности P_F отказа на анализируемом интервале времени. При этом повышаются требования к точности прогнозирования. В то же время при использовании оптимального решающего правила (7), (8) не происходит снижения эффективности по отношению к системе ТОиР без прогнозирования технического состояния, т. е. $v_L \le 1$.

В общем случае информация о состоянии технического объекта может быть получена на основе обработки показаний интеллектуальных датчиков или результатов тестов. В случае использования вероятностной модели сложной системы элементарное действие по сбору информации заключается в определении значения одной из переменных y_i. Такие действия характеризуются определенной стоимостью c_i (затратами на проведение теста) и ценностью.

Величина v_L, обеспечиваемая при принятии решений о наступающих отказах с помощью (7), (8), зависит от множества переменных, значения которых доступны на момент принятия решения. Так, после проведения i-го теста решение о состоянии системы принимается с использованием результатов теста y_i на основе распределения вероятностей $P(z\,|\,\mathbf{x}, y_i)$.

Однако на момент вынесения решения о целесообразности проведения некоторого теста его результат является неизвестным, поэтому ожидаемый эффект от проведения теста определяются с использованием усреднения по множеству возможных исходов:

$$v_L(y_i,\mathbf{x}) = \sum_{y_i \in Y_i} P(y_i,\mathbf{x}) v_L(y_i,\mathbf{x}). \quad (9)$$

Проведение теста позволяет получить дополнительную информацию о состоянии технического объекта и, следовательно, приводит к меньшим значениям $\bar{v}_L(y_i,\mathbf{x})$ по сравнению с величиной $\bar{v}_L(\mathbf{x})$, обеспечиваемой при использовании показаний датчиков.

Сопоставляя сокращение издержек, вызванных простоем оборудования, и стоимость теста, можно определить ценность теста. Проведение дополнительных тестов завершается, если для любого из тестов его стоимость превышает ценность получаемой информации.

Алгоритм системы принятия решений по прогнозированию ТС ЭГПА. Процедуру принятия решений о проведении процедур ТОиР представим с помощью сети принятия решений (рис. 3), которая содержит три типа вершин и может рассматриваться как расширение байесовской сети.

Для упрощения на рис. 3 показана сеть принятия решений, соответствующая единственному тесту. Вершины жеребьевки, обозначенные овалами, как и в байесовских сетях, представляют переменные (случайные величины). Вершины принятия решений (прямоугольники) представляют возможность лица, принимающего решение, выбрать одно из доступных действий на основе рассчитываемых значений целевой функции. В сетях принятия решений, основанных на критерии минимума среднего риска, вершины, обозначенные ромбами, содержат значения элементов матрицы потерь. В рамках развиваемого подхода последствия ошибочных решений и, соответственно, значения целевой функций (4) зависят от характеристик подсистемы ТОиР K_P и K_E.

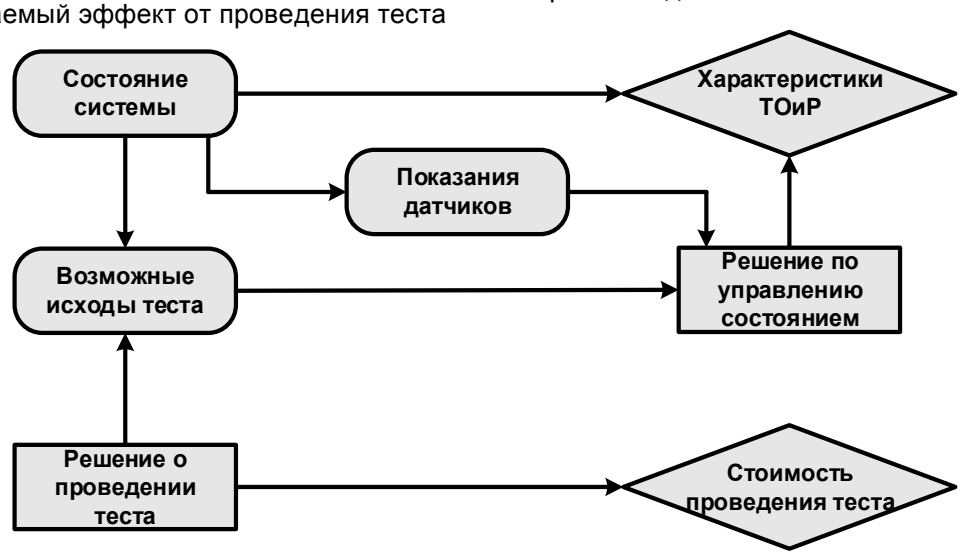


Рис. 3. Сеть принятия решений диагностической экспертной системы

В качестве примера возможного применения развиваемого подхода для управления техническим состоянием рассмотрим систему ЭГПА, информация о состоянии которой регистрируется датчиками. Выделим три состояния технической системы: исправное, предотказное и неработоспособное**.** Если выносится решение, что система исправна, то действия по управлению состоянием системы не предпринимаются и функционирование системы продолжается. В предотказном состоянии для предотвращения перехода системы в неработоспособное состояние выполняется автоматическое отключение с последующим восстановлением исправного состояния. При наличии существенной неопределенности относительно состояния системы может быть вынесено решение о проведение теста, результаты которого позволяют существенно повысить достоверность определения состояния системы.

Выводы. Достоверное прогнозирование технического состояния особо ответственных технологических агрегатов с оценкой остаточного ресурса позволяет заблаговременно предотвратить внезапные нештатные аварии на объектах повышенной опасности и перейти от планово-предупредительных ТОиР к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования со значительным экономическим эффектом.

В общем случае информация о техническом состоянии газоперекачивающих агрегатов получается на основе обработки показаний интеллектуальных датчиков и результатов тестов. При этом выигрыш от применения процедур прогнозирования увеличивается при росте априорной вероятности отказов на анализируемом интервале времени и повышении требований к точности прогнозирования.

Список литературы

1. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, С.В. Савченко, Е.А. Спиридович и др. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.

2. **Babichev S.A., Titov V.G**. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Т. 81, № 12. – P. 649–655.

3. **Milov V.R., Suslov B.A.** Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72, no. 5. – С. 1095–1101.

4. **Крюков О.В.** Оценка эксплуатационных факторов электроприводных ГПА по нормативным требованиям мониторинга // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 11. – С. 50–57.

5. **Репин Д.Г.** Концепты системы мониторинга технического состояния КС // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 12. – С. 30–35.

6. **Диагностика** и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики / Н.И. Сычев, М.Н. Сычев, В.А. Ипполитов, С.В. Воробьев. – Вологда, 2021.

7. **Макриденко Л.А., Волков С.Н., Сарычев А.П.** Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики. – М.: АО «ВНИИЭМ», 2017.

8. **Крюков О.В.** Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58.

9. **Крюков О.В.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 43–46.

10. **Intelligent** control of electric machine drive systems / D.A. Blagodarov, N.N. Dulnev, Y.M. Safonov, et al. // 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018, Novocherkassk, 03–06.10.2018 г. – Novocherkassk, 2018. – P. 8571670.

11. **Babichev S.A., Bychkov E.V.** Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Т. 81. – С. 489–494.

12. **Степанов С.Е.** Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. – 2017. – № 8(756). – С. 84–89.

13. **Зюзев А.М., Метельков В.П., Михальченко С.Г**. Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока КС МГ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 1. – С. 88–96.

14. **Крюков О.В.** Подход к прогнозированию технического состояния ЭГПА // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 9. – С. 30–34.

15. **Serebryakov A.V.** Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 66–74.

16. **Милов В.Р., Шалашов И.В.** Процедуры прогнозирования и принятия решений системе ТОиР // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 8. – С. 47–49.

17. **Васенин А.Б., Степанов С.Е.** Сравнительная оценка методов прогнозирования технического состояния электроприводов опасных производственных объектов // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23, № 11(269). – С. 54–62.

18. **Kryukov O.V.** Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Т. 83. – С. 516–520.

19. **Степанов С.Е., Васенин А.Б.** Моделирование и мониторинг термодинамических процессов в синхронных электродвигателях // Контроль. Диагностика. – 2020. – № 4. – С. 28–35.

20. **Степанов С.Е.** Выбор методов мониторинга и прогнозирования технического состояния автоматизированных электроприводов энергетических объектов // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 11. – С. 32–39.

References

1. Puzhaylo, A.F., Savchenko, S.V., Spiridovich, E.A. *Energosberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations]. N.Novgorod: Vector TiS, 2010. 570 p.

2. Babichev, S.A., Titov, V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 12, pp. 649–655.

3. Milov, V.R., Suslov, B.A. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 5, pp. 1095–1101.

4. Kryukov, O.V. Otsenka ekspluatatsionnykh faktorov elektroprivodnykh GPA po normativnym trebovaniyam monitoringa [Evaluation of operational factors of electric drive GPA according to the regulatory requirements of monitoring]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 11, pp. 50–57.

5. Repin, D.G. Kontsepty sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya KS [Concepts of the CS technical condition monitoring system]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 30–35.

6. Sychev, N.I., Sychev, M.N., Ippolitov, V.A., Vorob'ev, S.V. *Diagnostika i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya elektrotekhnicheskikh sistem energetiki* [Diagnostics and forecasting of the technical condition of electrotechnical energy systems]. Vologda, 2021.

7. Makridenko, L.A., Volkov, S.N., Sarychev, A.P. *Monitoring i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskikh sistem energetiki* [Monitoring and forecasting the technical condition of electromechanical energy systems]. Moscow: AO «VNIIEM», 2017.

8. Kryukov, O.V. Monitoring usloviy ekspluatatsii elektrodvigateley gazoperekachivayushchikh agregatov [Monitoring the operating conditions of electric motors of gas pumping units]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 50–58.

9. Kryukov, O.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya raboty asinkhronnykh elektroprivodov [Built-in system for diagnosing and predicting the operation of asynchronous electric drives]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2005, no. 6, pp. 43–46.

10. Blagodarov, D.A., Dulnev, N.N., Safonov, Y.M., Fedortsov, N.N., Kostin, A.A. Intelligent control of electric machine drive systems. *2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018, Novocherkassk, 03–06.10.2018 g*. Novocherkassk, 2018, p. 8571670.

11. Babichev, S.A., Bychkov, E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, pp. 489–494.

12. Stepanov, S.E. Sovremennyy podkhod k organizatsii remonta po dannym prognoza tekhnicheskogo sostoyaniya i resursa elektrooboru-dovaniya [A modern approach to the organization of repairs according to the forecast of the technical condition and resource of electrical equipment]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2017, no. 8(756), pp. 84–89.

13. Zyuzev, A.M., Metel'kov, V.P., Mikhal'chenko, S.G. Otsenka teplovogo sostoyaniya elektrodvigateley peremennogo toka KS MG [Assessment of the thermal state of AC electric motors KS MG]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 88–96.

14. Kryukov, O.V. Podkhod k prognozirovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya EGPA [Approach to forecasting the technical condition of the EGPA]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2016, no. 9, pp. 30–34.

15. Serebryakov, A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors. *Vestnik YuUrGU. Energetika*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 66–74.

16. Milov, V.R., Shalashov, I.V. Protsedury prognozirovaniya i prinyatiya resheniy sisteme TOiR [Procedures for forecasting and decision-making in the MRO system]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2010, no. 8, pp. 47–49.

17. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E. Sravnitel'naya otsenka metodov prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov opasnykh proizvod-stvennykh ob"ektov [Comparative assessment of methods for predicting the technical condition of electric drives of hazardous production facilities]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, vol. 23, no. 11(269), pp. 54–62.

18. Kryukov, O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, pp. 516–520.

19. Stepanov, S.E., Vasenin, A.B. Modelirovanie i monitoring termodinamicheskikh protsessov v sinkhronnykh elektrodvigatelyakh [Modeling and monitoring of thermodynamic processes in synchronous electric motors]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, no. 4, pp. 28–35.

20. Stepanov, S.E. Vybor metodov monitoringa i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomatizirovannykh elektroprivodov energeticheskikh ob"ektov [The choice of methods for monitoring and forecasting the technical condition of automated electric drives of energy facilities]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 11, pp. 32–39.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 1

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 11.02.2025. Выход в свет 28.02.2025. Формат 60x84 $^1/_8$.
Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 11,35. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ивановский государственный энергетический университет
Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ивановский государственный энергетический университет
Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8