



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

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический
и производственный журнал**

(27) 5 / 2025

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

Scientific & Technical Journal

**Известия высших учебных заведений.
ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

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

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

Ответственный секретарь ГРАЧЕВА Е.И.

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

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

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

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

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

Сайт: <https://www.energyret.ru/>

Издатель: Казанский государственный энергетический университет

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

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

Тел./факс: +7 (843) 527-92-76

Email: problems_ener@mail.ru

Типография: ООО "45"

Адрес типографии: 420023, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Чехова, 28

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2025
Т.27, № 5
Октябрь-Ноябрь
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Свидетельство о регистрации СМИ:

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

Founder: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

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

Sections:

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT (BY TYPE OF MEASUREMENT)
(TECHNICAL SCIENCES);
METHODS AND INSTRUMENTS FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS,
PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT (TECHNICAL SCIENCES);
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES);
ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES);
ELECTRIC POWER ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES);
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES (TECHNICAL SCIENCES);
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES);
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS (TECHNICAL SCIENCES).

EDITORIAL BOARD:

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

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

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

Printing House: LLC «45»

Address of the printing house 420023, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan,
28 Chekhov str.

Email: problems_ener@mail.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ,
Веществ и природной среды

ХИЛЛЕС ФЕРАС Е.С., ХИЗБУЛЛИН Р.Н. Методы анализа газа в минеральных и эфирных маслах для силовых трансформаторов	3
КОСТАРЕВ В.С. Разработка программного обеспечения для контроля технического состояния датчика прямого заряда ядерного реактора ВВЭР-1200 в статических и динамических режимах	13

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

СИНЮКОВА Т.В., ГРАЧЕВА Е.И., СИНЮКОВ А.В. Использование нечеткого регулятора в качестве элемента управления в многоприводных системах промышленных механизмов	26
ЕРШОВ М.С., ЖУРАВЛЕВ С.М. Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга параметров устойчивости промышленной электротехнической системы	41
КАРАБАДЖАК И.Д. Исследование работы стратегий управления энергией, основанных на правилах в комбинированных энергоустановках	53
МАЛЁВ Н.А. Анализ локальной робастности позиционного электропривода с применением полиномов Эрмита-Билера	67
СОЛУЯНОВ Ю.И., ФЕДОТОВ Е.А., ФЕДОТОВ А.И., АХМЕТШИН А.Р., СОЛУЯНОВ В.И. Выбор параметров системы накопления электроэнергии, используемой для покрытия пиковых нагрузок жилых и общественных зданий	86

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ТЕРЕХИН А.П., МАРЬЯНДЫШЕВ П.А. Проблемы энергетического использования осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ	106
КОРНИЛОВ С.В., ФАРДЕЕВ Л.И., КУДИНОВ Д.В., АНИСИМОВ В.Р., ЗВЕРЕВА Э.Р. Оптимизация параметров комбинированной энергоустановки на водородных топливных элементах для пассажирского транспортного средства полной массой 18 тонн городского исполнения	118
ЧЭНЬ С., ДУ Я., ЦИНЬ Л., ВЕЛЬКИН В.И. Оптимизация планирования микросетей: современные подходы и перспективы	130

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УТКИН М.О., ДМИТРИЕВ А.В., ЗИНУРОВ В.Э. Численное и экспериментальное исследование теплопереноса от цилиндрической трубы в грунте тепличного хозяйства	153
РАГУЛИН А.А., БРОНСКАЯ В.В., БАЛЬЗАМОВ Д.С. Совершенствование методов расчета узла нагревания масла с использованием цифрового моделирования и машинного обучения	168
КАЛИНИНА М.В., ПЛОТНИКОВА Л.В. Система комплексной рекуперации низкопотенциальной вторичной энергии в теплотехнологической схеме целлюлозно-бумажного производства	182

CONTENTS

METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS,
PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

HILLES FERAS E.S., KHIJBULLIN R.N. Methods of gas analysis in mineral and essential oils for power transformers	3
KOSTAREV V.S. Development of software for controlling the technical condition of the self-powered neutron detectors of the VVER-1200 nuclear reactor in static and dynamic modes	13

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

SINYUKOVA T.V., GRACHEVA E.I., SINYUKOV A.V. Using a fuzzy controller as a control element in multi-drive systems of industrial mechanisms	26
ERSHOV M.S., ZHURAVLEV S.M. Application of artificial neural networks for monitoring stability parameters of electrical engineering systems	41
KARABADZHAK I.D. Research of rule-based energy management strategies for hybrid powertrains	53
MALEV N.A. Analysis of local robustness of a positional electric drive using Hermite-Biehler polynomials	67
SOLUYANOV Yu.I., FEDOTOV E.A., FEDOTOV A.I., AKHMETSHIN A.R., SOLUYANOV V.I. Selection of parameters of an electricity storage system used to cover peak loads of residential and public buildings	86

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

TEREKHIN A.P., MARYANDYSHEV P.A. Problems of sewage sludge energy utilization in a fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT	106
KORNILOV S.V., FARDEEV L.I., KUDINOV D.V., ANISIMOV V.R., ZVEREVA E.R. Optimization of the parameters of a combined hydrogen fuel cell power plant for a passenger vehicle with a gross weight of 18 tons of urban use	118
CHEN X., DU Y., QIN L., VELKIN V.I. Optimization of microgrid scheduling: current approaches and prospects	130

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

UTKIN M.O., DMITRIEV A.V., ZINUROV V.E. Numerical and experimental study of heat transfer from a cylindrical pipe in greenhouse soil	153
RAGULIN A.A., BRONSKAYA V.V., BALZAMOV D.S. Improvement of oil heating unit calculation methods using digital modeling and machine learning	168
KALININA M.V., PLOTNIKOVA L.V. The system of complex recovery of low-potential secondary energy in the thermal technology scheme of pulp and paper production	182

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.314.21

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-3-12

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГАЗА В МИНЕРАЛЬНЫХ И ЭФИРНЫХ МАСЛАХ ДЛЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Хиллес Ферас Е.С., Хизбуллин Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
bioferas2020@gmail.com, Robert.Khizbullin@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В последнее время все чаще используются силовые трансформаторы с минеральным биоразлагаемым изоляционным маслом, поскольку оно экологически безопасно и биоразлагаемо. Силовые трансформаторы являются основным и крайне важным оборудованием в электроэнергетических системах. *МЕТОДЫ.* Для стабильной работы системы особое значение имеют методы диагностики. В газовом анализе (ГА) минерального масла существуют свои методы диагностики, которые нельзя напрямую применять для других масел. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Рассмотрена взаимосвязь между газовой выделением и деструктивными процессами, протекающими в минеральном масле. В данном исследовании были проведены испытания на локальный нагрев, частичный разряд и дуговой разряд в масле для изучения газообразования при этих условиях. На основе полученных результатов обсуждались механизмы газообразования в зависимости от температуры нагрева, энергии разряда и других факторов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложенные в данной работе методы, основанные на экспериментальных данных, имеют важное значение, так как указывают перспективные направления диагностики минеральных масел. Точность этих методов может быть повышена за счет оптимизации с использованием данных эксплуатируемых трансформаторов.

Ключевые слова: минеральное масло; газовый анализ; частичный разряд; газообразование; пиролиз; хроматографический анализ газов.

Для цитирования: Хиллес Ферас Е.С., Хизбуллин Р.Н. Методы анализа газа в минеральных и эфирных маслах для силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 3-12. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-3-12.

METHODS OF GAS ANALYSIS IN MINERAL AND ESSENTIAL OILS FOR POWER TRANSFORMERS

Hilles Feras E.S., Khizbullin R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
bioferas2020@gmail.com, Robert.Khizbullin@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Recently, power transformers with mineral biodegradable insulating oil have been increasingly used, since it is environmentally friendly and biodegradable. Power transformers are the main and extremely important equipment in electric power systems. *METHODS.* Diagnostic methods are of particular importance for the stable operation of the system. Gas analysis (GA) of mineral oil has its own diagnostic methods that cannot be directly applied to other oils. *RESULTS.* The relationship between gas evolution and destructive processes

occurring in mineral oil is considered. In this study, tests were carried out for local heating, partial discharge and arc discharge in oil to study gas formation under these conditions. Based on the results obtained, gas formation mechanisms were discussed depending on the heating temperature, discharge energy and other factors. **CONCLUSION.** The methods proposed in this paper, based on experimental data, are important, since they indicate promising areas for diagnosing mineral oils. The accuracy of these methods can be improved by optimization using data from operating transformers.

Keywords: mineral oil; gas analysis; partial discharge; gas formation; pyrolysis; gas chromatographic analysis.

For citation: Hilles Feras E.S., Khizbullin R.N. Methods of gas analysis in mineral and essential oils for power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 3-12. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-3-12.

Введение (Introduction)

Электротехническое оборудование, заполненное энергетическим маслом, является основным компонентом промышленных предприятий, осуществляющих производство и передачу электроэнергии различным потребителям. В процессе эксплуатации трансформаторного оборудования под влиянием высокой температуры и негативных факторов окружающей природной среды энергетические масла окисляются с образованием различных продуктов, к числу которых относятся газообразные вещества, такие как метан, ацетилен, этилен оксид углерода и другие, накопление которых в замкнутой системе может привести к взрыву и выводу из эксплуатации силовых трансформаторов [1-2]. Кроме того, в процессе эксплуатации маслonaполненного электрооборудования происходит разрушение бумажной изоляции с образованием фурановых соединений, которые попадают в трансформаторное масло и их содержание определяют различными инструментальными методами для проведения диагностических процедур [3-4].

Для продления срока эксплуатации энергетического масла в него вводят антиокислительную присадку, в качестве которого наиболее часто используют «Ионол» [5]. При этом большое значение придается извлечению антиокислительной присадки из трансформаторного масла с использованием жидкостной экстракции органическими растворителями [6-8].

Электроизоляционное масло, используемое в трансформаторах, в основном обладает следующими основными эксплуатационными характеристиками [1, 9]:

- А. высокое напряжение пробоя и хорошее объемное удельное сопротивление;
- В. должен обладать низкой вязкостью и отличными охлаждающими свойствами;
- С. должен обладать отличной устойчивостью к воздействию кислорода и тепла и химически стабилен;
- Д. не вызывать коррозии металлов и других компонентов.

Существует три основных компонента: углеводороды на основе парафина с углеродной цепью, соединенной в цепочку, углеводороды на базе нафтена, соединенные в кольцо, и ароматические углеводороды с бензольным кольцом. Минеральное масло получают путем переработки сырой нефти, используемой в качестве сырья. В ходе переработки *n*-парафин и полициклические ароматические вещества в умеренной степени удаляются с помощью таких процессов, как депарафинизация, экстракция растворителем и гидрирование, поскольку не углеводородные компоненты, содержащиеся в сырой нефти, также влияют на качество изоляционного масла. Современные минеральные масла используются в электрооборудовании, например, в трансформаторах с масляным охлаждением.

При техническом обслуживании маслonaполненного электротехнического оборудования их состояние контролируется механическими, электрическими и химическими методами на предмет внутренних неисправностей, в дополнение к визуальному осмотру, для заблаговременного предотвращения аварий и раннего обнаружения неисправностей. В дополнение к этому, измеряются свойства самого изоляционного масла, которые используются для управления техническим обслуживанием. Ниже приводится краткое описание метода обнаружения неисправностей масляного трансформатора.

– Обнаружение внутренних неисправностей:

- А. Механические методы

В. Электрический метод

С. Химические способы:

1) измерение свойств изоляционного масла

Из трансформатора отбирают изолирующее масло для измерения содержания влаги, пробивного напряжения, объемного удельного сопротивления, кислотности, цвета и т.д., а также для проверки его пригодности к использованию.

2) анализ содержания газа в масле [10-13]

Исследуются абсолютное количество газа в масле, степень увеличения и относительное соотношение различных компонентов газа, а также выявляется наличие внутренней деструкции.

Поскольку изолирующее масло может быть легко отобрано даже в работающем трансформаторе, а наличие или отсутствие внутренних неисправностей и состояния может быть обнаружено точно и с высокой чувствительностью, анализ содержания газа в масле стал одним из незаменимых методов диагностики и эксплуатации маслonaполненного электрооборудования.

В последние годы получили практическое применение электроизоляционные масла, на растительной основе, которые более экологичны, чем обычные минеральные масла, и их применение постоянно расширяется. Эти изоляционные масла относятся к биоразлагаемым сложноэфирным соединениям, получаемым из растительного сырья и синтетических сложных эфиров, и называются изоляционными маслами на основе сложных эфиров. Эфирные масла с высокой способностью к биологическому разложению характеризуются низкой нагрузкой на окружающую среду. Масла, изготовленные из натуральных сложных эфиров, могут сократить использование нефтяных ресурсов, а также примечательны тем, что не содержат углерода. Несмотря на то, что использование изоляционных масел на основе сложных эфиров с различными характеристиками расширяется с каждым годом, лабораторных и опытно-эксплуатационных данных о технологии диагностики неисправностей недостаточно, и они не достигли того уровня, который может обеспечить стабильное техническое обслуживание, аналогичное минеральному маслу. При внедрении новых технологий анализа важно не только стремиться к количественному показателю испытаний, но и проводить более углубленный теоретический анализ явлений. Для этого необходимо накопить экспериментальные и практические данные и еще больше расширить методы диагностики.

Цель исследования – анализ содержания газа в трансформаторном минеральном масле при частичном, дуговом разрядах и при пиролизе.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методы диагностики масляных трансформаторов в основном делится на две части.

Ниже приведены методы диагностики неисправностей, позволяющие определить, происходит ли в данный момент перегрев или разряд внутри трансформатора, и методы диагностики износа при старении, позволяющие определить состояние трансформатора и степень износа, и оставшийся срок службы трансформатора. Первый из них называется анализом газового компонента, содержащегося в изоляционном масле, и наличия или отсутствия ее деструкции, состояния процесса на основе количества, типа, соотношения и т.д. Последний представляет собой способ определения состояния изоляционной бумаги обмотки, что указывает на износ трансформатора, и является методом определения концентрации в масле фурфурола и СО-СО₂, которые являются продуктами разложения при ухудшении свойств изоляционной бумаги. Диагностика используется для оценки степени ухудшения текущего состояния трансформатора и определения приоритетности обновления трансформатора.

В целом, легкость образования соединения может быть определена величиной энергии диссоциации связи. В таблице 1 приведены энергии диссоциации связи С-Н и связи С-С. Энергия диссоциации связей С-Н и С-С варьируется в зависимости от типа молекулы, и можно видеть, что в связях С-С одинарная связь (С₂Н₆), двойная связь (С₂Н₄), тройная связь (С₂Н₂) возрастает по мере увеличения степени ненасыщенности. Это указывает на то, что соединения с двойными или тройными связями образуются при более высоких температурах, чем С₂Н₆ с одинарной связью, и что углеводороды, такие как С₂Н₂ с тройной связью, образуются при более высоких температурах, чем С₂Н₄ с двойной связью.

Таблица 1
Table 1

Энергия диссоциации связи
Bond dissociation energy

Связь	Молекулы (АВ)	Молекулы (А,В)	Энергия диссоциации связи (кДж/моль)
С-Н	CH ₄	Н, CH ₃	431.8
	CH ₃	Н, CH ₂	457
	CH ₂	Н, СН	419
	СН	Н, С	334.7
	C ₂ H ₂	Н, C ₂ H	547
	C ₂ H ₄	Н, C ₂ H ₃	417.5
	C ₂ H ₆	Н, C ₂ H ₅	414
С-С	C ₂ H ₂	C ₂ H	956.6
	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	719
	C ₂ H ₆	C ₂ H ₃	366.4

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

Ряд зарубежных исследователей [9] рассмотрели термодинамический процесс пиролиза (более 900°C) и крекинга (400-500°C) электроизоляционных масел. В этом исследовании газообразование рассматривается в результате реакции пиролиза масла, учитывая, что основной газ, образующийся в трансформаторе, получается в результате разложения электроизоляционного масла. Константы равновесия в реакциях пиролиза парафина, нафтена и ароматических веществ, содержащихся в минеральном масле, рассчитываются по стандартной свободной энергии каждого компонента. Поскольку стандартная свободная энергия изменяется при каждой температуре, можно рассчитать равновесный продукт при каждой температуре. В ходе термодинамического процесса происходит первичная реакция, при которой исходная молекула разлагается, и вторичная реакция, при которой продукт разложения вступает в дальнейшую стадию химического преобразования. Пример расчета состава газа, полученного из C₂₀H₄₂ путем пиролиза, включая вторичное разложение, показан на рисунке 1.

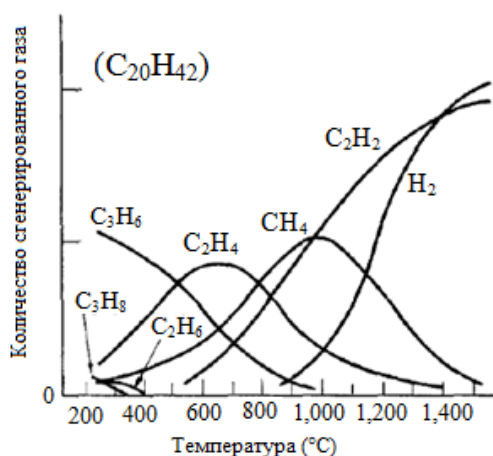


Рис. 1. Состав газов, образующихся из C₂₀H₄₂ в результате пиролиза, включая вторичное разложение
Fig. 1. Composition of gases formed from C₂₀H₄₂ as a result of pyrolysis, including secondary decomposition

*Источник: [9]. Source: [9].

Основываясь на этих результатах, можем сделать следующие выводы:

1. Пиролиз углеводородов включает в себя первичную и вторичную реакции, и соотношение образования насыщенных углеводородов в первичной реакции и ненасыщенных углеводородов во вторичной реакции велико.

2. При высокой температуре усиливается вторичная реакция, увеличивается содержание метана, этилена, пропилена, а при более высокой температуре образуется ацетилен, и чем выше температура, тем больше увеличивается его количество.

Эти аналитические данные, как правило, полностью согласуются с экспериментальными результатами анализа газов в трансформаторном масле. Анализ газов

в масле используется в качестве одной из теоретических интерпретаций диагностики неисправностей.

Результаты (Results)

Экспериментальные пути определения характеристик газообразования в масле. В дополнение к сбору данных и теоретическому изучению реального оборудования проводится оценка эксперимента, предполагающего наличие внутренней неисправности трансформатора в минеральном масле, и характеристик газа, образующегося в это время. Были получены характеристики газообразования при каждой температуре нагрева, используя устройство, которое локально нагревает масло, пропуская электрический ток через пластину из нержавеющей стали, установленную в масле. Было обнаружено, что соотношение насыщенных и ненасыщенных углеводородов тесно связано с температурой нагрева, и был предложен метод оценки температуры перегрева по соотношению газов (рис. 2).

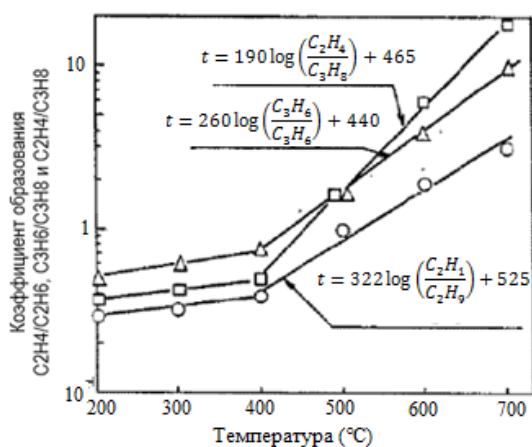


Рис. 2. Температурные характеристики производственных соотношений C_2H_4/C_2H_6 , C_3H_6/C_3H_8 и C_2H_4/C_3H_8

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

Эти результаты показывают, что основными газами, образующимися при разряде в минеральном масле, являются H_2 и C_2H_2 соответственно. Результаты этих исследований о количестве заряда в разряде и характеристиках газообразования при частичном разряде приведены на рисунке 3. Из этого результата следует, что в области, где количество разряженного заряда низкое, соотношение водорода велико, C_2H_2 невелик. Можно видеть, что C_2H_2 имеет тенденцию к быстрому увеличению в области, где количество разряженного заряда велико.

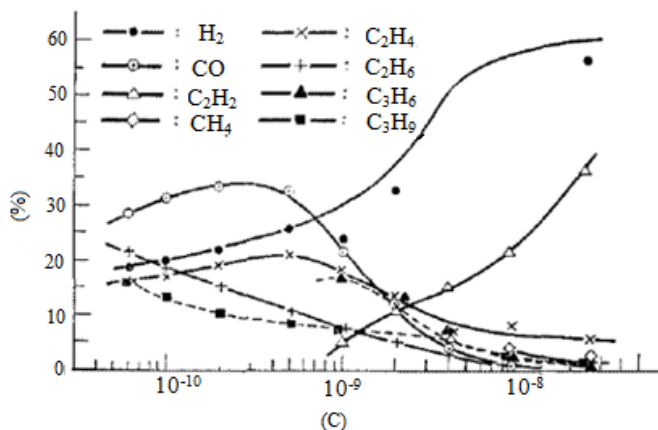


Рис. 3. Средний заряд разряда и газовый состав частичного разряда

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

На рисунке 4 показан пример разложения газа при дуговом разряде, выполненные в работах [6-8]. Можно видеть, что основными компонентами являются водород и ацетилен.

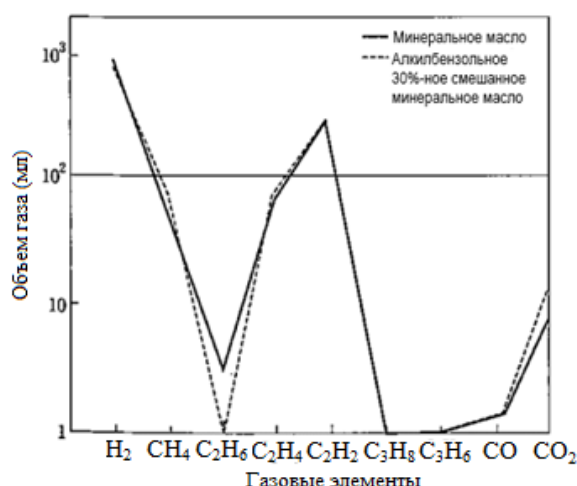


Рис. 4. Пример разложения газа дуговым разрядом в минеральном масле *Fig. 4. Example of gas decomposition by arc discharge in mineral oil*

*Источник: [6-8]. Source: [6-8].

Анализ газов, выделяющихся из энергетического масла.

1. Принцип газовой хроматографии

Хроматограф – это устройство, разделяющее смеси методом хроматографии. Хроматография – это метод, при котором жидкость (подвижная фаза), содержащая смесь разделяемых компонентов, пропускается через неподвижную фазу с очень большой площадью поверхности, например, через порошок или фильтровальную бумагу, или через неподвижную фазу, удерживающую жидкую фазу на неподвижной фазе, компоненты разделяются из-за разницы в сродстве между неподвижной фазой и подвижной фазой. Сродство между компонентами и неподвижной фазой или подвижной фазой определяется разницей в силах адсорбции/десорбции, двухфазным разделением из-за растворимости, силой ионного обмена и т. д.

Газовый хроматограф – это прибор для инструментального анализа, который применяет колоночную хроматографию для анализа газов и используется для анализа газовых компонентов и высоколетучих жидких компонентов. Газовый хроматограф состоит из колонки, которая разделяет газовые компоненты с использованием принципов хроматографии, детектора, который обнаруживает газовые компоненты, разделенные колонкой, и блока регистрации и обработки данных, который регистрирует выходной сигнал детектора и обрабатывает данные.

Газ-носитель течет с постоянной скоростью потока в приборе газового хроматографа. В качестве газа-носителя обычно используются инертные газы, такие как N₂, He и Ar. Газ-носитель, который поступает в прибор, проходит через трубку, называемую колонкой, заполненную насадочным материалом, проходит через детектор и выпускается наружу. Колонка установлена в термостатируемой печи и точно контролируется в соответствии с условиями анализа. Когда пробный газ вводится из секции ввода образца, газовые компоненты, содержащиеся в образце, вводятся в колонку вместе с газом-носителем. Газовые компоненты, введенные в колонку, текут к выходу колонки, взаимодействуя с насадочным материалом в колонке. Детектор, который может обнаруживать газовые компоненты, содержащиеся в образце, подключается к выходу колонки, и когда поступает компонент, отличный от газа-носителя, он преобразует его в электрический сигнал, соответствующий его концентрации, и выводит его. Взаимодействие между насадочным материалом и газовыми компонентами, содержащимися в образце, варьируется в зависимости от типа компонента, поэтому время, необходимое для достижения каждым компонентом выхода колонки, варьируется. Детектор выводит электрический сигнал, соответствующий компоненту, который достигает выхода, поэтому, если выход детектора контролируется, выход разделенных компонентов будет записан как пик. Время от введения образца до обнаружения каждого компонента (время удерживания) является постоянным при тех же условиях, поэтому по времени удерживания можно определить, к какому компоненту принадлежит каждый пик. Кроме того, поскольку размер пика

соответствует количеству компонента, можно количественно определить компонент. При анализе газа в масле газ в масле извлекается перед измерением с помощью газовой хроматографии, а извлеченный газ количественно определяется с помощью газовой хроматографии.

Газовая хроматография позволяет определять каждый индивидуальный компонент в масле при их совместном присутствии, поэтому в одном образце обычно измеряют девять компонентов (до газов C_2): N_2 , O_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO и CO_2 .

2. Колонки, используемые в анализе газа в масле

Для колонок газового хроматографа материал насадки, внутренний диаметр колонки и длина должны быть выбраны в соответствии с целью анализа. Поскольку характеристики разделения различаются в зависимости от используемой системы, должны быть установлены условия для полного разделения целевого аналита. Для анализа неорганических газов и углеводородных газов, измеряемых в анализе газа в масле, часто используются насадочные колонки, в которых материал насадки упакован в трубы из нержавеющей стали.

3. Детекторы, используемые в анализе газа в масле

На сегодняшний день было объявлено о более чем 30 типах детекторов для газовых хроматографов. В анализе газа в масле анализируются неорганические газы, такие как H_2 , N_2 и O_2 , углеводородные газы, такие как CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 и C_2H_2 , а также CO и CO_2 . Обычно для неорганических газов, CO и CO_2 используется детектор теплопроводности (ДТ), а для углеводородных газов – детектор ионизации водорода (ДИВ). ДТ – это детектор, который использует разницу в теплопроводности газов. Как показано на рисунке 5, постоянный расход газа-носителя всегда течет со стороны R_1 в качестве эталона, а газ, прошедший через колонку, течет со стороны R_2 . Когда газовые компоненты в образце, разделенные колонкой, достигают детектора, между газами, протекающими через R_1 и R_2 , возникает разница в теплопроводности, и газ обнаруживается мостовой схемой. Поскольку ДТ – это детектор, который использует разницу в теплопроводности с газом-носителем, он чувствителен ко всем газам, кроме газа-носителя. В принципе, чем больше разница в теплопроводности с газом-носителем, тем выше чувствительность. Поэтому необходимо выбирать газ-носитель с учетом типа анализируемого газа.

ДИВ обнаруживает ионы, образующиеся при сгорании компонентов в пробе газа, вводимой в пламя водорода. ДИВ может обнаруживать почти все органические вещества и является высокочувствительным детектором для углеводородных газов, с чувствительностью в 10-1000 раз выше, чем у ДТ. Он также имеет широкий динамический диапазон. CO и CO_2 не могут быть обнаружены ДИВ, но они могут быть преобразованы в CH_4 с помощью метанизатора, а затем обнаружены ДИВ для высокочувствительного анализа.

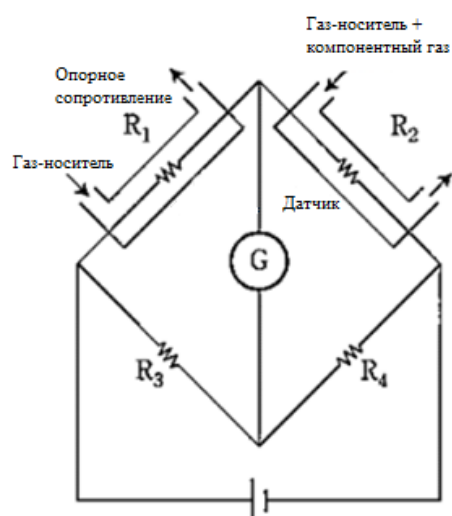


Рис. 5. Детектор по теплопроводности (ДТ)

Fig. 5. Thermal conductivity detector (TCD)

*Источник: [3]. Source: [3].

Диагностика с помощью анализа газа в масле. Данные анализа газа в масле методом газовой хроматографии используются для определения того, является ли трансформатор рабочим или дефектным, уровня дефектности и типа дефектности, используя различные стандартные значения, диагностические методы и диагностические диаграммы. Для

трансформаторов, использующих минеральное масло, были накоплены различные экспериментальные данные, проведен теоретический анализ, а данные анализа газа в масле реальных трансформаторов и проверки фактических ненормальных условий были широко проведены и превратились в методы диагностики дефектов.

Заключение (Conclusions)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Техническое обслуживание трансформаторов, и их диагностика, которые являются основным силовым оборудованием, имеют важное значение для стабильной подачи электроэнергии, и это остается верным даже сейчас, когда методы генерации электроэнергии диверсифицируются. Разработанная технология диагностики внутренних отклонений в трансформаторах с помощью анализа газа в энергетическом масле, актуальна и востребована.

Масляные трансформаторы, основа энергетического оборудования, заполнены большим количеством изоляционного масла, и большую часть которого в настоящее время составляет минеральное масло. Минеральное масло, которое производится из нефти, не является материалом, который будет использоваться в долгосрочной перспективе, поскольку, если его сжигать при утилизации, оно будет выделять большое количество CO₂. Загрязнение окружающей среды также является проблемой, если оно попадет в окружающую среду. Биоразлагаемое (эфирное) изоляционное масло было создано как решение этой проблемы. Оно хорошо поддается биологическому разложению, а те, которые производятся из сырья, такого как растительное масло, могут производиться постоянно и, можно сказать, являются устойчивыми. По этим причинам переход с минерального масла на эфирное масло будет неизбежен, чтобы поддерживать энергосистему надолго и стабильно.

Методы анализа газа в масле, разработанные для минеральных масел, также считаются очень эффективными для эфирных масел. Эфирное масло, будучи органическим веществом, выделяет газ при перегреве и разряде, как и минеральное масло. Анализ газа в масле очень удобен, поскольку он высокочувствителен и может проводиться без остановки трансформатора. Еще одним важным преимуществом является то, что можно использовать то же самое оборудование для отбора проб, методы и аналитические приборы, которые используются для минерального масла. Поэтому, установив технологию анализа газа в масле для эфирных масел и накопив данные, мы считаем, что можно будет обеспечить диагностику внутренних отклонений, аналогичную той, которая использовалась до сих пор.

Как упоминалось выше, технология диагностики эфирного масла все еще находится в стадии разработки. Мы считаем, что все еще не хватает экспериментальных данных и исследований для проверки явления газообразования. Теоретический анализ также необходим. В этом исследовании мы использовали экспериментальное устройство для исследования характеристик газообразования при локальном нагреве, частичном разряде и дуговом разряде, которые являются типичными внутренними дефектами в трансформаторах, генерируемыми в масле. Мы исследовали, как тип и соотношение генерируемого газа изменяются в зависимости от типа дефектов, температуры и энергии разряда. На основе полученных данных мы также увидели показатели, которые можно использовать для диагностики внутренних дефектов.

Литература

1. Липштейн Р. А, Шахнович М.И. Трансформаторное масло. Изд. 3-е, перераб. и доп-м.: Энергоатомиздат, +983, -296с.
2. Gnanasekaran D. Chavidi V.P. Vegetable Oil: An Eco-friendly dielectric Insulator, In Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids, Springer Berlin/ Heidelberg Germany/2018? p.101-124
3. ГОСТ Р МЭК 61198-2013. Масла изоляционные нефтяные. Методы определения 2-фурафура и родственных соединений. Введ. 01.01.2013. -М.: Стандартинформ. 2013.-69с
4. РД 34.43.206-94. Методика количественного химического анализа. Определение содержания производных фурана в электроизоляционных маслах методом жидкостной хроматографии. М.:ОРГРЭС. +995 -12с.
5. Коробейников С.М, Лютиков М.Н. Исследование технологических операций, влияющих на определение концентрации присадки Ионол изоляционном масле высоковольтного оборудования. Проблемы региональной энергетики, 2018, к 36, р-97-105.
6. Нгуен Дуй Хунг, Снигерева Ю.В, Танеева А.В, Новиков В.Ф Влияние природы органического растворителя на процессы разделения антиокислительной присадки в трансформаторном масле газохроматографическим методом// Известие высших учебных заведений. Проблемы энергетики .2020,т.22, №6,-с.211.220 ДОУ:10.30724/1998-9903-2020-22-6-211-220.

7. Ngok Dan Vu, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Improvement of the gas chromatographic method for diagnosing developing defects in oil-filled electrical equipment based on the analysis of furan compounds // E3s Web of Conferences. SUSE-2021.- V.288.- No. 01080.- 4 P. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801080>

8. N.D. Hung, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Determination of the antioxidant additive "Ionol" in transformer oil by gas chromatographic method. // // E3S Web of Conferences. SUSE-2021. V. 288.- No. 01081 - 4 P <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801081>

9. Цукиока, Ёсиро, Сугавара, Кацуо, Оэ, Эцуо, «Поведение разлагающегося газа изоляционного масла из-за локального нагрева», Труды IEEE по электротехнике, т. 98, № 7, стр. 381-388, 1978 г.

10. Хироши Кувахара, Кейджи Цурута, Тосицугу Исии, Дзюн Ёсинага, «Генерация газа разрядом в силиконовом масле», Труды Института инженеров-электриков Японии, Vol. 97, № 5, стр. 267-275, 1977.

11. Сёдзи Хирабаяси, Наонобу Сиоми, Наоя Ямада, Сигэо Шода, «Выработка газа с помощью коронного разряда в масле», Mitsubishi Electric Технический обзор, Vol. 45, № 8, стр. 1025-1023, 1971.

12. Ёсиаки Хитоцубаши, Тосио Котакэ, Фумио Савада, Ген Тадзуме, Шун Осава, Сабуро Кумагаи, «Исследование диагностики неисправностей трансформатора (часть 2)», Такаока Review, том 26, № 89, стр. 188-197, 1979.

13. Японская ассоциация измерений и анализа окружающей среды, Краткое руководство к специалисту по измерениям окружающей среды, том 26. 8, Maruzen, 2007.

Авторы публикации

Хиллес Ферас Е.С. – аспирант кафедры «Электротехнические комплексы и системы» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. bioferas2020@gmail.com

Хизбуллин Роберт Накибович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. Robert.Khizbullin@mail.ru

References

1. Lipshteyn R. A, Shakhnovich M. I. Transformer oil. 3rd ed., revised and add-m.: Energoatomizdat, +983, -296 p.

2. Gnanasekaran D. Chavidi V. P. Vegetable Oil: An Eco-friendly known Insulator, In Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids, Springer Berlin/ Heidelberg Germany/2018? p. 101-124

3. GOST R IEC 61198-2013. Insulating petroleum oils. Methods for determination of 2-furfural and related compounds. Introduced 01.01.2013. -M.: Standartinform. 2013.-69s

4. RD 34.43.206-94. Methodology of quantitative chemical analysis. Determination of the content of furan derivatives in electrical insulating oils by liquid chromatography. Moscow: ORGRES. +995 -12s.

5. Korobeynikov S.M., Lyutikov M.N. Study of technological operations affecting the determination of the concentration of the Ionol additive in the insulating oil of high-voltage equipment. Problems of regional energy, 2018, k 36, p-97-105.

6. Nguyen Duy Hung, Snigereva Yu.V., Taneeva A.V., Novikov V.F. Influence of the nature of the organic solvent on the processes of separation of the antioxidant additive in transformer oil by the gas chromatographic method// News of higher educational institutions. Energy problems .2020, vol. 22, no. 6, - e.211.220 DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-211-220.

7. Ngok Dan Vu, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Improvement of the gas chromatographic method for diagnosing developing defects in oil-filled electrical equipment based on the analysis of furan compounds // E3s Web of Conferences. SUSE-2021.- V.288.- No. 01080.- 4 P. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801080>

8. N.D. Hung, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Determination of the antioxidant additive "Ionol" in transformer oil by gas chromatographic method. // // E3S Web of Conferences. SUSE-2021. V. 288.- No. 01081 - 4 P <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801081>

9. Tsukioka, Yoshiro, Sugawara, Katsuo, Oe, Etsuo, "Decomposition Behavior of Insulating Oil Gas Due to Localized Heating", IEEE Transactions on Electrical Engineering, Vol. 98, No. 7, pp. 381-388, 1978

10. Hiroshi Kuwahara, Keiji Tsuruta, Toshitsugu Ishii, Jun Yoshinaga, "Gas Generation by Discharge in Silicone Oil", Proceedings of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 97, No. 5, pp. 267-275, 1977.

11. Shoji Hirabayashi, Naonobu Shiomi, Naoya Yamada, Shigeo Shoda, "Gas Generation by Corona Discharge in Oil", Mitsubishi Electric Technical Review, Vol. 45, No. 8, pp. 1025-1023, 1971.

12. Yoshiaki Hitotsubashi, Toshio Kotake, Fumio Sawada, Gen Tazume, Shun Osawa, Saburo Kumagai, "Study on Transformer Fault Diagnosis (Part 2)", Takaoka Review, Vol. 26, No. 89, pp. 188-197, 1979.

13. Japan Association for Environmental Measurement and Analysis, Brief Guide to Environmental Measurement Specialist, Vol. 26, No. 8, Maruzen, 2007.

Authors of the publication

Hilles Feras E.S. – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
bioferas2020@gmail.com

Robert N. Khizbullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Robert.Khizbullin@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **19.06.2025 г.**

Отредактировано **26.06.2025 г.**

Принято **03.07.2025 г.**



РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКА ПРЯМОГО ЗАРЯДА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЭР-1200 В СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Костарев В.С.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
slavakostarev@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В работе представлены предложения по оптимизации существующих методов контроля технического состояния датчиков прямого заряда (ДПЗ) системы внутриреакторного контроля (СВРК), применяемых, в частности, на ядерных реакторах ВВЭР-1200, позволяющие увеличить точность постановки диагноза о работоспособности либо неработоспособности таких датчиков. ЦЕЛЬ. Провести оценку используемых на текущий момент методов контроля и диагностики датчиков. Представить предложения по оптимизации контроля технического состояния ДПЗ путем увеличения объема диагностической информации. Описать разработанное программное обеспечение, позволяющее определять параметры измерительной цепи ДПЗ для постановки диагноза о техническом состоянии датчика. Представить результаты обработки показаний ДПЗ реактора ВВЭР-1200 Ленинградской АЭС с использованием разработанного программного обеспечения. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялись положения и методы технической диагностики, а также теория электрических цепей и численные методы решения уравнений, реализованные в разработанном ПО при помощи MatLab. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, представлена методика оптимизации контроля технического состояния ДПЗ, основанная на расширении объема используемой диагностической информации. Описанная методика использована в качестве основы для создания специализированного ПО в среде MatLab. Разработанное ПО было использовано для определения сопротивления изоляции измерительной цепи ДПЗ ВВЭР-1200 Ленинградской АЭС. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование предложенного метода контроля технического состояния ДПЗ позволяет повысить надежность ДПЗ путем использования расширенного набора информации о техническом состоянии датчика. Результаты расчетов при помощи разработанного ПО на основе данных с ЛАЭС-2 показали, что диапазон работоспособности ДПЗ по сопротивлению изоляции может быть уменьшен на 3-4 порядка. Сравнение измеренного в ходе кампании реактора значения генерирующей способности эмиттера с вычисляемым при помощи программы показало высокую степень точности расчетов.

Ключевые слова: ДПЗ; датчик прямого заряда; контроль; электрическая цепь; диагностический признак; ядерный реактор; программное обеспечение.

Для цитирования: Костарев В.С. Разработка программного обеспечения для контроля технического состояния датчика прямого заряда ядерного реактора ВВЭР-1200 в статических и динамических режимах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 13-25. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-13-25.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION OF THE SELF-POWERED NEUTRON DETECTORS OF THE VVER-1200 NUCLEAR REACTOR IN STATIC AND DYNAMIC MODES

Kostarev V.S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
slavakostarev@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE. The paper presents proposals for optimizing the existing methods for monitoring the technical condition of self-powered neutron detectors (SPNDs) of the in-reactor monitoring system (IRMS), used, in particular, at VVER-1200 nuclear reactors, which allow increasing the accuracy of diagnosing the operability or inoperability of such sensors. **OBJECTIVE.** To evaluate the currently used methods for monitoring and diagnosing sensors. To present proposals for optimizing the monitoring of the technical condition of SPNDs by increasing the volume of diagnostic information. To describe the developed software that allows determining the parameters of the SPNDs measuring circuit to diagnose the technical condition of the sensor. To present the results of processing the SPNDs readings of the VVER-1200 reactor of the Leningrad NPP using the developed software. **METHODS.** When solving the tasks, the provisions and methods of technical diagnostics were used, as well as the theory of electrical circuits and numerical methods for solving equations implemented in the developed software using MatLab. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, presents a methodology for optimizing the monitoring of the technical condition of the SPNDs, based on expanding the volume of diagnostic information used. The described methodology is used as a basis for creating specialized software in the MatLab environment. The developed software was used to determine the insulation resistance of the measuring circuit of the SPNDs of VVER-1200 at the Leningrad NPP. **CONCLUSION.** Using the proposed method for monitoring the technical condition of the SPNDs allows increasing the reliability of the SPNDs by using an expanded set of information about the technical condition of the sensor. The results of calculations using the developed software based on data from Leningrad NPP-2 showed that the range of operability of the SPNDs in terms of insulation resistance can be reduced by 3-4 orders of magnitude. Comparison of the value of the emitter generating capacity measured during the reactor campaign with the one calculated using the program showed a high degree of accuracy.

Keywords: SPND; Self-powered neutron detector; control; electrical circuit; diagnostic feature; nuclear reactor; software.

For citation: Kostarev V.S. Development of software for controlling the technical condition of the self-powered neutron detectors of the VVER-1200 nuclear reactor in static and dynamic modes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 13-25. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-13-25.

Введение (Introduction)

Контроль технического состояния элементов активной зоны ядерного реактора необходим для оценки их остаточного ресурса и надежности. Особое значение при решении данной задачи имеет оценка состояния датчиков прямого заряда (ДПЗ), входящих в состав системы внутриреакторного контроля (СВРК) реакторов типа ВВЭР [1, 2]. СВРК представляет собой одну из основных специализированных систем контроля активной зоны реактора, предназначенной для контроля и прогнозирования остаточного ресурса активной зоны ядерного реактора, а также контроля параметров надежности и параметров, связанных с безопасностью эксплуатации реакторной установки [3, 4].

Важной особенностью контроля активной зоны является необходимость мониторинга значений полей энерговыделения, температурных значений, нахождения основных технологических параметров в эксплуатационных пределах при различных режимах работы РУ, в том числе при работе на мощности, наборе мощности, расхолаживании [5, 6]. Параметры нейтронного потока так же фиксируются при нарушении нормальной эксплуатации, что может являться ключевой особенностью при анализе работы активной зоны при нарушениях нормальной эксплуатации и наступлении исходных событий. Именно на основе показаний ДПЗ и может быть построено распределение нейтронного потока по объему активной зоны ядерных реакторов различных типов [7, 8].

В основе принципа действия ДПЗ лежит процесс преобразования нейтронного излучения в величину электрического тока [9]. Конструкция ДПЗ представлена на рисунке 1.

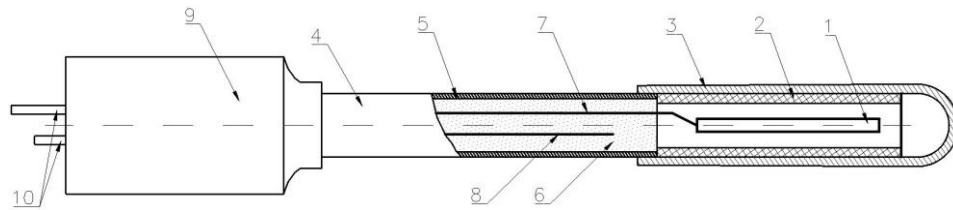


Рис. 1. Конструкция ДПЗ: 1 – эмиттер; 2 – изолятор; 3 – коллектор; 4 – линия связи; 5 – оболочка; 6 – изоляция кабеля; 7 – токовая жила; 8 – фоновая жила; 9 – гермоввод; 10 – токовыводы

Fig. 1. Design of the SPND: 1 – emitter; 2 – insulator; 3 – collector; 4 – communication line; 5 – sheath; 6 – cable insulation; 7 – current core; 8 – background core; 9 – sealed entry; 10 – current terminals

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

При этом выходной токовый сигнал ДПЗ, применяемых на реакторах ВВЭР, имеет определенное запаздывание, связанное с тем, что наибольший вклад в него вносит т. н. инерционная токовая составляющая, зависящая от скорости распада ядер эмиттера датчика [10]. Как следствие, в переходных режимах работы реактора, показания ДПЗ перестают быть пропорциональными изменению нейтронного потока в активной зоне [11]. Для устранения данной проблемы показания датчиков необходимо корректировать.

Традиционно, как указано, например, в работах [12-14] для этого применяется фильтр Калмана (являющийся на сегодняшний день стандартным алгоритмом коррекции показаний ДПЗ на действующих АЭС), а также прочие аппаратные и программные методы коррекции. При этом, однако, следует отметить, что алгоритм коррекции, основанный на фильтре Калмана, имеет довольно большую чувствительность к шумам в показаниях датчиков [7], которые при работе реактора на мощности могут возникнуть как из-за токов линии связи, составляющих в выходном токовом сигнале ДПЗ 3-5%, а также при переходных режимах, сопровождающихся большими и резкими перемещениями органов регулирования системы управления и защиты, и, соответственно, большими колебаниями в показаниях датчиков. Помимо этого, фильтр Калмана достаточно сильно чувствителен к периоду измерения токового сигнала ДПЗ, при больших периодах его точность снижается, и, хотя инерционность детекторов уменьшается, быстро и точно восстановить сигнал становится затруднительно. Однако, вышеуказанные недостатки на сегодняшний день устранены, так, для исключения токов линии связи в конструкцию ДПЗ внедрена фоновая жила, а период измерения токовых сигналов в СВРК ВВЭР-1200 может быть настроен необходимым для оператора образом (стандартное значение – одна секунда).

Контроль технического состояния ДПЗ крайне важен для нормального функционирования активной зоны. В настоящее время, в качестве диагностического признака, по которому производят контроль технического состояния ДПЗ, используют величину сопротивления изоляции измерительного кабеля датчика. Уменьшение данного параметра приводит к возрастанию тока утечки в измерительной цепи, а, следовательно, к уменьшению измеряемого тока датчика, что влияет на точность определения нейтронного потока в месте его установки [15]. Однако, используя как основание для постановки диагноза о работоспособности/неработоспособности ДПЗ лишь данный признак, невозможно сделать вывод, уменьшается ли выходной ток за счет сопротивления изоляции (что приводит к росту тока утечки) либо за счет выгорания непосредственно эмиттера (что приводит к уменьшению чувствительности ДПЗ), поскольку информация о техническом состоянии самого эмиттера в данном случае отсутствует [16, 17].

Устранить данный недостаток можно, добавив к диагностическим параметрам ДПЗ, на основе которых ставится диагноз о его техническом состоянии, генерирующую способность эмиттера, а также емкость измерительной цепи ДПЗ, которая имеет значение при выполнении измерений с использованием ДПЗ в динамических режимах реактора [18].

В качестве ещё дополнительных методов контроля технического состояния ДПЗ можно выделить, например, контроль показаний ДПЗ оператором при работе реактора на мощности [19]. Оператор, управляющий энергоблоком имеет on-line доступ к информации по показаниям всех датчиков, находящихся в активной зоне. Поскольку ДПЗ сгруппированы в активной зоне по каналам (в каждом канале находится 7 датчиков), датчики одного канала ведут себя схожим образом (особенно при работе реактора в стационарном режиме). Видя сигнал СВРК о резком изменении/недоверности показаний датчика при отсутствии каких-либо изменений в показаниях остальных

датчиков в канале, оператор может принять решение об исключении данного датчика из расчетов показаний энерговыделения и необходимости его замены в период ближайшего планово-предупредительного ремонта.

Цель исследования заключается в оптимизации контроля технического состояния ДПЗ путем увеличения объема диагностической информации (диагностических признаков ДПЗ) при помощи разработанного специализированного ПО.

Научная значимость исследования состоит в улучшении существующих методов контроля технического состояния ДПЗ. Автором предлагается использовать диагностическую информацию (набор диагностических признаков ДПЗ) на разных стационарных режимах работы реактора. Увеличение объема диагностической информации позволит уточнять значения диагностических признаков ДПЗ, что увеличит точность контроля технического состояния датчиков.

Практическая значимость исследования заключается в разработке ПО для определения параметров измерительной цепи ДПЗ в статических и динамических режимах работы, что позволит оптимизировать процесс расчета интересующих диагностических признаков. При этом можно отметить что, в случае интеграции рассматриваемого ПО в системы контроля и диагностирования АЭС, внесения изменений в их аппаратную часть не потребуется, т.к. созданная программа опирается на уже существующую измерительную инфраструктуру и может получать в качестве входных данных сигналы непосредственно от ДПЗ как для рабочего, так и для диагностического режима работы измерительной цепи.

Для внедрения описываемого программного обеспечения в эксплуатацию на действующих АЭС, однако, потребуется проведение его верификации и валидации. Со стороны авторов при анализе полученных данных с действующей АЭС и сравнения их с расчетными было определено, что программа обладает достаточно высокой точностью в определении диагностических параметров ДПЗ (более подробно описано в разделе «Результаты и обсуждение»), при этом проведение независимой верификации и валидации потребует привлечения специалистов НИЦ «Курчатовский институт» (как разработчика системы СВРК) и специалистов эксплуатации АЭС с целью проведения таких мероприятий как анализ на синтезированном наборе сигналов с заранее заданными значениями диагностических параметров, ретроспективный анализ архивных данных с энергоблоков, проведения дальнейших испытаний на работающем реакторе и т.д., что может быть возможно на дальнейших этапах исследований.

Материалы и методы (Materials and methods)

Как уже было сказано выше, к диагностическим признакам, на основе которых возможно производить контроль технического состояния измерительной цепи, можно отнести генерирующую способность эмиттера ДПЗ (в данном случае Rh-104), а также сопротивление изоляции измерительного кабеля. Подробно способ диагностирования, основанный на определении данных величин, ранее был описан в работах автора [16, 18]. Для понимания дальнейших рассуждений далее опишем его кратко.

Рассмотрим эквивалентную электрическую схему замещения измерительной цепи ДПЗ в двух статических (рабочем и диагностическом), а также динамическом режиме работы. На рисунке 2 представлена измерительная цепь ДПЗ в статических режимах работы.

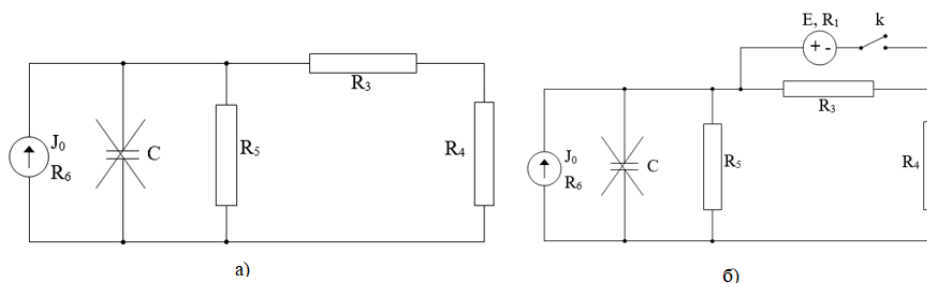


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема замещения измерительной цепи ДПЗ в статических режимах работы: а) – рабочий режим, б) – диагностический режим

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

На схеме представлены: источник тока с параметрами J_0 , R_6 (ДПЗ), C – емкость

кабеля измерительной цепи (в данном режиме не принимается во внимание, поскольку реактор предполагается работающим на стационарном уровне мощности); R_3 – резистор, вводимый для обеспечения диагностического режима; R_4 – нагрузочное сопротивление; R_5 – сопротивление изоляции кабеля измерительного канала; R_6 – внутреннее сопротивление источника тока; J_0 – генерирующая способность эмиттера (ток датчика на внутреннем участке цепи), ключ k , источник напряжения, имеющий ЭДС $E \sim 100$ мВ и внутреннее сопротивление $r_0=R_1$.

Для нахождения интересующих диагностических параметров при работе ДПЗ будем измерять величину электрического тока, протекающего через сопротивление R_4 . Обозначим эту величину как i_4 . Рассмотрим первый статический (рабочий) режим работы цепи ДПЗ. Система уравнений для определения тока i_4 будет записываться следующим образом:

$$\begin{cases} i_3 + i_5 - i_6 = 0 \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ -u_3 - u_4 + u_5 = 0 \\ u_3 + u_4 + u_6 = 0 \end{cases}; \begin{cases} u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{cases}, \quad (1)$$

где $i_3, i_4, i_5, i_6, u_3, u_4, u_5, u_6$ – токи и напряжения на представленных на рисунке 1 сопротивлениях.

Второй статический (диагностический) режим устанавливается после замыкания ключа k и завершения переходного процесса, обусловленного наличием в измерительной цепи ДПЗ паразитных емкостей. Запишем системы уравнений для рассматриваемой в данном режиме цепи:

$$\begin{cases} i_1 - i_3 - i_5 + i_6 = 0 \\ i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ u_1 + u_3 = 0 \\ u_1 - u_4 + u_5 = 0 \\ -u_1 + u_4 + u_6 = 0 \end{cases}; \begin{cases} u_1 = i_1 R_1 - E \\ u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{cases}. \quad (2)$$

Основываясь на измеренных значениях токов i_4 для обоих рассматриваемых режимов становится перейти к определению интересующих значений диагностических признаков ДПЗ J_0 и G , выразив ток i_4 из систем (1) и (2).

Для динамического режима работы цепи ДПЗ рассмотрим в качестве диагностического признака емкость кабеля C , величина которой может оказывать влияние на выходной токовый сигнал.

Схема замещения для динамических режимов работы представлена на рисунке 3.

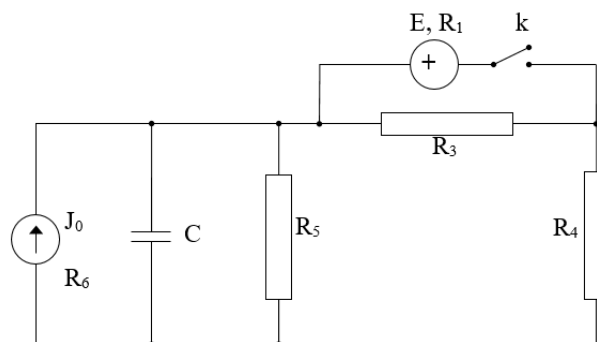


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения измерительной цепи ДПЗ в динамических режимах работы *Fig. 3. Equivalent electrical circuit of the SPND measuring circuit in dynamic operating modes*

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

Система уравнений в данном режиме по своему виду будет схожа с системами (1) и (2), однако ввиду того что рассматривается реактивный элемент цепи в виде емкости, она примет вид системы алгебраически-дифференциальных уравнений (3), а измеряемая величина электрического тока станет функцией от времени ($i_4=i_4(t)$).

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 - i_3 + i_4 = 0 \\ i_2 + i_4 + i_5 - i_6 = 0 \\ u_1 + u_3 = 0 \\ -u_1 - u_2 + u_4 = 0 \\ -u_2 + u_5 = 0 \\ u_2 + u_6 = 0 \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} u_1 = i_1 R_1 - E \\ i_2 = C \frac{du_2}{dt} \\ u_3 = R_3 i_3 \\ u_4 = R_4 i_4 \\ u_5 = R_5 i_5 \\ u_6 = i_6 R_6 - J_0 R_6 \end{array} \right. \quad (3)$$

После нахождения всех интересующих величин (вычисления проводятся аналогично таковым для статических режимов) емкость измерительной цепи, при применении численных методов решения дифференциальных уравнений, возможно определить по формуле (4):

$$C(t_i) = \frac{i_2(i+1) + i_2(i)}{2} \bigg/ \frac{u_2(i+1) - u_2(i)}{t(i+1) - t(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Далее, зная величину нейтронного потока в месте установки датчика, по формуле (5) возможно определить коэффициент чувствительности ДПЗ:

$$S = J_0 / \Phi \quad (5)$$

а также произвести оценку тока утечки при помощи сопротивления изоляции измерительной цепи ДПЗ, на основе чего возможно сделать окончательный вывод о целесообразности использования датчика.

При этом, следует учитывать ограниченную возможность получения измерительной информации для определения емкости C (связано это с величиной n в формуле (4)) в переходном процессе при включении дополнительного источника напряжения E (основным источником ЭДС является генератор тока J_0). Для повышения объема этой информации можно использовать повышение частоты регистрации токового сигнала, однако, при этом в значительной степени возрастают объемы информации в основном штатном режиме регистрации при работе ядерного реактора в стационарном режиме.

Это является проблемой для СВРК, поскольку одновременно этой системой может регистрироваться большое количество измерительных каналов. Поэтому избыточность информации за счет повышения частоты дискретизации измеряемого сигнала не требуется на действующем энергетическом реакторе типа ВВЭР в штатном режиме использования активационных датчиков, к которым относятся и родиевые ДПЗ. В то же время следствием уменьшения объема статистической информации в переходном процессе является понижение точности при определении третьего диагностического признака C – емкости измерительной цепи датчика.

Зная генерирующую способность эмиттера ДПЗ возможно перейти к решению задачи контроля технического состояния окружающих ДПЗ твэл и ТВС. Однако поскольку при переходных процессах, связанных с перемещением органов регулирования системы управления и защиты ВВЭР-1200 мощность реактора может значительно меняться (особенно во время пусков и остановов), необходимо как можно более точно определять величину J_0 . С точки зрения нейтронно-физических процессов, происходящих в реакторе, она будет зависеть от величины нейтронного потока в месте установки датчиков, величина которого при работе реактора на разных уровнях мощности будет существенно отличаться, что подводит к необходимости увеличения объема диагностической информации в зависимости от уровня мощности.

Для устранения указанного выше недостатка предлагается к существующему объему информации добавить измерительную информацию, получаемую в статических режимах при работе на другом уровне мощности ядерного реактора. Это позволит, за счет повышения объема измерений уточнить величину сопротивления изоляции измерительного кабеля и генерирующей способности эмиттера.

Одновременно путем организации дополнительных переходных процессов на новом стационарном уровне мощности можно получить дополнительную информацию для уточнения величины емкости C в динамическом режиме работы активной зоны.

Регистрация токовой информации $i_4 = i_4(t)$ при выключенном источнике дополнительного напряжения (ключ k разомкнут) в динамическом режиме работы активной зоны позволяет вычислить функцию $J_0(t)$ по формуле (6).

$$J_0(t) = C(R_3 + R_4) \frac{di_4(t)}{dt} + i_4(t)(1 + (R_3 + R_4) * (R_5 + R_6) / (R_5 R_6)) \quad (6)$$

После определения диагностических параметров на новом уровне мощности реактора, находятся уточненные значения сопротивления изоляции и емкости измерительной цепи ДПЗ $G = (G_1 + G_2) / 2$ и $C = (C_1 + C_2) / 2$, где G_1, C_1 – искомые проводимость и емкость, определяемые при работе реактора на первом уровне мощности; G_2, C_2 – проводимость и емкость, определяемые при работе реактора на втором уровне мощности.

При переходе ядерного реактора на новый стационарный уровень мощности путем перемещения органов регулирования, изменяется и нейтронный поток в месте расположения датчика и, как следствие, генерирующая мощность эмиттера ДПЗ как источника электрического тока. Поэтому для определения величины чувствительности датчика S необходима информация о величине нейтронного потока в месте расположения ДПЗ на рассматриваемых уровнях мощности. Эта информация должна быть получена на основе расчетов или непосредственных измерений нейтронного потока.

Функцию $J_0(t)$ необходимо подвергнуть корректировке для устранения инерционности датчика. В результате этого получается откорректированная временная зависимость $\hat{J}_0(t)$, пропорциональная нейтронному потоку в месте расположения данного детектора нейтронного потока (ДПЗ), т.е. $\Phi(t) \sim \hat{J}_0(t)$. При этом определяются откорректированные значения генерирующей способности эмиттера \hat{J}_0^1 и \hat{J}_0^2 на двух стационарных уровнях мощности ядерного реактора N_1 и N_2 (в начале и в конце динамического режима).

По откорректированным значениям генерирующей способности эмиттера \hat{J}_0^1, \hat{J}_0^2 для двух стационарных уровней мощности и значениям нейтронного потока вблизи поверхности ДПЗ F_1, F_2 находятся откорректированные значения коэффициентов чувствительности датчика $S_1 = \hat{J}_0^1 / F_1$ и $S_2 = \hat{J}_0^2 / F_2$, которые затем усредняются.

С целью автоматизации вычислений, осуществляемых в рамках описанной выше математической модели, представляется целесообразным разработать и внедрить специализированное программное обеспечение. Такое ПО должно быть ориентировано на практическое применение модели и обеспечивать определение значений, описываемых в данной работе диагностических признаков ДПЗ. Данное программное обеспечение было реализовано с использованием программного пакета Matlab. На разработанную программу было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [20].

Созданная при помощи MatLab Live Editor программа сочетает в себе возможности моделирования как статических, так и динамических режимов работы измерительной цепи ДПЗ, а также включает методы диагностики ее параметров на основе экспериментальной и расчетной информации. Программа представляет собой набор функций, направленных на обработку входных данных и приведения их к необходимому формату для дальнейших вычислений, расчет параметров электрической цепи при помощи численных методов решения уравнений (метод Рунге-Кутты), а также вывод результатов в виде численных массивов данных и графиков. ПО не имеет графического интерфейса, ввод исходных данных производится при помощи командной строки MatLab. Изменение констант (задаваемых параметров цепи ДПЗ) производится непосредственно в коде программы.

Входными данными для программы служат массивы токовых сигналов, регистрируемых с ДПЗ и передаваемых из системы внутриреакторного контроля. Программа позволяет обрабатывать данные как по одному каналу, так и по нескольким каналам одновременно, что расширяет её применимость. При анализе входных данных особое внимание уделяется временным интервалам, в которых наблюдаются резкие изменения величины тока относительно предыдущих значений. Такие изменения могут свидетельствовать о потенциально некорректной работе датчика. Для выявления этих аномалий в программный алгоритм внедрена функция сравнения текущего значения тока с усредненным значением двух предшествующих точек. Если наблюдается относительное изменение более чем на 1%, данная временная точка классифицируется как потенциально аномальная и заносится в память системы для последующего анализа.

После обработки исходных данных и определения аномальных точек, программа приступает к моделированию электрической цепи ДПЗ. Моделируемая цепь аналогична

такowym, представленным на рисунках 1 и 2: задаются известные параметры элементов цепи такие как сопротивления элементов и ЭДС.

При проведении моделирования рассматриваются как статические, так и динамические режимы функционирования цепи. В статическом режиме программа производит расчет всех токов и напряжений на отдельных участках схемы, принимая во внимание параметры, заданные исходно. Особое внимание при этом уделяется току утечки, представляющему собой часть общего тока, поступающего от источника, но проходящего через его внутреннее сопротивление. Вычитая ток утечки из общего тока, можно получить значение полезного тока, реально поступающего в измерительную цепь. Напряжения в различных точках цепи рассчитываются с использованием методов анализа узловых потенциалов и через определение проводимостей элементов. При расчете цепи в динамическом режиме работы для определения емкости кабеля измерительной цепи используются численные методы решения дифференциальных уравнений.

Важной диагностической процедурой является проверка цепи при отключенном источнике ЭДС. В этом режиме программа рассчитывает новое распределение токов и напряжений, что позволяет: выделить влияние только источника тока, проверить симметрию цепи, обнаружить паразитные параметры, а также провести отдельную диагностику элементов цепи. При этом токи в ветвях пересчитываются с учетом новых условий.

По результатам расчета режимов цепи программа определяет рассматриваемые в данной работе диагностические признаки ДПЗ: сопротивление изоляции кабеля, емкость измерительной цепи и генерирующую способность эмиттера. Результаты расчетов выводятся таблиц и графиков, содержащих значения всех токов и напряжений в ветвях цепи для каждого момента времени. Программа реализована с учетом возможности изменения задаваемых параметров цепи, что позволяет рассматривать различные режимы работы цепи для ДПЗ различного типа.

В качестве среды для разработки был выбран Matlab, поскольку ранее в рамках комплексного исследования возможности определения размножающих свойств активной зоны (реактивности, традиционно определяемой при помощи ионизационных камер [21]) на основе показаний ДПЗ, автором в той же среде разработки уже были созданы и зарегистрированы расчетные программы, позволяющие определять при помощи метода обращенного решения уравнения кинетики значения реактивности, основываясь на выходных токовых сигналах ДПЗ [22]. Применение одной среды разработки позволит создать комплексный программный продукт, позволяющий производить диагностирование ДПЗ по вышеописанным признакам, осуществлять сравнение вычисленных диагностических признаков с предельно допустимыми значениями и включать в дальнейшие расчеты только работоспособные датчики, исключая те, показания которых недостоверны. При этом, однако, стоит отметить, что в случае внедрения разработанного ПО на АЭС России, безусловно требуется конвертация ПО с языка программирования MatLab на языки C/C++ (что можно сделать, например, при помощи собственных инструментов MatLab, таких как MatLab Coder). Однако, поскольку подобная конвертация потребует значительных затрат в связи с необходимостью повторной верификации ПО уже на языках C/C++, данный вопрос на текущий момент не рассматривался.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

После определения при помощи вышеописанного ПО значений интересующих диагностических признаков ДПЗ, постановка диагноза о возможности использовании датчика должна проводиться путем сравнения полученных значений искомым величин с предельно допустимыми, заданными производителем ДПЗ. При этом, поскольку ДПЗ находятся непосредственно в активной зоне реактора, окончательная постановка диагноза о техническом состоянии датчика и его замена на сегодняшний день возможна только в период останова энергоблока при проведении планово-предупредительного ремонта, когда уровень активности спадает.

Для коэффициента чувствительности в случае родиевых ДПЗ предельно допустимое значение составляет $21 \cdot 10^{-20}$ (А·см²·с)/(м·нейтр), а для сопротивления изоляции измерительной цепи – 10^6 Ом. Минимально допустимое значение емкости измерительной цепи при этом подлежит дальнейшему определению, поскольку ранее при диагностировании ДПЗ данный диагностический признак не рассматривался.

Рассмотрим в качестве примера возможность снятия части ограничений по сопротивлению изоляции измерительной цепи датчика на основе экспериментальных данных, полученных с реактора Ленинградской АЭС.

В качестве входных данных из архива СВРК для одного из датчиков, которому впоследствии был поставлен диагноз о неработоспособности, были получены массивы токовых сигналов с устраненной инерционностью одного из ДПЗ в канале активной зоны при стационарном режиме работы реактора (нейтронный поток оставался постоянным) для статических режимов работы измерительной цепи, описываемых в статье. Также со станции были получены данные о значении генерирующей способности эмиттера рассматриваемого датчика (для сравнения ее с вычисляемой в разработанном ПО). Поскольку на рассматриваемом интервале времени реактора выгорание эмиттера ДПЗ незначительно, величина J_0 считалась постоянной. Полученные данные представлены на рисунке 4.

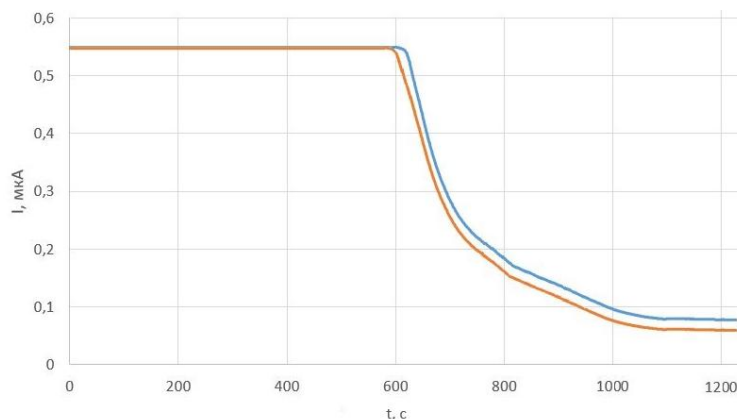


Рис. 4. Зависимость измеряемого тока i_4 от времени по архивам СВРК. Верхняя кривая соответствует рабочему режиму, нижняя – диагностическому

Fig. 4. Dependence of the measured current i_4 on time according to the IRMS archives. The upper curve corresponds to the operating mode, the lower one – to the diagnostic mode

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

Из рисунка 4 видно, что несмотря на то, что реактор находился в стационарном режиме работы (нейтронный поток оставался постоянным), показания ДПЗ в обоих режимах в определенный момент (около 600 секунд) стали изменяться, что может указывать на возрастание тока утечки и служить признаком потенциальной неисправности датчика.

Поскольку величина генерирующей способности эмиттера на рассматриваемом временном промежутке была постоянной (ее значение составляло $J_0=0,549$ мкА), изменения в выходном токовом сигнале ДПЗ могли происходить только за счет роста тока утечки, к которому приводит уменьшение сопротивления изоляции в измерительной цепи.

Для определения величины сопротивления изоляции рассматриваемого датчика при помощи рассматриваемого в работе ПО были приведены расчеты, результаты которых представлены на рисунке 5 в виде зависимости отношения i_4/J_0 к сопротивлению изоляции измерительной цепи R .

Из рисунков 4 и 5 видно, что на начальном этапе отношение i_4/J_0 для обоих режимов оставалось постоянным и равным, ток утечки, следовательно, был равен нулю. При этом при достижении ранее предельно допустимого предела 10^6 Ом ток утечки в измерительной цепи зафиксирован не был, поскольку отношение i_4/J_0 оставалось постоянным и равным единице, отклонения в показаниях ДПЗ стали отмечаться лишь при величине сопротивления изоляции $\sim 10^3-10^4$ Ом.

Таким образом, диапазон работоспособности ДПЗ возможно расширить и снять часть ограничений по сопротивлению изоляции измерительной цепи датчика. Так, данную величину становится возможным уменьшить на 3-4 порядка, а оставшееся ограничение будет связано лишь с необходимой точностью измерения тока, протекающего через нагрузочное сопротивление.

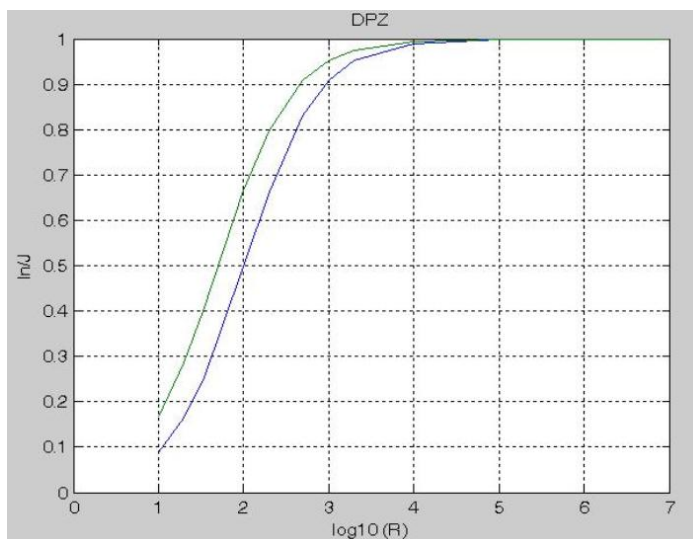


Рис. 5. Зависимость отношения измеряемого тока i_4 к величине генерирующей способности эмиттера ДПЗ J_0 к сопротивлению тока утечки R . Верхняя кривая соответствует рабочему режиму, нижняя – диагностическому

Fig. 5. Dependence of the ratio of the measured current i_4 to the value of the generating capacity of the emitter of the SPND J_0 to the resistance of the leakage current R . The upper curve corresponds to the operating mode, the lower one – to the diagnostic mode

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

В ходе вычислений также было проведено сравнение расчетной величины генерирующей способности эмиттера с фактической. Величина генерирующей способности эмиттера, определенная в ходе расчетов при помощи разработанной программы, оказалась равна 0,5458 мкА, что довольно близко к значению, полученному на работающем реакторе, благодаря чему можно судить о корректности представленной модели.

Заключение (Conclusions)

Описанные автором предложения по оптимизации контроля технического состояния датчиков прямого заряда, а также разработанное на их основе программное обеспечение, позволяют расширить диапазон работоспособности ДПЗ с 10^6 до 10^3 - 10^4 Ом по величине сопротивления изоляции измерительной цепи датчика.

Разработанное в среде MatLab ПО позволяет автоматизировать процесс расчета по описанной в работе математической модели и впоследствии при условии конвертации на языки C/C++ и проведения независимой верификации и валидации может быть интегрировано в применяемые на АЭС системы диагностирования. Сравнение расчетного значения генерирующей мощности эмиттера (0,5458 мкА) с действительным (0,549 мкА) показывает довольно высокую достоверность описанной математической модели и точность проводимых в программе расчетов.

Включение в диагностические признаки ДПЗ генерирующей способности эмиттера позволит контролировать техническое состояние датчика в зависимости от изменения его чувствительности к нейтронному потоку в месте установки, что даст возможность четко понимать зависит ли уменьшение величины выходного токового сигнала ДПЗ от выгорания эмиттера либо же от других причин, что, в свою очередь, позволит повысить надежность ДПЗ.

Использование данных по диагностическим признакам ДПЗ, зафиксированных на различных уровнях мощности реактора, позволит увеличить точность постановки диагноза о работоспособности/неработоспособности датчиков, поскольку увеличивается объем измерительной информации о емкости кабеля измерительной цепи C и сопротивлении изоляции R . При этом планируется получение экспериментальных данных от Ленинградской АЭС для подтверждения данной гипотезы.

Литература

1. Абагян А.А., Дмитриев В.М., Клебанов Л.А., и др. Система контроля и диагностики режимов работы энергоблока АЭС // Атомная энергия. 1987. Т. 63, №5. С. 311-315.
2. Асмолов В.Г., Гусев И.Н., Казанский В.Р., и др. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200 // Известия высших учебных заведения. Ядерная энергетика. 2017.

№3. С. 5-21.

3. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. М.: Наука, 2019. 398 с.

4. Tingyu W., Luo S., Cai L., et al. Simulation and experimental verification for Rh-SPND burnup effect // Annals of Nuclear Energy. 2024. Vol. 205. pp. 1-6.

5. Мительман М.Г. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоиздат, 1982. 78 с.

6. Мительман М.Г., Дубовский В.Г., Любченко В.Ф., и др. Детекторы для внутриреакторных измерений энерговыделения. М.: Атомиздат, 1977. 151 с.

7. Цимбалов С.А. Характеристики родиевого детектора ДПЗ-1М. М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1984. 17 с.

8. Калинушкин А.Е., Курченков А.Ю., Марков Д.С., и др. Детектор прямого заряда с эмиттером из металлического гафния в реакторах ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2023. №2. С. 17-19.

9. Мусихин А.М., Мильто Н.В., Курченков А.Ю., и др. Анализ показаний фоновых жил внутриреакторных детекторов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2022. №5. С. 102-105.

10. Шикалов В.Ф., Козлова Л.В., Капитанова Л.О. Исследование характеристик детекторов прямого заряда повышенной чувствительности // Вопросы атомной науки и техники. Серия : Физика ядерных реакторов. 2023. №2. С. 5-11.

11. Wu X., Cai L., Zhang X., et al. Analysis of signal cable noise currents in nuclear reactors under high neutron flux irradiation // Nuclear Engineering and Technology. 2023. Vol. 55. pp. 4628-4636.

12. Turso J., Carvajal J.V., Stafford S.C., et al. Toward the implementation of self-powered, wireless, real-time reactor power sensing // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 139. pp. 1-10.

13. Mishra A.K., Sairam K.N.V., Shimjith S.R., et al. Comparative Study of Performance of Adaptive Kalman Filtering Applied to Vanadium and Rhodium SPNDs // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55(1). pp.321-326.

14. Khoshahval F., Zhang P., Lee D. Analysis and comparison of direct inversion and Kalman filter methods for self-powered neutron detector compensation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. Vol. 969. pp. 1360-1368.

15. Грибов А.А., Кирьянов А.А., Сдобнов С.И., и др. Система контроля для обнаружения состояний датчика. Патент РФ на изобретение №13281U1. 27.03.2000.

16. Панкин А.М., Калютик А.А., Костарев В.С. Контроль технического состояния внутризонного детектора нейтронов в статических и динамических режимах // Надежность и качество сложных систем. 2023. №1(41). С. 118-125.

17. Панкин А.М., Каютик А.А., Коровкин Н.В. Способ контроля технического состояния датчика прямого заряда системы внутриреакторного контроля ядерного реактора. Патент РФ на изобретение №2783505С1. 14.11.2022.

18. Панкин А.М., Калютик А.А., Костарев В.С. Контроль состояния датчиков прямого заряда системы внутриреакторного контроля ядерного реактора в динамических режимах // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26. №3. С. 50-55.

19. Semenikhin A.V., Saunin Yu.V., Zhuk M.M. Testing of the ICMS input data diagnostic system at unit 1 of Novovoronezh NPP II // Nuclear Energy and Technology. 2017. Vol. 3. Iss. 4. pp. 297-301.

20. Костарев В.С., Панкин А.М., Калютик А.А. Программа для определения параметров измерительной цепи датчика прямого заряда ядерного реактора в диагностических целях на основе экспериментальной и расчетной информации. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024688511. 28.11.2024.

21. Куликов В.И., Попыкин А.И., Смирнова А.А., и др. Метод расчета реактивности при сбросе ОР СУЗ с использованием показаний ионизационных камер в реакторе типа ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2023. №4. С. 43-52.

22. Костарев В.С., Панкин А.М., Калютик А.А. Программа для обработки результатов внутриреакторных измерений по датчикам прямого заряда. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665402. 12.07.2024.

Авторы публикации

Костарев Вячеслав Сергеевич – аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия. *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6475-6454>, slavakostarev@yandex.ru

References

1. Abagyan AA, Dmitriev VM, Klebanov LA, et al. Sistema kontrolya i diagnostiki rezhimov raboty energobloka AES. *Atomnaya energiya*. 1987; 63(5):311-315. (In Russ).
2. Asmolov VG, Gusev IN, Kazanskii VR, et al. Golovnoi blok novogo pokoleniya – osobennosti proekta VVER-1200. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniya. Yadernaya energetika*. 2017; 3:5-21. (In Russ).
3. Arkadov GV, Pavelko VI, Finkel' BM. *Sistemy diagnostirovaniya VVER*. Moscow: Nauka, 2019. (In Russ).
4. Tingyu W, Luo S, Cai L, et al. Simulation and experimental verification for Rh-SPND burnup effect. *Annals of Nuclear Energy*. 2024; 205:1-6. doi: 10.1016/j.anucene.2024.110580
5. Mitel'man MG. *Zaryadovye detektory ioniziruyushchikh izluchenii*. Moscow: Energoizdat, 1982. (In Russ).
6. Mitel'man MG, Dubovskii VG, Lyubchenko VF, et al. *Detektory dlya vnutrireaktornykh izmerenii energovydeleniya*. Moscow: Atomizdat, 1977. (In Russ).
7. Tsimbalov SA. *Kharakteristiki rodievogo detektora DPZ-1M*. Moscow: Institut atomnoi energii im. I.V. Kurchatova, 1984. (In Russ).
8. Kalinushkin AE, Kurchenkov AYU, Markov DS, et al. Detektor pryamogo zaryada s emitterom iz metallicheskogo gafniya v reaktorakh VVER. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*. 2023; 2:17-19. (In Russ).
9. Musikhin AM, Mil'to NV, Kurchenkov AYU, et al. Analiz pokazanii fonovykh zhil vnutrireaktornykh detektorov. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*. 2022; 5:102-105. (In Russ).
10. Shikalov VF, Kozlova LV, Kapitanova LO. Issledovanie kharakteristik detektorov pryamogo zaryada povyshennoi chuvstvitel'nosti. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*. 2023; 2:5-11. (In Russ).
11. Wu X, Cai L, Zhang X, et al. Analysis of signal cable noise currents in nuclear reactors under high neutron flux irradiation. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023; 55:4628-4636. doi: 10.1016/j.net.2023.08.044
12. Turso J, Carvajal JV, Stafford SC, et al. Toward the implementation of self-powered, wireless, real-time reactor power sensing. *Annals of Nuclear Energy*. 2020; 139: 1-10. doi: 10.1016/j.anucene.2019.107252
13. Mishra AK, Sairam KNV, Shimjith SR, et al. Comparative Study of Performance of Adaptive Kalman Filtering Applied to Vanadium and Rhodium SPNDs. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(1):321-326. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.053
14. Khoshahval F, Zhang P, Lee D. Analysis and comparison of direct inversion and Kalman filter methods for self-powered neutron detector compensation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2020; 969:1360-1368. doi: 10.1016/j.nima.2020.164097
15. Gribov AA, Kir'yanov AA, Sdobnov SI, et al. *Sistema kontrolya dlya obnaruzheniya sostoyanii datchika*. Patent RUS №13281U1. 27.03.2000. (In Russ).
16. Pankin AM, Kalyutik AA, Kostarev VS. Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya vnutrizonnogo detektora neutronov v staticheskikh i dinamicheskikh rezhimakh. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*. 2023; 1(41):118-125. (In Russ).
17. Pankin AM, Kayutik AA, Korovkin NV. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya datchika pryamogo zaryada sistemy vnutrireaktorogo kontrolya yadernogo reaktora*. Patent RUS №2783505C1. 14.11.2022. (In Russ).
18. Pankin AM, Kalyutik AA, Kostarev VS. Kontrol' sostoyaniya datchikov pryamogo zaryada sistemy vnutrireaktorogo kontrolya yadernogo reaktora v dinamicheskikh rezhimakh. *Kontrol'. Diagnostika*. 2023; 26(3):50-55. (In Russ).
19. Semenikhin AV, Saunin YuV, Zhuk MM. Testing of the ICMS input data diagnostic system at unit 1 of Novovoronezh NPP II. *Nuclear Energy and Technology*. 2017. 3(4):297-301. doi: 10.1016/j.nucet.2017.11.004
20. Kostarev VS, Pankin AM, Kalyutik AA. *Programma dlya opredeleniya parametrov izmeritel'noi tsepi datchika pryamogo zaryada yadernogo reaktora v diagnosticheskikh tselyakh na osnove eksperimental'noi i raschetnoi informatsii*. Certificate of state registration of computer programs RUS №2024688511. 28.11.2024. (In Russ).
21. Kulikov VI, Popykin AI, Smirnova AA, et al. Metod rascheta reaktivnosti pri sbrose OR SUZ s ispol'zovaniem pokazanii ionizatsionnykh kamer v reaktore tipa VVER-1000. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty*. 2023; 4:43-52. (In Russ).
22. Kostarev VS, Pankin AM, Kalyutik AA. *Programma dlya obrabotki rezul'tatov vnutrireaktornykh izmerenij po datchikam pryamogo zaryada*. Certificate of state registration of computer

© Костарев В.С.

programs RUS №2024665402. 12.07.2024. (In Russ).

Authors of the publication

Vyacheslav S. Kostarev – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6475-6454>, slavakostarev@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **07.07.2025 г.**

Отредактировано **05.10.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 62-523

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-26-40

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОПРИВОДНЫХ СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Синюкова Т.В.¹, Грачева Е.И.², Синюков А.В.¹

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

stw0411@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Обеспечение безопасного функционирования действующего объекта при возникновении внештатных ситуаций, таких как недопустимое изменение момента двигателя в процессе выполнения технологической операции. *МЕТОДЫ.* Поставленные при исследовании задачи решены путем математических моделирований в среде Matlab Simulink и практических исследований. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Введение в стандартные системы управления блоков коррекции на базе нечеткой логики позволило обеспечить остановку объекта при критическом изменении момента двигателя. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование блоков коррекции, разработанных на базе нечеткой логики на промышленных многоприводных агрегатах, по сравнению с применением традиционных систем управления, позволяет обеспечить безопасность работы оборудования при возникновении внештатных ситуаций, приводит к снижению появления факторов в результате которых может возникнуть массовый брак продукции, выход оборудования из строя. Предлагаемый регулятор позволяет использовать на объектах установленные преобразователи, в которых не предусмотрена реакция на аварийные ситуации, такие как недопустимое снижение или превышение момента двигателя.

Ключевые слова: нечеткий регулятор; момент; скорость; остановка двигателя; частотный преобразователь; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

Для цитирования: Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Синюков А.В. Использование нечеткого регулятора в качестве элемента управления в многоприводных системах промышленных механизмов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 26-40. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-26-40.

USING A FUZZY CONTROLLER AS A CONTROL ELEMENT IN MULTI-DRIVE SYSTEMS OF INDUSTRIAL MECHANISMS

Sinyukova T.V.¹, Gracheva E.I.², Sinyukov A.V.¹

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

stw0411@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Ensuring the safe operation of an operating facility in the event of emergency situations, such as an unacceptable change in engine torque during a technological operation. *METHODS.* The tasks set during the study were solved by means of mathematical modeling in the Matlab Simulink environment and practical research. *RESULTS.* The introduction of fuzzy logic-based correction blocks into standard control systems made it possible to ensure that the object would stop when the engine torque changed critically. *CONCLUSION.* The use of correction units developed on the basis of fuzzy logic on industrial multi-drive units, compared to the use of traditional control systems, allows ensuring the safety of equipment operation in the event of emergency situations, leads to a decrease in the

occurrence of factors that may result in mass defects in products, equipment failure. The proposed regulator allows the use of converters installed at facilities that do not provide for a response to emergency situations, such as an unacceptable decrease or excess of engine torque.

Keywords: *fuzzy controller; torque; speed; motor stop; frequency converter; asynchronous motor; Matlab Simulink.*

For citation: Sinyukova T.V., Gracheva E.I., Sinyukov A.V. Using a fuzzy controller as a control element in multi-drive systems of industrial mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 26-40. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-26-40.

Введение (Introduction)

На предприятиях разного профиля в технологических процессах занято весомое количество промышленных механизмов, при функционировании которых возникает необходимость в создании условий, при которых обеспечивается точный контроль за выполняемыми операциями [1-4]. Степень сложности системы управления напрямую зависит от сложности выполняемых агрегатом операций, его конструктивных особенностей и т.д. Применяемые на механизмах стандартные решения не всегда позволяют получить отклик от системы управления, который будет направлен на остановку объекта при значительных критических изменениях параметров двигателя или системы управления. Использование программируемых логических контроллеров, как дополнительных объектов для существующих систем управления, позволяет сформировать ответную реакцию всей сложной системы, обеспечивая корректировку работы имеющихся исполнительных механизмов. Помимо описанной функции, контроллеры также обеспечивают анализ данных, получаемых с объекта и, при необходимости, выдачу команды на безопасную остановку механизма в случае, если наблюдается критическое изменение параметра, для исключения аварийных ситуаций и массового брака продукции [5, 6].

На предприятиях металлургического профиля для получения качественного листа стали необходимой толщины используются натяжные станции в состав которых входит несколько натяжных роликов. Для управления, которыми в последнее время наибольшее распространения получили системы типа «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель», которые позволяют осуществлять надлежащее регулирование скорости и момента на валу двигателя [7, 8].

Многодвигательные системы управления представляют наибольший интерес для исследования, так как они обладают большей сложностью, по сравнению с одноприводными механизмами. Рассматриваемая натяжная станция в своем составе содержит четыре натяжных ролика, на каждом из которых имеется отдельный электродвигатель со своей системой управления.

Значительное количество работ посвящено усовершенствованию действующих объектов за счет изменения алгоритмов систем управления или путем внесения изменений в комплектацию механизма [9, 10].

Для решения рассматриваемой проблемы, в последнее время, наибольшее распространение получили блоки, работающие на базе нечеткой логики, нечеткого регулирования и нейронных сетей [11, 12].

Материалы и методы (Materials and methods)

Сведения о рассматриваемом промышленном объекте

Натяжные станции получили применение на предприятиях металлургического профиля для поддержания натяжения и транспортировки полосы из стали различных марок. Кинематическая схема рассматриваемого объекта отражена на рисунке 1, из нее видно, что станция является многоприводной, а связь электроприводов с исполнительными механизмами, которыми являются натяжные ролики, реализована с помощью редукторов с указанным на рисунке передаточным числом (u) для каждого из роликов.

На рисунке 2 приведены данные с реального объекта, отражающие:

– верхний рисунок – представлено изменение во времени нагрузки в виде обратной связи по моменту, также показана величина необходимого добавочного момента для поддержания одинаковой скорости роликов;

– средний рисунок – показана тахограмма, выведенная как обратная связь по скорости относительно сигнала задания на скорость всей технологической части

«Vzad_centр», в ее функции входит осуществление управления скоростью всех приводов, которые реагируют на изменение данного параметра;

– нижний рисунок – показаны тахограммы четырех роликов, имеющих на станции. Наличие разницы скорости роликов обусловлено присутствием внешних воздействий и проблем, которые могут возникнуть в процессе формирования полосы, такими как, проскальзывание стальной полосы стали по поверхности ролика, что приводит к снижению воздействующей на него механической нагрузки.

Четыре электропривода установленные на натяжной станции имеют разную мощность, как правило, работают одновременно в режиме выравнивания нагрузки относительно «ведущего» или «ведомого» привода.

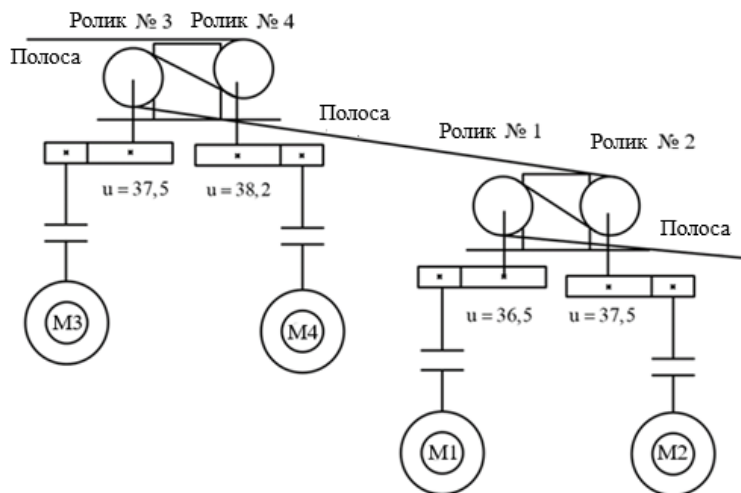


Рис. 1. Кинематика натяжной станции, отражающая заправку полосы между роликами

Fig. 1. Kinematics of the tension station, reflecting the threading of the strip between the rollers

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

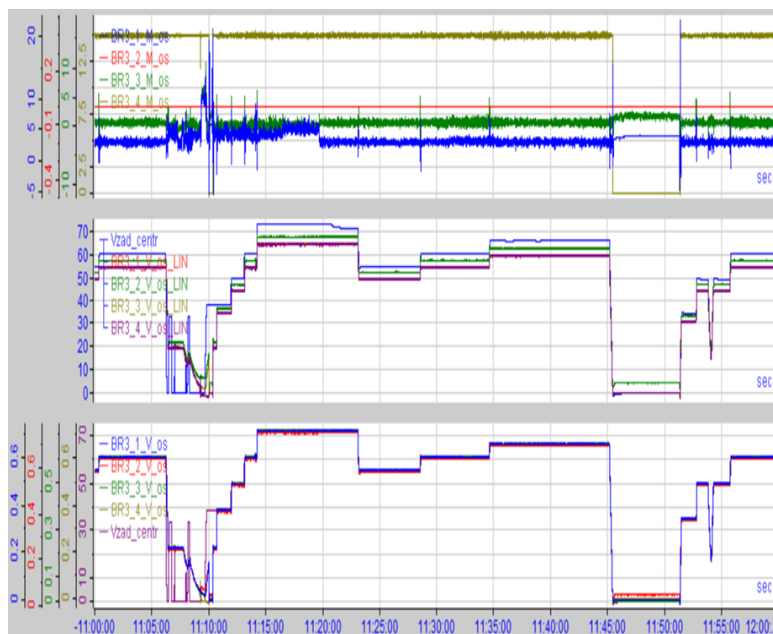


Рис. 2. Процессы, происходящие на действующем объекте

Fig. 2. Processes occurring at an operating facility

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

Система, обеспечивающая управление роликами натяжной станции, включает в себя четыре асинхронных двигателя управляемых четырьмя преобразователями частоты, с помощью которых помимо управления работой двигателей, происходит мониторинг натяжения полосы. К преобразователям частоты подключены датчики температуры и энкодеры, осуществляющие контроль за состоянием двигателей. На протяжении всего процесса работы механизма не предполагается глубокое изменение скорости вращения

двигателей и ограничение момента, поэтому применяются векторные системы управления приводами. Функции «ведущего» ролика возложены на двигатель ролика № 1, это связано с тем, что данный двигатель имеет наибольшую мощность из четырех установленных на станции, так как он осуществляет процесс вытягивания полосы из предыдущей секции, где происходила предварительная обработка полосы.

Исследование, с целью выявления оптимальной системы управления, проходило в три этапа:

- на первом этапе была изучена работа существующей системы управления роликами натяжной станции посредством ее математического моделирования в среде Matlab Simulink, позволяющего отследить работу системы многодвигательного электропривода на базе системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»;
- на втором этапе, была разработана система управления с блоком нечеткой логики для коррекции возможных не стандартных сценариев работы двигателей;
- на третьем этапе, была разработана система, демонстрирующая работу нечеткой логики для контроля скорости «ведомых» роликов натяжной станции относительно «ведущего» ролика.

Моделирование

А. Действующая система управления

Представленная на объекте многодвигательная (многоприводная) система не связана между собой механической связью, следовательно модель в среде моделирования будет составлена в виде четырех блоков, внутри которых будет реализована структура типа «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель». На рисунке 3 приведена полная модель натяжной станции в среде математического моделирования.

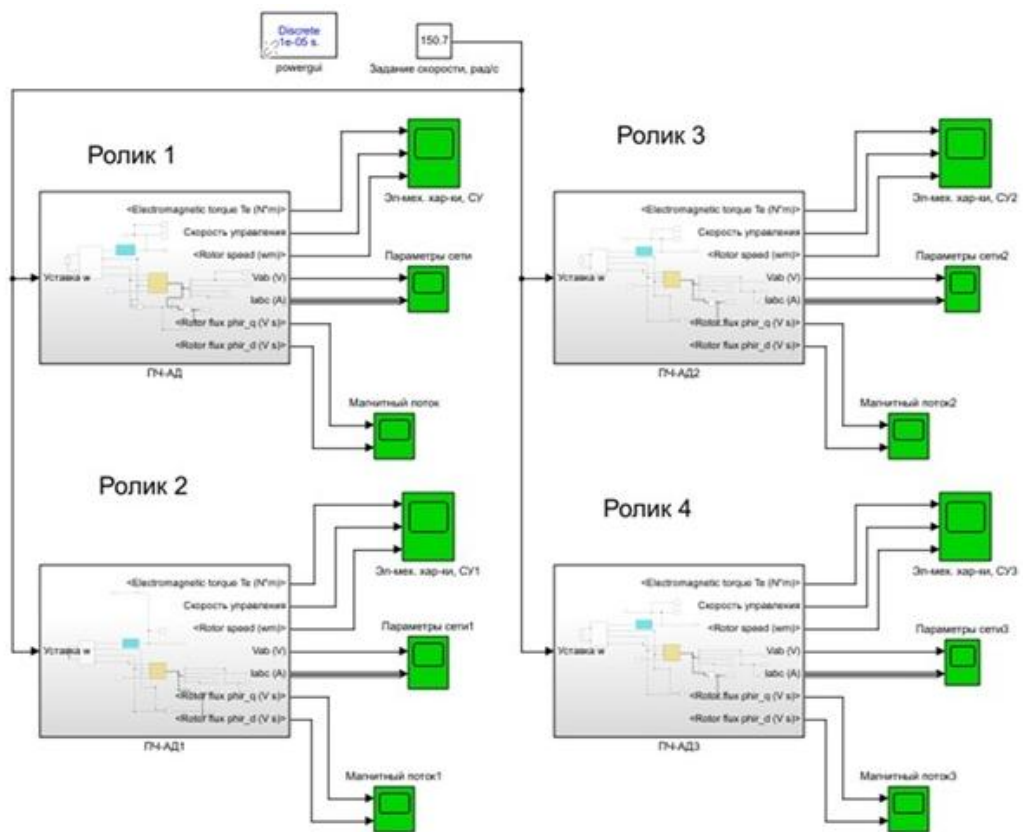


Рис. 3. Полная модель рассматриваемого объекта в Matlab

Fig. 3. Full model of the object under consideration in Matlab

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

На рисунке 4 представлена реализация системы управления для ролика №1. Системы управления для остальных роликов по своей структуре являются идентичными системе управления для ролика №1. В структуре модели можно выделить блок электродвигателя обозначенный в среде Matlab как Asynchronous Machine, блок реализующий функции инвертора, который получает питание от источника постоянного тока. Для упрощения процесса моделирования выпрямитель представлен в виде источника постоянного тока, так как он в рассматриваемом частотном преобразователе

является неуправляемой частью. Сигнал задания скорости формируется с блока Constant, он поступает на блок Vector Control, который реализует векторную систему управления, с него на инвертор на вход g , осуществляя управление ключами и работой IGBT транзисторов, и как следствие функционированием двигателя. В системе реализованы обратные связи по изменению показателей тока и скорости.

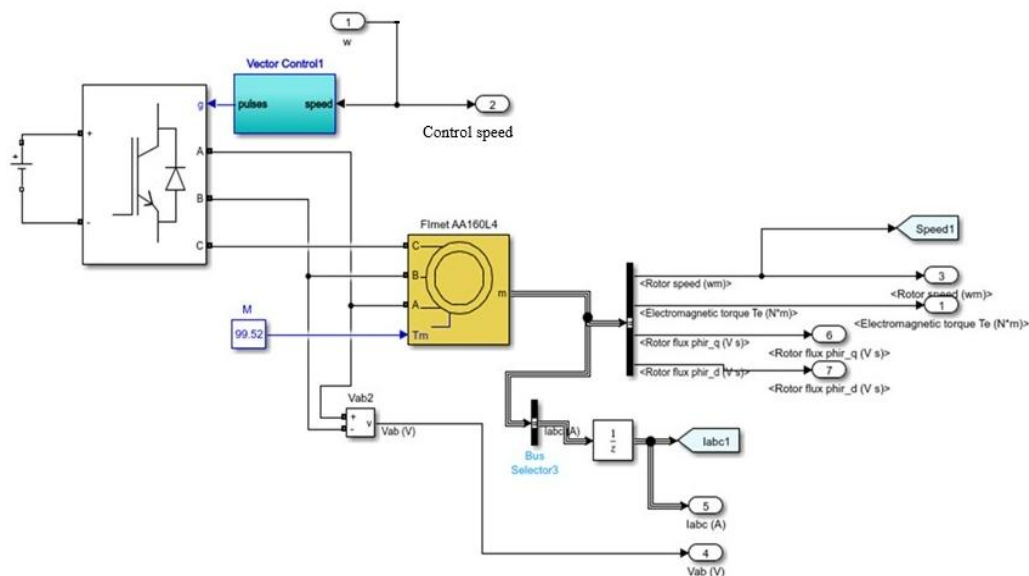


Рис. 4. Реализация в среде Matlab действующей системы управления роликом №1

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

На рисунке 5 отражены полученные при моделировании зависимости момента (верхний) и скорости (нижний) двигателя ролика №1 от времени.

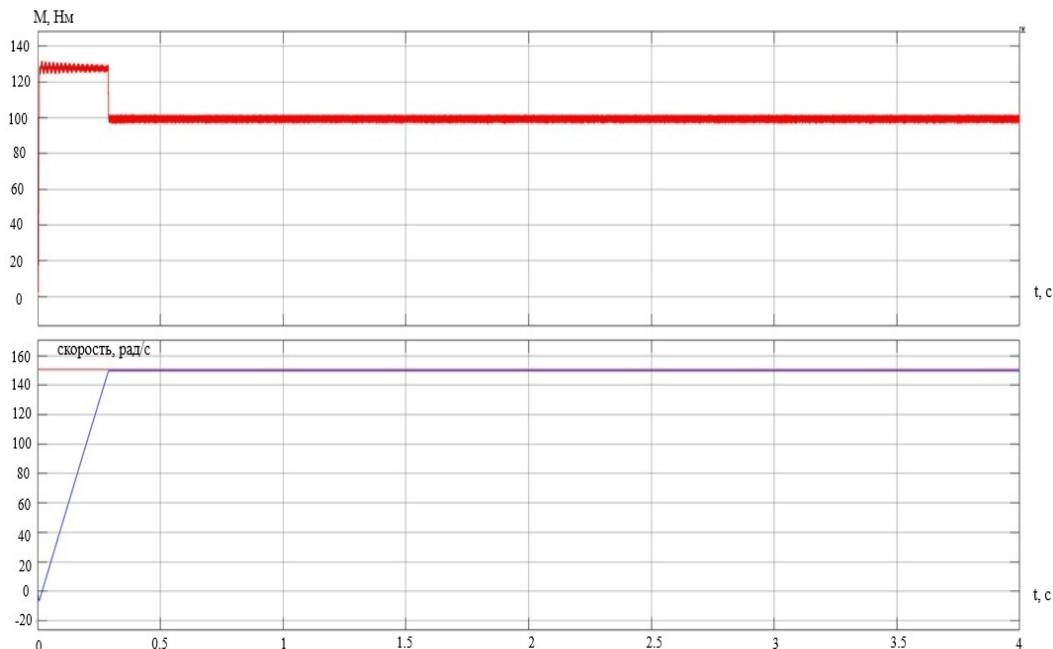


Рис. 5. Моделирование процессов в действующей системе управления

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

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что используемая стандартная векторная система управления позволяет с незначительной погрешностью осуществлять отработку задания по скорости. Но при возникновении нестандартной ситуации, к которой можно отнести потерю момента или его превышение, остановка работы двигателя возможна при условии, что в системе управления прописаны алгоритмы выхода из

данной ситуации, в остальных случаях продолжение работы двигателя может повлечь появление необратимых процессов в механизме, вызвать брак, разрыв, смятие, проходящей через ролики полосы.

На рисунках 6 и 7 показаны графики переходного процесса при потере момента и превышении момента, соответственно.

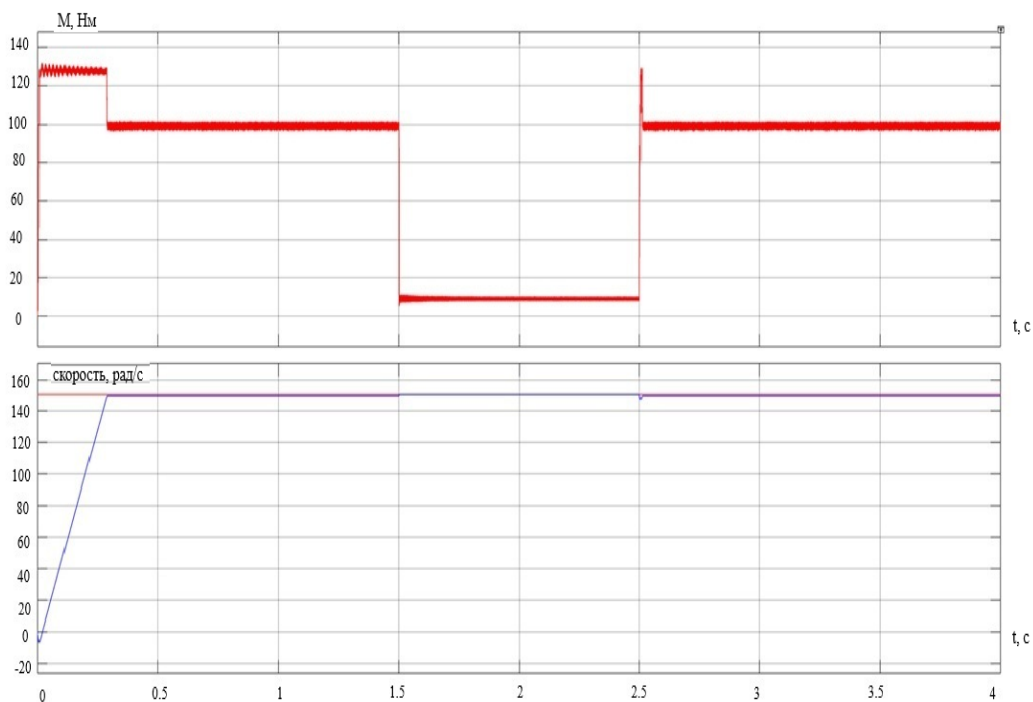


Рис. 6. Графики переходного процесса при потере момента: верхний – зависимость момента от времени, нижний – зависимость скорости от времени

Fig. 6. Graphs of the transient process during loss of torque: upper – dependence of torque on time, lower – dependence of speed on time

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

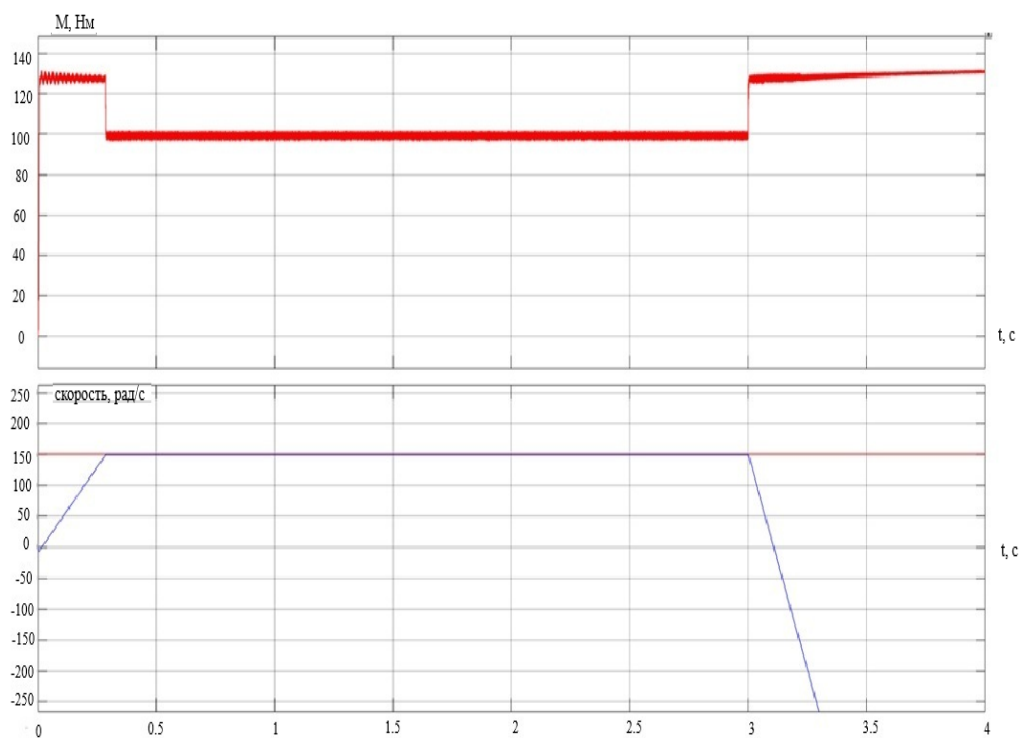


Рис. 7. Графики переходного процесса при превышении момента: верхний – зависимость момента от времени, нижний – зависимость скорости от времени

Fig. 7. Graphs of the transient process when the torque is exceeded: upper – dependence of the torque on time, lower – dependence of the speed on time

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

Б. Система с нечетким регулятором

На рисунке 8 приведена модель системы управления для ролика № 1 с введением в стандартную систему управления нечеткого регулятора. При моделировании рассматриваются две аварийные ситуации, при которых происходит изменение момента до недопустимых значений, это обрыв механической связи, возникающий из-за недопустимого снижения момента и клин, возникающий в следствии скачка момента выше критических значений. Процесс моделирования аварийных ситуаций создается за счет задания в определенные промежутки времени положительных и отрицательных значений момента, что позволяет сымитировать развитие клина и обрыва механической связи, все это происходит в пределах одной итерации. Чтобы произвести компенсацию при критическом снижении момента (обрыв) при выявлении значений момента входящих в диапазон входной функции M_{obr} в пределах $\{-10; 15\}$, выходной функцией, обозначенной как w_{korr} имеющей диапазон $\{0; 150.7\}$ формируется сигнал коррекции скорости, появившееся значение суммируется с данными сигнала задания на скорость, а затем поступает в качестве сигнала управления в блок, имитирующий работу векторной системы управления, а затем в блок имитирующий работу ключей инвертора, на выходе которого формируется сигнал приводящий к остановке асинхронного двигателя при формировании аварийной ситуации (обрыв). Чтобы выполнить корректировку момента при возникновении клина, необходимо чтобы его значение M_{klin} оказалось в диапазоне $\{127; 128; 139; 140\}$, при этом происходит формирование сигнала коррекции ($-w_{korr}$) в диапазоне $\{0; -150.7\}$, который приводит к появлению суммарного компенсирующего воздействия с положительным значением, что позволяет показатели скорости асинхронного двигателя свести к нулевому значению.

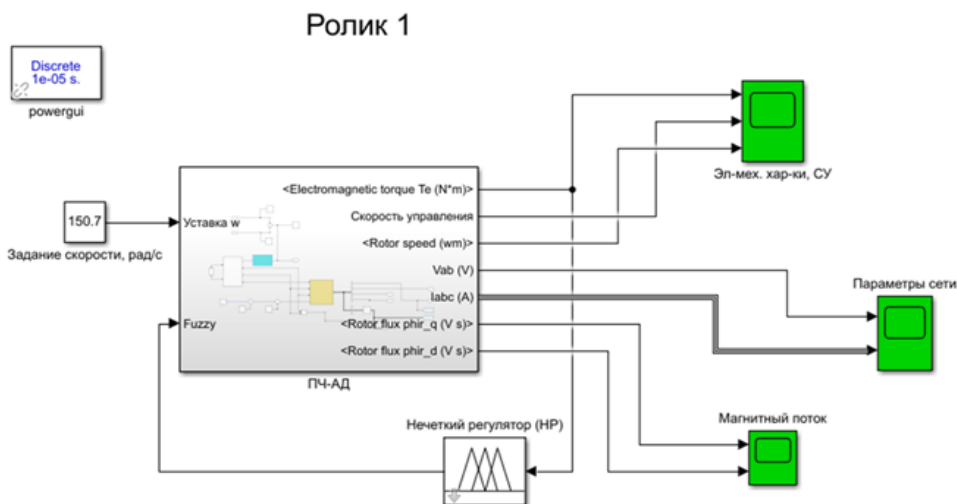


Рис. 8. Модель системы управления роликом № 1 с нечетким регулятором *Fig. 8. Roller Control System Model № 1 with Fuzzy Controller*

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

В представленной модели разработанный нечеткий регулятор предназначен для осуществления контроля за критическими изменениями момента. Разработанные для функционирования нечеткого регулятора правила, отражающие зависимость скорости от момента приведены на рисунке 9. Представленный набор из правил для нечеткого регулятора дает возможность приводить к снижению скорости до показателей близких к нулевому значению, при выходе параметров момента за допустимые для работы двигателя пределы. При разработке нечеткого регулятора использовался метод Сугено, который дает возможность получать данные на выходе регулятора в линейной форме, что позволяет также в линейном виде изменять данные на выходе блока имитирующего векторную систему управления. График, отражающий переходную функцию для нечеткого регулятора, позволяет отследить реакцию системы управления на управляющее воздействие. Сигнал коррекции, формирующийся на выходе нечеткого регулятора, при введении в векторную систему управления является для системы отрицательной обратной связью.

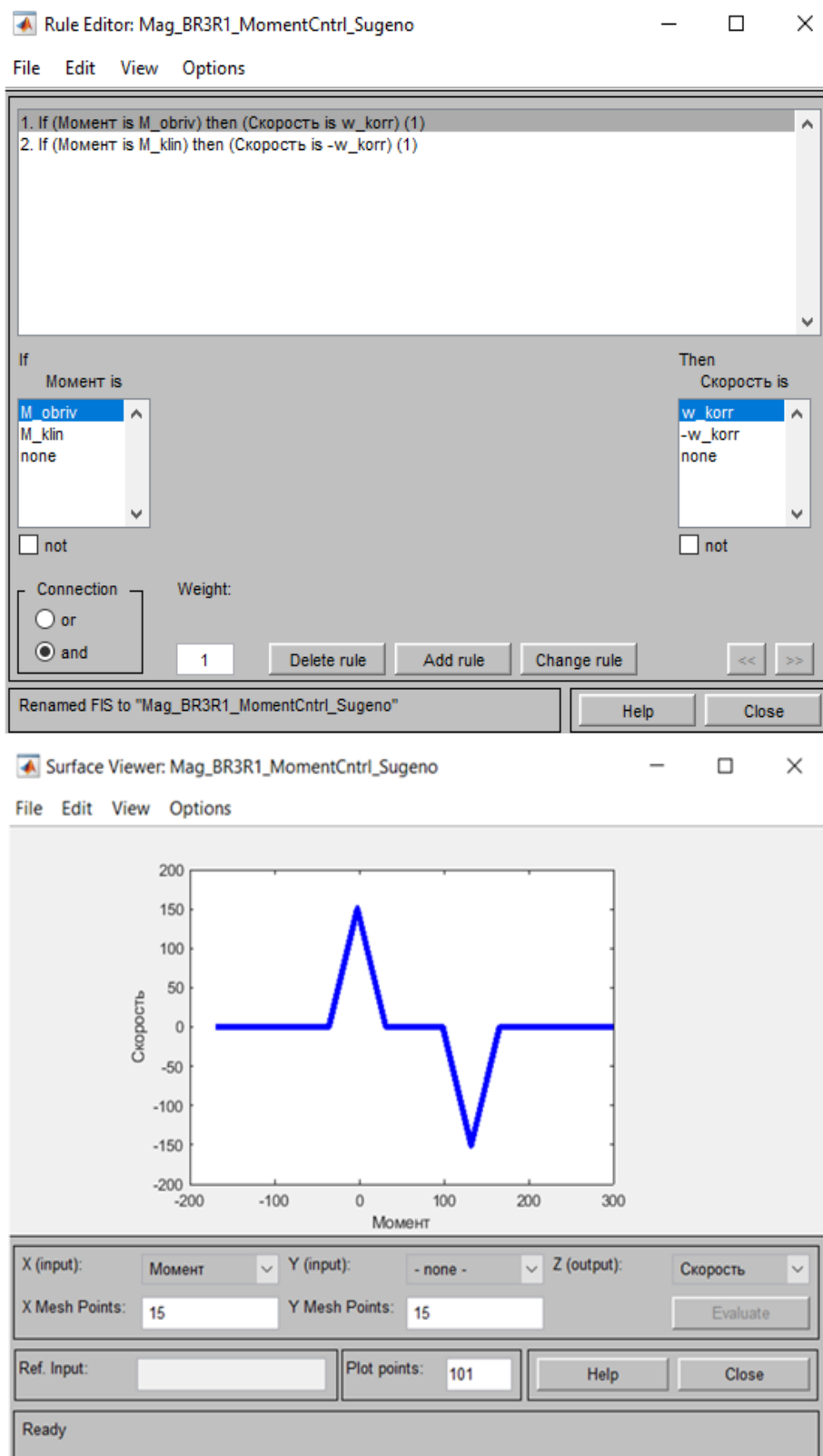


Рис. 9. База правил и переходная функция Fig. 9. Rule base and transition function of fuzzy нечеткого регулятора controller

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

На рисунке 10 представлена полученная в результате моделирования характеристика асинхронного двигателя при использовании в системе управления нечеткого регулятора для выдачи корректирующего воздействия в случае возникновения аварийных ситуаций, таких как превышения момента и недопустимое снижение момента.

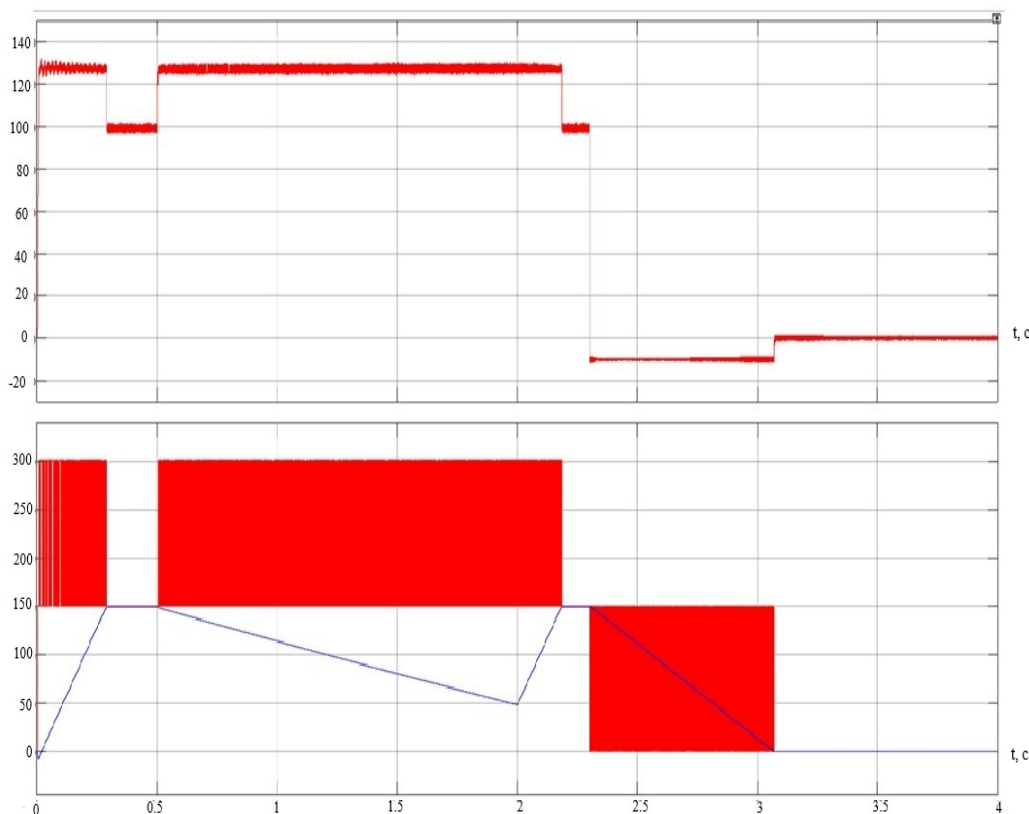


Рис. 10. Переходные процессы в асинхронном двигателе в системе с нечетким регулятором
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Проведя анализ полученных в результате моделирования характеристик, было выявлено, что имеющаяся на объекте векторная система управления обеспечивает качественную работу натяжной станцией. Положительной составляющей по организации процесса работы натяжной станции также является то, что на каждом из роликов установлен отдельный электродвигатель, управляемый индивидуальным частотным преобразователем. Однако, при возникновении аварийной ситуации такой как критическое превышение или снижение момента, средствами только частотного преобразователя не возможно организовать безопасность оборудования и анализ данных в виде обратной связи по изменению момента от электродвигателя, следовательно введение в систему управления нечеткого регулятора, а в устройство объекта программируемого логического контроллера является оптимальным решением возникающих при эксплуатации натяжной станции проблем.

В. Система с блоком нечеткой логики для осуществления контроля показателей скорости «ведомых» роликов относительно показателя скорости «ведущего» ролика

На следующем этапе была разработана модель многоприводной системы управление которой осуществляется с помощью блока, функционирующего на базе нечеткой логики (рис. 11). В данной системе функции «ведущего» ролика возложены на ролик № 1, следовательно, задание скоростей «ведомых» роликов № 2, № 3 и № 4 будет происходить относительно скорости ролика № 1.

Разработанная система нечеткого регулирования для натяжной станции представлена на рисунке 12. Входным сигналом каждого из нечетких регуляторов является текущая линейная скорость соответствующего ролика из которой вычтено текущее значение скорости ролика №1. В нечетких регуляторах на основании составленных правил (рис. 13) происходит анализ полученных данных за счет чего происходит формирование выходных сигналов в виде значений необходимой коррекции скорости на каждый из «ведомых» роликов.

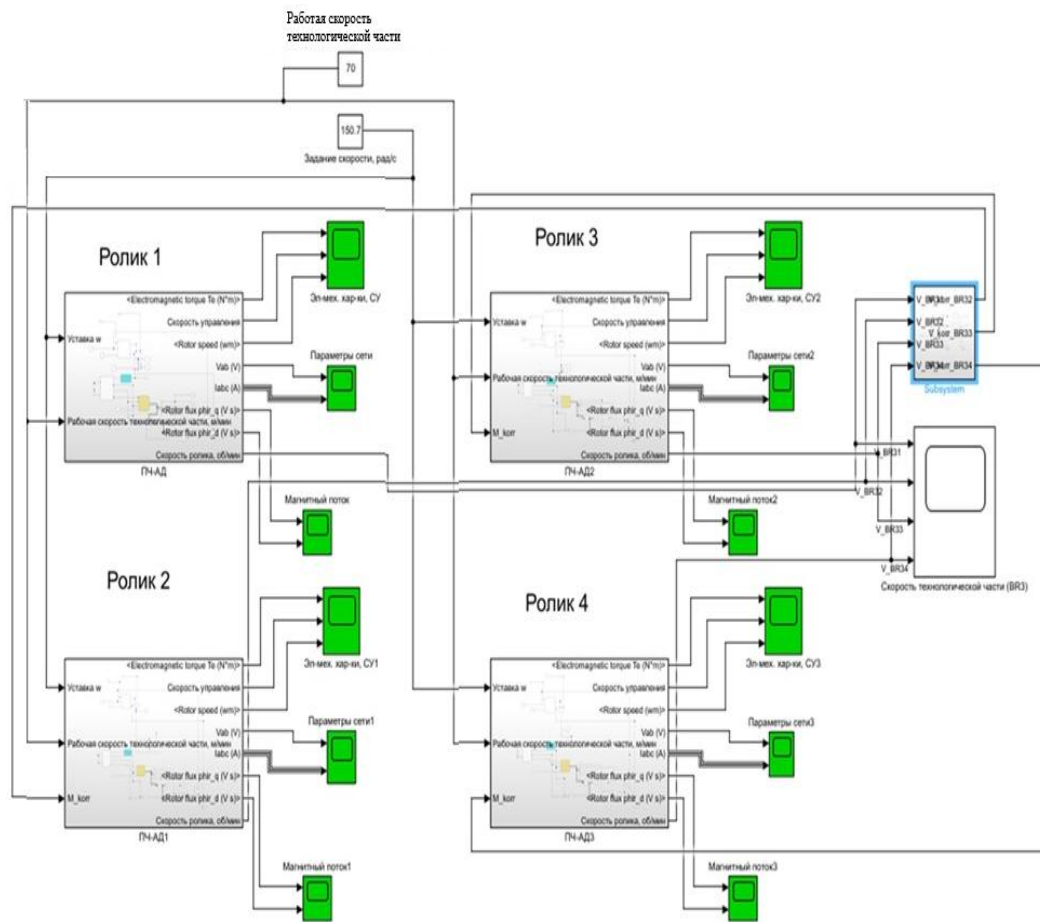


Рис. 11. Многоприводная система, управляемая нечетким регулятором

Fig. 11. Multi-drive system controlled by fuzzy controller

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

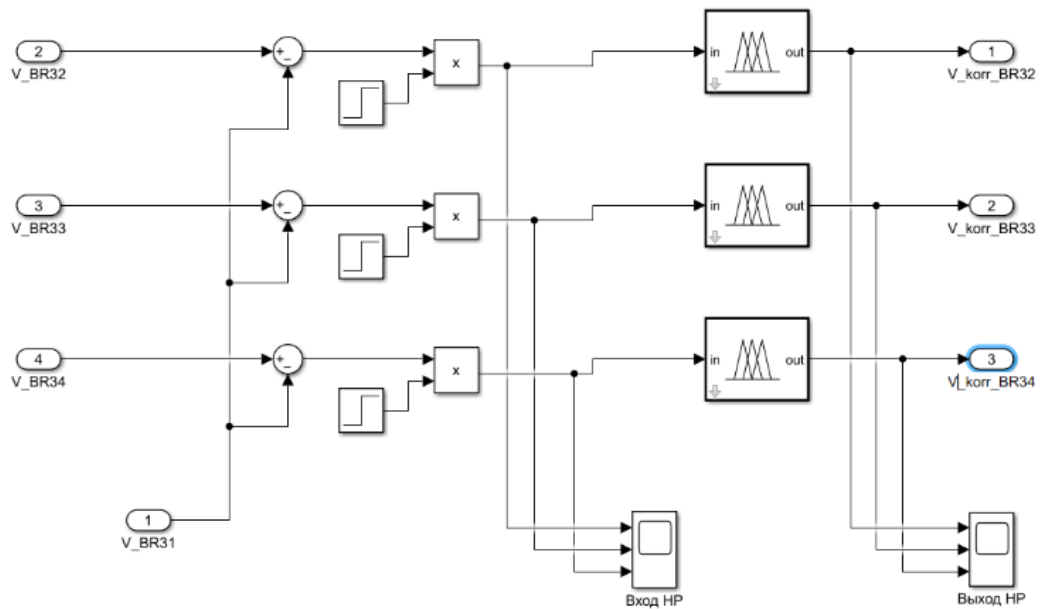


Рис. 12. Реализация системы нечеткого регулирования

Fig. 12. Implementation of a fuzzy control system

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

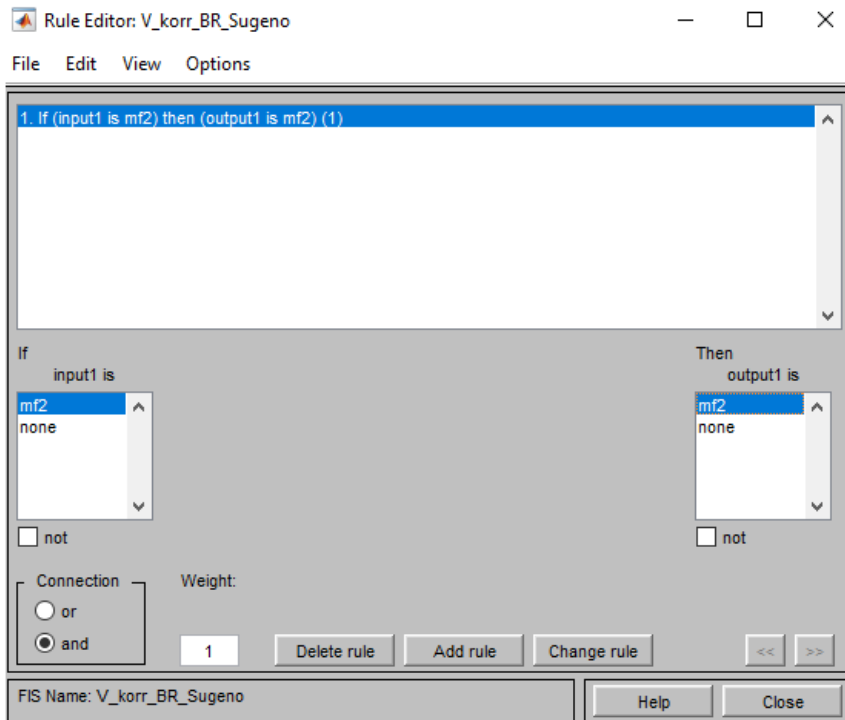


Рис. 13. Правила

Fig. 13. Rules

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

На рисунках 14 и 15 приведены графики, отражающие рабочие скорости роликов № 1, № 2, № 3, № 4 при моделировании случая, когда происходит повышение скорости «ведущего» ролик в двух системах: исходной и предлагаемой.

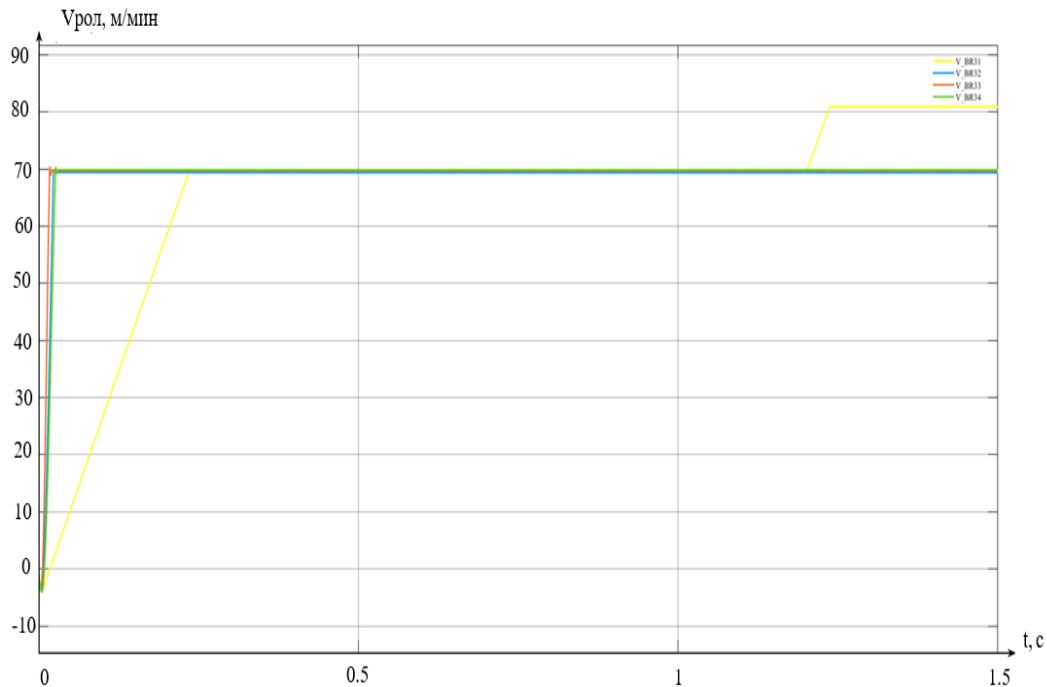


Рис. 14. Рабочие скорость 1-4 натяжных роликов (векторная система)

Fig. 14. Working speed 1-4 tension rollers (vector system)

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

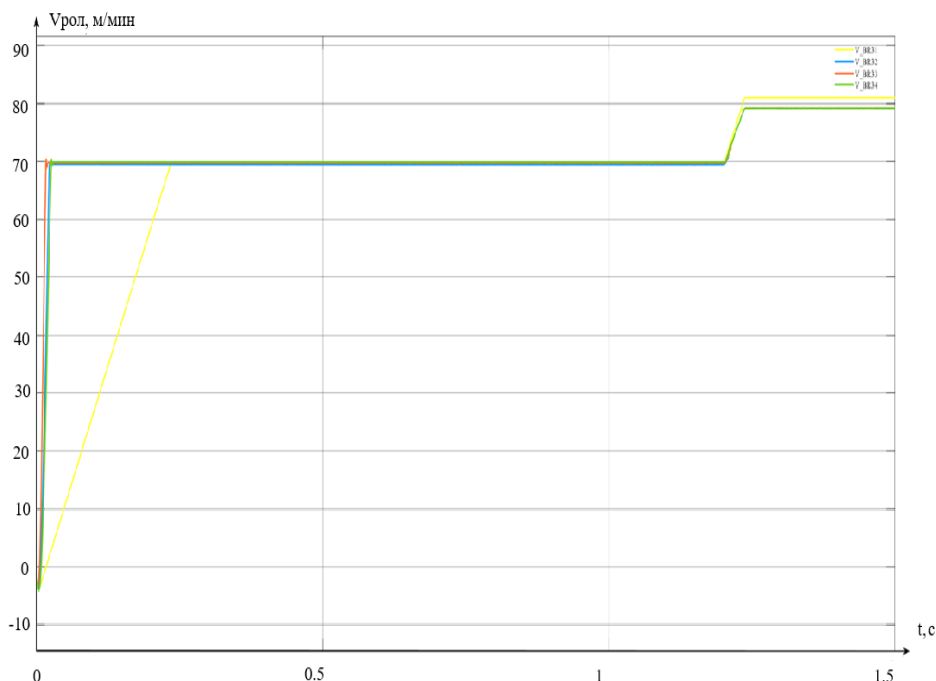


Рис. 15. Рабочие скорость 1-4 натяжных роликов (система с регулятором) *Fig. 15. Working speed 1-4 tension rollers (system with regulator)*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Анализ графиков приводит к выводу, что увеличение показателей скорости «ведущего» ролика в действующей системе управления не находит отклика у «ведомых» роликов, в следствии чего наблюдается механическое рассогласование скоростей «ведомых» роликов натяжной станции. При введении в системы управления «ведомыми» роликами нечетких регуляторов наблюдается реакция их систем на изменения скорости «ведущего» ролика, контроль данного процесса реализуется на уровне промышленного контроллера.

Практическая реализация

Практическая реализация предложенного решения возможна в программной среде TIA Portal. Архитектура системы с блоком, осуществляющим регулирование аналогично блоку, работающему на базе нечеткой логики представлена на рисунке 16. Она включает программируемый логический контроллер фирмы Siemens модель S7-1517 имеющий серийный номер 6ES7 517-3AP00-0AB0, который используется для подачи сигналов управления на частотный преобразователь, при разработке проекта был выбран преобразователь фирмы Siemens Micromaster 440 имеющий серийный номер 6SE640X-1PB00-0AA0. Также, в состав проекта программы, для обеспечения взаимосвязи между оператором и устройством входит панель TP900 Comfort имеющая серийный номер 6AV2 124-0JC01-0AX0.

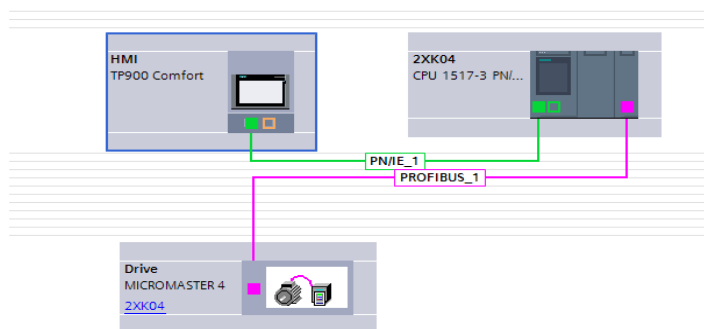


Рис. 16. Проект программы (архитектура) *Fig. 16. Program design (architecture)*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

На рисунке 17 представлен блок коррекции задания частоты на электродвигатель.

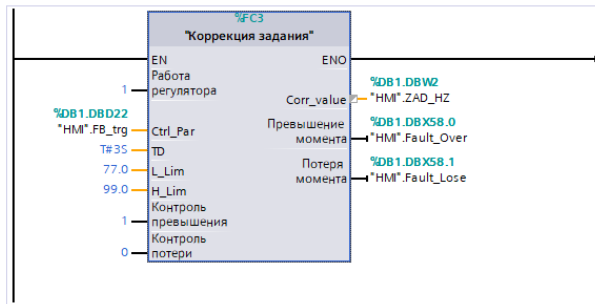


Рис. 17. Реализация блока коррекции сигнала задания Fig. 17. Implementation of the task signal correction block

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

Так как управление двигателем от частотного преобразователя является типовым, то оно не рассматривается. Рассмотрим принцип работы блока коррекции сигнала задания. Процесс происходит следующим образом, при нахождении момента двигателя в указанном в настройках диапазоне в работу включается блок коррекции задания частоты. При настройке блока необходимо определить его входные и выходные параметры. Входным контролируемым параметром служащим индикатором на разрешение работы нечеткого регулятора является момент двигателя, в зависимости от его значений происходит настройка времени задержки на включение регулятора, нижний предел срабатывания и верхний предел срабатывания. Также предусмотрен выбор режима, в котором будет осуществляться контроль момента: превышение или недопустимое снижение. В качестве выходных сигналов выступают корректирующий сигнал и сигнал о появившемся режиме: превышение или недопустимое снижение момента.

На рисунке 18 приведен алгоритм работы рассматриваемого регулирования.

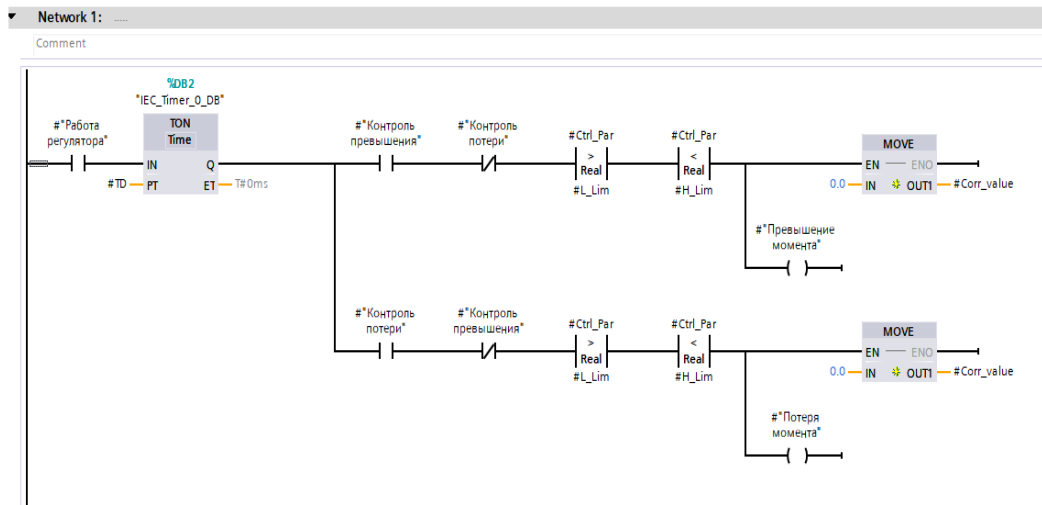


Рис. 18. Структура блока коррекции Fig. 18. Structure of the correction block

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

Последовательность работы программы: проверка наличия разрешения на ввод блока в работу, включение таймера для формирования задержки на ввод блока в работу (привод за указанное время должен выйти на рабочую характеристику), проверка выбора режима (исключает одновременное включение двух режимов). При выходе значения момента за установленные параметры, принудительно выдается нулевой сигнал на задание частоты, что приводит к остановке двигателя. Преимуществом приведенного алгоритма является то, что он не зависит от модели применяемого программируемого логического контроллера, частотного преобразователя, его реализация возможна в любой доступной системе.

Выводы (Conclusions)

Полученные при моделировании результаты позволяют сделать вывод о том, что применение блоков коррекции на базе нечеткой логики в системе управления многоприводным агрегатом, по сравнению с традиционной системой управления, позволяет создать универсальную систему управления, которая становится не зависимой

от параметров и типа преобразователя частоты, она может быть заведена на любой программируемой контроллер, имеющийся в структуре многоприводного агрегата. Становится возможным использование на объекте преобразователей, в которых рассматриваемые проблемы не предусмотрены для решения на заводе-изготовителе.

Литература

1. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
2. Ning Z.M., Demkin V., Lin Y.H., Soe Win K. Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system // In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. pp. 2591-2594.
3. Дмитриева В.В., Дзюин Д.В. Математическая и компьютерная модель многомассовой системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 3-12. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-2-3-12>
4. Klerikov V.B., Bieliaev O.S. Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022. 22186939.
5. Фирсов К.С. The assessment of the cost-effectiveness of using controllers with reduced bit depth for electric drive management // Молодой ученый. 2023. № 51 (498). С. 44-46.
6. Архангельский О. Д., Сютков Д. В., Кузнецов А. В. Практические подходы к созданию инфраструктуры промышленного киберполигона // Автоматизация в промышленности. 2020. № 11. С. 52-57.
7. Литвиненко А.М., Баранов Д.С. Адаптивная система управления электроприводом моталки // Российская электротехника. 2020. Т. 91. № 10. С. 620-625.
8. Литвиненко А.М., Баранов Д.С. Адаптивная система управления электроприводом моталки // Электротехника. 2020. № 10. С. 31-36.
9. Храмшин В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // Вестник МГЭУ. 2012. № 6. С. 100-104.
10. Белоусов А.С., Мещеряков В.Н., Баранов Д.С. Моделирование системы управления электроприводом подъёмной машины для последующей настройки // Электрические системы и комплексы. 2022. № 1 (54). С. 11–18.
11. Yuxiang NIU, Hui LI, Feiyang LIU. A Loss-aware Continuous Hopfield Neural Network (CDN)-based Mapping Algorithm in Optical Network-on-Chip (Noc) // 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICON). 2022. 22115387.
12. Синюков А.В., Синюкова Т.В., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Мещеряков В.Н., Valtchev S. Нечеткие технологии в системах управления подъемно-транспортными механизмами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. 25(1). С. 105-117. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117>.

Авторы публикации

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод и робототехника» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>. stw0411@mail.ru

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия.

Синюков Алексей Владимирович – канд. техн. наук, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия, технический писатель ООО «Грин-АПИ», г. Химки, Россия. zeitsn@yandex.ru

References

1. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O.. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives

(SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.

2. Ning Z.M., Demkin V., Lin Y.H., Soe Win K. Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system // In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. pp. 2591-2594.

3. Dmitrieva V.V., Dzyuin D.V. Mathematical and computer model of a multi-mass system of a multi-motor electric drive of a belt conveyor // Mining equipment and electromechanics. 2024. No. 2 (172). Pp. 3-12. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-2-3-12>.

4. Klepikov V.B., Bieliaiev O.S. Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022. 22186939.

5. Firsov K.S. The assessment of the cost-effectiveness of using controllers with reduced bit depth for electric drive management // The young scientist. 2023. vol. 51 (498). pp. 44–46.

6. Arkhangelsky O. D., Syutov D. V., Kuznetsov A. V. Ractical approaches to establishing infrastructure for an industrial cyber polygon // Automation in Industry. 2020. vol. 11. pp. 52-57.

7. Litvinenko A.M., Baranov D.S. An adaptive control system for a winding-machine electric drive // Russian Electrical Engineering. 2020. vol. 91. n. 10. pp. 620-625.

8. Litvinenko A.M., Baranov D.S. Adaptive Control System for the Electric Drive of a Winding Machine // Electrical Engineering. 2020. № 10. pp. 31-36.

9. Khramshin V.R. Development and implementation of automated electric drives and systems for regulating the technological parameters of a broadband hot rolling mill // Bulletin of ISEU. 2012. № 6. pp. 100-104,

10. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Baranov D.S. Simulation of winding machine electric drive control system for subsequent adjustment // Electrical systems and complexes. 2022. № 1 (54), pp. 11–18.

11. Yuxiang NIU, Hui LI, Feiyang LIU. A Loss-aware Continuous Hopfield Neural Network (CDN)-based Mapping Algorithm in Optical Network-on-Chip (Noc) // 2022 20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICON). 2022. 22115387.

12. Sinyukov A.V., Sinyukova T.V., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Meshcheryakov V.N., Valtchev S. Fuzzy technologies in control systems of lifting and transport mechanisms // Power engineering: research, equipment, technology. 2023. 25(1). pp. 105-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117>.

Authors of the publication

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>. stw0411@mail.ru

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, ООО «Grin-API», Khimki, Russia. zeitsn@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **22.08.2025 г.**

Отредактировано **24.09.2025 г.**

Принято **02.10.2025 г.**



ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ершов М.С., Журавлев С.М.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

ershov.ms@gubkin.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в решении важной проблемы повышения устойчивости и надежности работы промышленных электротехнических систем. ЦЕЛЮЮ работы является сокращение числа вынужденных отключений электрооборудования при провалах напряжения, обусловленных короткими замыканиями, неизбежными при эксплуатации электрических сетей. Рассмотрены вопросы выбора параметров защит минимального напряжения в промышленных электротехнических системах. В результате анализа эксплуатационных данных и имитационного моделирования провалов напряжения установлено, что при использовании защит минимального напряжения (ЗМН) с независимыми характеристиками свыше 50% срабатываний защиты с отключением нагрузки происходит необоснованно. Основанием для отключения нагрузки является нарушение устойчивости электротехнической системы (ЭТС). МЕТОДЫ. Применение ЗМН с зависимой характеристикой времени срабатывания от величины остаточного напряжения, приближенной к границе устойчивости, снижает долю необоснованных срабатываний ЗМН, но не исключает их полностью. Для максимального снижения числа необоснованных срабатываний защиты необходима адаптация параметров характеристики ЗМН к зависящей от нагрузки и режима источника питания границе устойчивости. Для мониторинга параметров границы устойчивости ЭТС в процессе эксплуатации предложено применение алгоритмов искусственных нейронных сетей. РЕЗУЛЬТАТЫ. Апробированный алгоритм Левенберга-Марквардта (LM) показал приемлемую точность мониторинга устойчивости по измеряемым в ходе эксплуатации электрическим параметрам ЭТС. Показано, что применение зависимой характеристики ЗМН, параметры которой адаптируются к нагрузке и режиму источника питания с помощью алгоритмов нейронных сетей, позволяет примерно в два раза снизить число необоснованных отключений нагрузки и повысить устойчивость работы ЭТС непрерывных производств.

Ключевые слова: электротехническая система (ЭТС); провал напряжения; устойчивость; мониторинг; защита минимального напряжения; нейронная сеть; компьютерное моделирование.

Для цитирования: Ершов М.С., Журавлев С.М. Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга параметров устойчивости промышленной электротехнической системы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 41-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-41-52.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR MONITORING STABILITY PARAMETERS OF ELECTRICAL ENGINEERING SYSTEMS

Ershov M.S., Zhuravlev S.M.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia

ershov.ms@gubkin.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in solving the important problem of increasing the stability and reliability of electrical engineering systems (EES). The AIM of the work is to reduce the number of forced shutdowns of electrical equipment during voltage drops caused by short circuits inevitable during operation of electrical networks. The issues of selecting the parameters

of minimum voltage protection in electrical engineering systems are considered. As a result of the analysis of operational data and simulation modeling of voltage drops, it was found that when using minimum voltage protection (MVP) with independent characteristics, more than 50% of protection trips with load disconnection occur unreasonably. The basis for disconnecting the load is a violation of the stability of the electrical engineering system. **METHODS.** The use of MVP with a dependent response time characteristic on the residual voltage value close to the stability limit reduces the share of unreasonable MVP trips, but does not eliminate them completely. To minimize the number of unreasonable protection trips, it is necessary to adapt the parameters of the MVP characteristic to the stability limit dependent on the load and power source mode. To monitor the stability boundary parameters of the electrical engineering system during operation, it is proposed to use artificial neural network algorithms. **RESULTS.** The tested Levenberg-Marquardt (LM) algorithm showed sufficient accuracy of stability monitoring based on the parameters of the electrical engineering system measured during operation. It is shown that the use of the dependent characteristic of the MVP, the parameters of which are adapted to the load and power source mode using neural network algorithms, allows for approximately a twofold reduction in the number of unjustified load shutdowns and an increase in the stability of the electrical engineering system of continuous production.

Keywords: electrical engineering system (EES); voltage drop; stability; monitoring; minimum voltage protection; neural network; computer simulation.

For citation: Ershov M.S., Zhuravlev S.M. Application of artificial neural networks for monitoring stability parameters of electrical engineering systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 41-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-41-52.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Наиболее частыми причинами массовых отключений электроприемников промышленных электротехнических систем (ЭТС) являются возмущения, обусловленные короткими замыканиями (КЗ) в электрических сетях и проявляющиеся в виде провалов напряжения различной глубины и длительности [1, 2]. На долю вынужденных остановов электродвигателей по причине провалов напряжения приходится свыше 65% от общего числа остановов, причем часто одновременно отключается группа электроприемников, что может повлечь нарушение технологического процесса. Особенно актуальна такая проблема для производств нефтедобывающих и нефтегазоперерабатывающих предприятий, вынужденные остановки которых сопровождаются не только большими экономическими потерями, но и тяжелыми экологическими последствиями, сопровождаемыми выбросами вредных веществ в окружающую среду [1, 3].

Провалы напряжения характеризуются глубиной Δu , отн. ед. и длительностью τ , с. Исходя из случайного характера провалов напряжения (см. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электроэнергии, п. 4.3) их параметры могут рассматриваться как случайные величины, подчиняющиеся смещенному экспоненциальному закону распределения:

$$f(\Delta u) = \frac{1}{\Delta \bar{u}} \exp\left(-\frac{\Delta u - du_{th}}{\Delta \bar{u}}\right); \quad (1)$$

$$f(\tau) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{\tau - \tau_{th}}{\tau}\right), \quad (2)$$

где $\Delta \bar{u}$ и τ – среднее значение глубины и длительности провалов напряжения; $du_{th} = 0,1$ отн. ед. и $d\tau_{th} = 0,05$ с – пороговые значения, с которых начинается фиксация провала напряжения и измерение его параметров. С глубиной провала напряжения однозначно связано остаточное напряжение $u = 1 - \Delta u$. Оценка параметров провалов напряжения осуществляется в соответствии с ГОСТ ИЕС 61000-4-30 – 2017 Методы измерений качества электрической энергии.

При критических провалах напряжения может происходить нарушение устойчивости электротехнической системы, не способной вернуться в исходное состояние после выбега двигателей при снижении напряжения: мощности источника недостаточно, чтобы одновременно разогнать все выбегающие двигатели. В качестве показателей устойчивости ЭТС при симметричных провалах напряжения могут использоваться такие показатели как напряжение статической устойчивости U_{st} , отн. ед. и время динамической устойчивости

при полном (до нуля) провале напряжения t_0 , с. В работах [1, 4-6] приведены программные средства, процедуры и примеры расчета параметров устойчивости промышленных ЭТС. Расчет параметров устойчивости позволяет определить границу динамической устойчивости ЭТС – зависимость допустимого времени провала напряжения от величины остаточного напряжения u :

$$t_{dn} = t_0 \frac{(1-u)}{\left(1 - \frac{u}{u_{st}}\right)}. \quad (3)$$

Граница устойчивости разделяет область возможных возмущений на две зоны: устойчивого состояния $(u, \tau) \in Y$; неустойчивого состояния $(u, \tau) \in N$. Координаты провала напряжения относятся к зоне неустойчивых состояний N , если выполняется условие $\tau > t_{dn}, \forall u = (0, u_{st})$. Эта зона находится выше границы устойчивости $t_{dn}(u)$.

Если же выполняется условие $\tau \leq t_{dn}, \forall u(0,1)$, то провал напряжения относится к зоне устойчивых состояний Y , которая находится ниже границы устойчивости. Таким образом, граница устойчивости разделяет область возможных возмущений на зоны критических и некритических возмущений. Граница устойчивости может быть использована для адаптации параметров релейной защиты, являющейся одним из перспективных направлений повышения надежности и устойчивости работы ЭТС [7-10].

Расчитанные в результате компьютерного моделирования параметры устойчивости могут быть использованы для рационального выбора уставок защиты минимального напряжения (ЗМН), отключающего электроприемники ЭТС при критических провалах напряжения с последующим автоматизированным и ручным восстановлением работы электроприводов ЭТС. Для ЗМН с независимой характеристикой и фиксированными параметрами уставки u_{set} , отн. ед. и выдержки времени t_{set} , с рациональное условие выбора параметров защиты имеет вид:

$$u_{set} = u_{st}; t_{set} = t_0. \quad (4)$$

Выполнение условия (4), казалось бы, обеспечивает отключение нагрузки ЭТС только в критических ситуациях, однако это не совсем так [11]. Во-первых, расчет показателей устойчивости ЭТС обычно ведется исходя из максимального состава нагрузки (все электроприводы включены) и минимального режима источника питания (значение сопротивления системы – максимально). В реальности в процессе эксплуатации имеют место периодические включение и отключение части двигательной и статической нагрузки, а также изменение параметров источника питания [12]. Во-вторых, между кривой границы устойчивости и независимой характеристикой защиты минимального напряжения существует зона необоснованных отключений, при попадании параметров возмущений в которую устойчивость системы сохраняется, но защита срабатывает (все возмущения внутри характеристики ЗМН приводят к ее срабатыванию). Для ЗМН с независимой характеристикой выполнение условия (4) уменьшает зону необоснованных отключений двигателей, но не исключает ее полностью. Задача данной работы заключается в минимизации числа необоснованных отключений электрооборудования при возмущениях в электротехнических системах, проявляющихся в виде провалов напряжения, за счет адаптации параметров ЗМН к реальным режимам источника и нагрузки ЭТС.

В качестве математического аппарата для решения задачи мониторинга устойчивости ЭТС наиболее подходят алгоритмы искусственных нейронных сетей, получающие все большее распространение для решения задач контроля режимов и адаптации релейных защит электроэнергетических и промышленных электротехнических систем [13, 14], включая мониторинг устойчивости [15-17].

Материалы и методы (Materials and methods)

Моделирование устойчивости и выбор ЗМН и ее параметров

Моделирование устойчивости осуществлялось на примере системы электроснабжения газоперерабатывающего завода [11]. В штатном режиме секционные выключатели системы на всех распределительных устройствах (РУ) разомкнуты, поэтому переходные процессы при провалах напряжения в подсистемах могут рассматриваться отдельно. Расчетная подсистема содержит десять высоковольтных асинхронных двигателей, включая четыре двигателя мощностью 315 кВт; один двигатель мощностью 3150 кВт и пять двигателей мощностью 4000 кВт, распределенных по трем

распределительным пунктам РП-10 кВ, подключенным к РУ-10 кВ ГПП кабельными линиями длиной до 1 км. Низковольтная нагрузка состоит из восьми эквивалентных асинхронных двигателей мощностью 1250 кВт и статической (нагреватели, освещение) низковольтной нагрузки общей мощностью 1500 кВт, подключенных через восемь трансформаторов мощностью 1600 кВА. Вся нагрузка питается через трансформатор ТРДН-40-110-10 с расщепленной обмоткой мощностью 40 МВА, напряжением 115/10,5 кВ. Эквивалентные параметры источника питания составили: ЭДС $E_c = 10800$ В; сопротивление в максимальном и минимальном режимах питающей системы: 1) $Z_c = j0,25$ Ом и 2) $Z_c = j0,35$ Ом, соответственно.

Согласно итерационным процедурам расчета устойчивости, представленным в работах [1, 4], напряжение статической устойчивости ЭТС u_{st} определялось последовательным снижением ЭДС системы с шагом 100 В до возникновения лавины напряжения – самопроизвольного снижения напряжения в узлах системы. Таким образом, точность определения напряжения статической устойчивости составляет $\pm 0,01$ отн. ед. Процедура расчета времени динамической устойчивости t_0 определяется последовательным увеличением длительности полных провалов напряжения до тех пор, пока система не будет возвращаться в исходное состояние. Точность определения времени динамической устойчивости принята равной $\pm 0,01$ с. В качестве контролируемых параметров при расчетах параметров устойчивости выбиралось напряжение на шинах РУ-10 ГПП, токи и скорости двигателей. Для примера на рисунках 1 и 2 представлены графики напряжения на шинах, а также ток и скорость одного из асинхронных двигателей мощностью 4 МВт.

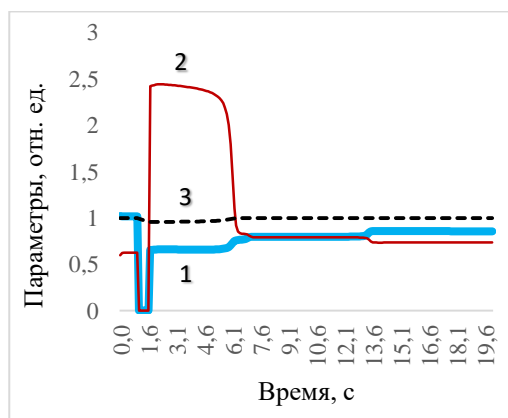


Рис. 1. Графики: 1 – напряжение; 2 – ток; 3 – скорость двигателя при длительности провала напряжения $\tau = 0,4$ с

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

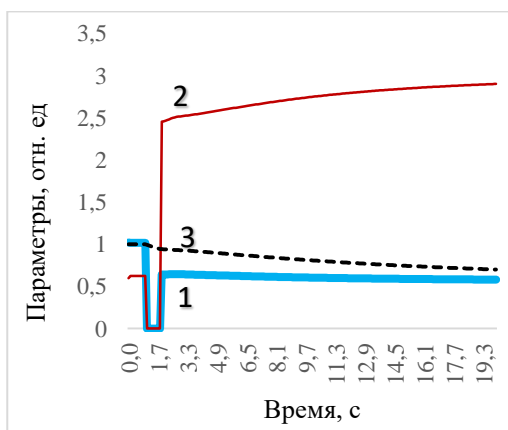


Рис. 2. Графики: 1 – напряжение; 2 – ток; 3 – скорость двигателя при длительности провала напряжения $\tau = 0,8$ с

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

Для моделирования выбрано шесть режимов нагрузки ЭТС. В первом режиме нагрузка максимальная, включены все двигатели ЭТС, в последующих режимах нагрузка

уменьшалась за счет последовательного отключения части электродвигателей. В ходе моделирования контролировались значения: напряжения U , тока I , активной P и реактивной Q мощности на вводе РУ-10 кВ. В исходном номинальном режиме при включении всех электродвигателей ЭТС и значении реактивного сопротивления системы равном $j0,25$ Ом значения параметров устойчивости, определяющих ее границу, составили: $u_{cy} = 0,754$ отн.ед.; $t_0 = 0,52$ с. В минимальном по мощности режиме сопротивление источника питания равно $j0,38$ Ом, при этом значения параметров устойчивости в режиме полной нагрузки составляют: $u_{cy} = 0,786$ отн.ед.; $t_0 = 0,40$ с.

По результатам расчетов, представленным в таблице, можно видеть, что при уменьшении тока нагрузки изменяются контролируемые параметры ЭТС, а также параметры устойчивости: напряжение статической устойчивости u_{cy} уменьшается, а время динамической устойчивости t_0 увеличивается.

Для примера на рисунках 3 и 4 приведены зависимости показателей устойчивости от тока на вводе РУ-10 кВ системы. Зависимости построены для двух вариантов значения сопротивления питающей сети: 1 – $j0,25$ Ом и 2 – $j0,38$ Ом. По мере уменьшения мощности источника показатели устойчивости ЭТС ухудшаются: увеличивается напряжение статической устойчивости и уменьшается время динамической устойчивости.

Таблица
Table

Результаты компьютерного моделирования устойчивости ЭТС
Results of computer simulation of the stability of the EES

Параметры	Режимы работы					
	1	2	3	4	5	6
Сопротивление источника питания $Z_c = j0,25$ Ом						
I , А	1419	1278	1018	598	544	367
U , В	10198	10265	10371	10556	10570	10637
P , кВт	22955	20835	16649	9990	9012	6114
Q , квар	12038	10735	8678	5035	4763	3429
u_{cy} , отн. ед.	0,7543	0,7382	0,7241	0,6813	0,6791	0,6702
t_0 , с	0,521	0,592	0,731	1,381	1,412	1,761
Сопротивление источника питания $Z_c = j0,38$ Ом						
I , А	1440	1294	1027	601	546	371
U , В	10026	10115	10254	10492	10510	10595
P , кВт	22941	20822	16640	9978	9002	6105
Q , квар	11997	10691	8642	5014	4741	3414
u_{cy} , отн. ед.	0,7861	0,7662	0,7473	0,6942	0,6921	0,6791
t_0 , с	0,401	0,461	0,582	1,051	1,121	1,412

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

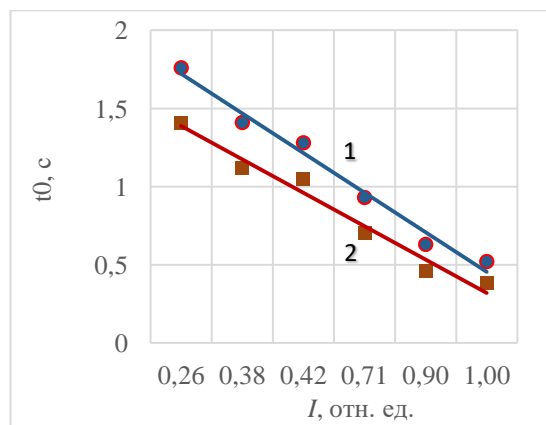


Рис. 3. Зависимость времени динамической устойчивости от тока нагрузки: $Z_c = j0,25$ Ом; $Z_c = j0,38$ Ом
Fig. 3. Dependence of dynamic stability time on load current: $Z_c = j0,25$ Ом; $Z_c = j0,38$ Ом

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

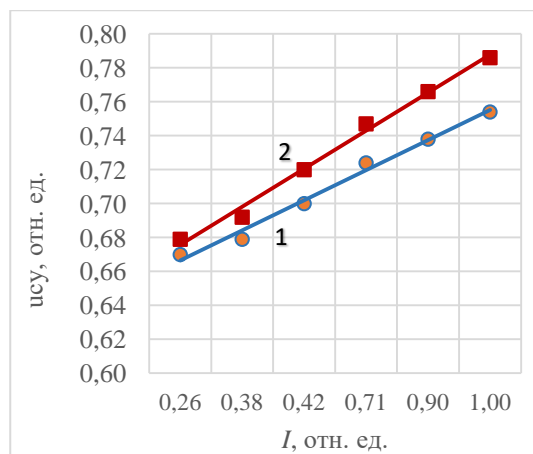


Рис. 4. Зависимость напряжения статической устойчивости от тока нагрузки: $Z_c = j0,25 \text{ Ом}$; $Z_c = j0,38 \text{ Ом}$

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

Таким образом изменение режимов нагрузки ЭТС приводит к изменению параметров устойчивости нагрузки. На рисунке 5 показаны графики границ устойчивости (выражение 3) ЭТС при различных режимах работы и сопротивлении системы $Z_c = j0,25 \text{ Ом}$, а также имитация координат провалов напряжения в течение пяти лет. Имитация провалов напряжения выполнена согласно выражениям (1) и (2) для параметров плотности вероятности $\Delta u = 0,4 \text{ отн. ед.}$; $\tau = 0,3 \text{ с.}$ В результате получили, что число критических провалов напряжения, попадающих в зону защиты ЗМН (характеристика 3) составило 148 случаев, что соответствует вероятности 0,37. Число попаданий в зону неустойчивых состояний N границы 1 равно 68, при вероятности 0,17. Число попаданий в зону необоснованных срабатываний ЗМН в режиме нагрузки 1 составляет 80, при вероятности 0,2. Если ЭТС работает в минимальном из рассмотренных режимов нагрузки, а ЗМН настроена на «худший случай» – максимальную нагрузку, то число необоснованных отключений составит 144 при вероятности 0,36.

Исходя из полученных результатов можно заключить: 1) при использовании ЗМН с независимой характеристикой даже при максимальной нагрузке число необоснованных отключений может быть достаточно большим; 2) настройка параметров защиты минимального напряжения на «худший случай» – максимальную нагрузку ЭТС и минимальный режим источника может приводить к частым необоснованным отключениям электроприводов системы.

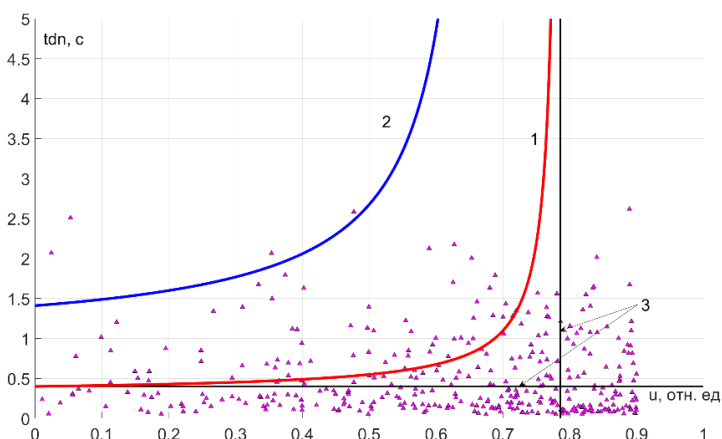


Рис. 5. Имитация провалов напряжения и границы устойчивости: 1 – режим 1; 2 – режим 6; 3 – характеристика независимой ЗМН

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

На основании первого вывода можно сделать вывод, что для снижения числа необоснованных отключений ЭТС целесообразно использовать ЗМН с зависимой

характеристикой. В качестве зависимых характеристик ЗМН может использоваться гиперболическая характеристика, которая имеет вид:

$$t_{set} = \frac{1}{1 - (u / u_{set})^2}. \quad (5)$$

Кроме перечисленных зависимых характеристик в цифровых реле возможен табличный ввод характеристик или введение произвольной формулы, например, соответствующей границе устойчивости (3).

Исходя из второго вывода следует, что для повышения эффективности ЗМН требуется адаптация настройки ее параметров в зависимости от нагрузки и параметров источника питания, которую можно осуществить с помощью искусственных нейронных сетей.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Мониторинг параметров устойчивости с помощью искусственных нейронных сетей

Состояние ЭТЭС и ее свойства, включая устойчивость – способность восстанавливать исходное состояние после возмущения, определяется набором параметров. Для рассматриваемой задачи в качестве таких параметров выбраны электрические величины, подлежащие непрерывному измерению: напряжение основного узла (шины РУ-10 кВ ГПП) U , ток I , активная P и реактивная Q мощность на входе системы. Эти показатели могут быть получены в режиме on-line наблюдения с цифровых терминалов релейных защит, установленных в распределительном устройстве.

Для моделирования использовалась нейронная сеть (НС), включающая: входы (X_i); первый слой скрытых нейронов (h_{1k}), второй слой скрытых нейронов (h_{2k}), слой выходных нейронов – выходов (Y_l). Число входных величин равно четырем – ($i = 1, \dots, 4$). Число первого скрытого слоя нейронов может изменяться от 1 и выше. Число второго скрытого слоя фиксировано и равно числу выходных величин – 2. Пример схемы нейронной сети при четырех нейронах первого скрытого слоя приведен на рисунке 6.

Система уравнений для скрытых слоев нейронов и выходных величин имеет вид:

$$\begin{aligned} h_{1k} &= f \left(\sum_{i=1}^4 w_{ki}^{(1)} X_i + b_k^{(1)} \right); \\ h_{21} &= f \left(\sum_{i=1}^4 w_{1k}^{(2)} h_{1k} + b_1^{(2)} \right); \\ h_{22} &= f \left(\sum_{i=1}^4 w_{2k}^{(2)} h_{1k} + b_2^{(2)} \right); \\ Y_1 &= g \left(w_{11}^{(3)} h_{21} + w_{12}^{(3)} h_{22} + b_1^{(3)} \right); \\ Y_2 &= g \left(w_{21}^{(3)} h_{21} + w_{22}^{(3)} h_{22} + b_2^{(3)} \right); \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $w_{ik}^{(1)}$ – веса между i -ым входом и k -м нейроном первого слоя; $w_{lk}^{(2)}$ – веса между k -м номером нейрона в первом слое и l -м номером нейрона во втором скрытом слое; $w_{jl}^{(3)}$ – веса между l -м номером нейрона во втором скрытом слое и j -м выходом; $b_i^{(n)}$ – коэффициенты смещения для скрытых слоев и выходного слоя, $n = 1 \dots 3$. $f = 1 / (1 + e^{-x})$ – функция активации для скрытых слоев; g – линейная функция активации для выходного слоя.

Обучение нейронной сети осуществляется по алгоритму Левенберга-Марквардта (LM) [16, 17], заключающегося в подборе вектора w весовых коэффициентов сочетанием градиентного спуска и метода Гаусса-Ньютона, адаптивно переключаясь между ними для эффективной минимизации функции ошибки (MSE – Mean Squared Error), вида

$$MSE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (Y_i - f(x_i, w))^2, \quad (7)$$

где Y_i – целевое значение выхода; $f(x_i, w)$ – предсказание модели для входа x_i .

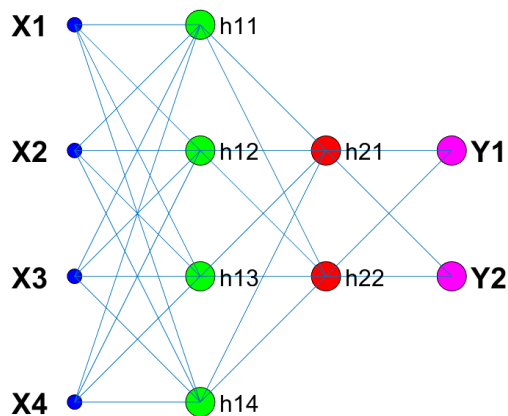


Рис. 6. Пример схемы нейронной сети

Fig. 6. Example of a neural network diagram

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

Вычисление ошибки осуществляется по нормализованным значениям выходных величин, определяемых по алгоритму минимаксной нормализации с симметричным диапазоном, что ускоряет обучение. Чтобы минимизировать ошибки округления, веса w вычисляются с точностью до 20 знаков.

Используемые для настройки нейронной сети данные, соответствующие режимам ЭТС при максимальном и минимальном режимах источника питания, разделены на данные для тренировки, валидации и тестирования в соотношении 70/15/15%. В ходе обучения (training) подбираются весовые коэффициенты. В ходе проверки (validation) подбираются параметры управления, включая шаг изменения коэффициентов и число полных прогонов – эпох (Epochs). В ходе тестирования (testing) оцениваются ошибки на базе независимых данных, не участвующих в обучении. Как показано на рисунке 7, обучение останавливается на 13 эпохе, при этом ошибка проверки минимальна, ошибки обучения, проверки и тестирования близки к нулю при приемлемом соотношении ошибок между тестированием и обучением и умеренном разрыве между ошибками обучения и проверки, свидетельствующем о приемлемом уровне обучения НС. Распределение ошибок, вычисленных по выражению (7), приведено на рисунке 8.

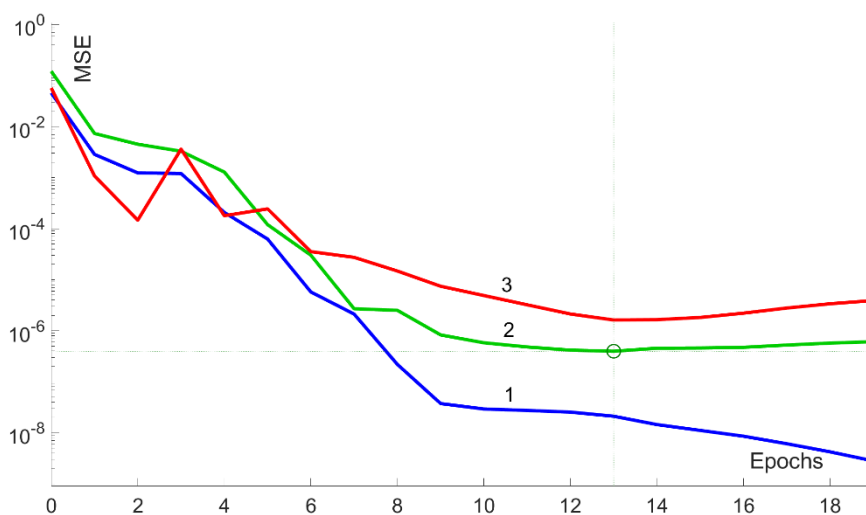


Рис. 7. Результат обучения НС: 1 – тренировка; 2 – валидация; 3 – тестирование

Fig. 7. Result of NN training: 1 – training; 2 – validation; 3 – testing

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

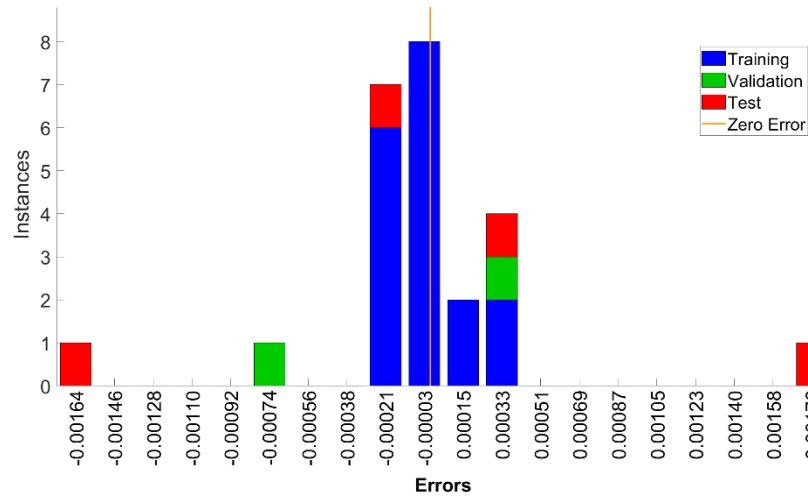


Рис. 8. Гистограмма ошибок

Fig. 8. Error histogram

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

Результаты обучения сохранены в виде скрипта, который далее использовался для проверки работы НС на новых исходных данных. Запуск натренированной сети позволил исследовать точность адаптации параметров защиты минимального напряжения к режимам ЭТС и источника питания. Характерные значения ошибок в определении параметров ЗМН по условию (4) отражены на рисунке 9.

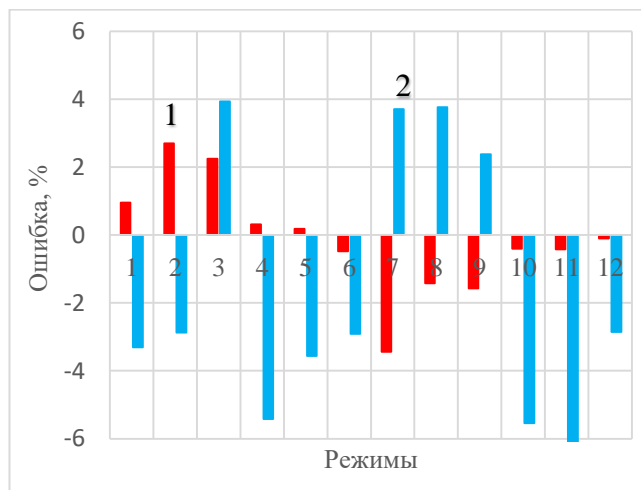


Рис. 9. Ошибки адаптации параметров ЗМН: 1 – ошибка уставки напряжения; 2 – выдержка времени

Fig. 9. Errors in adaptation of the parameters of the MVP: 1 – voltage setting error; 2 – time delay

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

Значение ошибок в определении уставки напряжения ЗМН по алгоритму LM находится в пределах 4%; значения ошибок выдержки времени может достигать 6%, что в целом приемлемо, но требует дополнительных исследований других методов обучения нейронных сетей. На данном этапе, чтобы избежать несрабатывания защиты в условиях потери устойчивости, можно рекомендовать введение десятипроцентных поправочных коэффициентов при определении параметров ЗМН:

$$u_{set} = 1,1 \cdot \hat{u}_{st}; t_{set} = 0,9 \cdot \hat{t}_0, \quad (8)$$

где \hat{u}_{st} и \hat{t}_0 – оценки параметров устойчивости, полученные с помощью НС.

Имитация провалов напряжения по вышеприведенной методике показала, что применение зависимой характеристики ЗМН, параметры которой адаптируются к нагрузке и режиму источника питания с помощью алгоритмов НС, позволяет примерно в два раза снизить число необоснованных отключений нагрузки ЭТС.

Заключение (Conclusion)

В результате исследований подтверждено, что значительная часть отключений электрооборудования при возмущениях в электрических сетях промышленных

электротехнических систем является излишней: часто отключения происходят при некритичных провалах напряжения, при которых сохраняется устойчивость ЭТС. Такие отключения в многомашинных системах могут приводить к остановам технологических процессов, что особенно нежелательно для непрерывных производств, характерных для объектов добычи, транспорта и переработки нефти и газа. Сложность выбора рациональных параметров защит минимального напряжения, реагирующих на провалы напряжения, заключается в изменении состава электродвигательной нагрузки и параметров источников питания в процессе эксплуатации ЭТС. Предложены и реализованы в результате компьютерного моделирования принципы мониторинга устойчивости ЭТС по контролируемым в процессе эксплуатации электрическим параметрам (напряжению, току, мощности) и их соответствия установленным в ходе предварительных расчетов параметрам устойчивости. Для реализации мониторинга рекомендованы и апробированы на примере алгоритмы нейронных сетей Левенберга-Марквардта, позволяющие определить параметры устойчивости по измеряемым электрическим параметрам системы. Результаты исследования подтвердили точность мониторинга параметров устойчивости ЭТС в пределах $\pm 10\%$. В дальнейшем целесообразно сравнить использованные алгоритмы и другие известные алгоритмы нейронных сетей.

В результате имитационного компьютерного моделирования установлено, что мониторинг устойчивости и адаптация параметров защиты минимального напряжения к текущим параметрам устойчивости позволит значительно сократить число необоснованных массовых отключений электроприемников ЭТС при провалах напряжения, обусловленных возмущениями в электрических сетях, что особенно актуально для непрерывных производств.

Литература

1. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2010. – 319 с.
2. Дзюин Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2 49-62.
3. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Исследование работы группы асинхронных двигателей при кратковременных провалах напряжения для условий нефтяной промышленности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 92-100. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.
4. Ершов М.С., Комков А.Н., Блюк В.В. Процедуры расчета показателей устойчивости многомашинных электротехнических систем промышленных производств/Промышленная энергетика. – 2021, №9. – С. 18-26.
5. Blyuk V., Ershov M., Komkov A. Models and algorithms for quick calculation of electromechanical transition process of multi-machine electrotechnical systems/ Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. P. 686-689.
6. Галеева Р.У., Куксов С.В. Алгоритм моделирования самозапуска группы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.
7. Liu A., Wang Y., Zhu Y., Park S.-J. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer // IET Power Electron. 2024. Vol. 17. Pp. 1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696.
8. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-адаптивной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 102-123. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6 102-123.
9. Шарыгин М. В., Вуколов В. Ю., Петров А. А. Разработка алгоритма автоматической адаптации параметров срабатывания многомерной интеллектуальной релейной защиты к конфигурации распределительных электрических сетей // Вестник НГИЭИ. 2020. № 11 (114). С. 65–78. DOI: 10.24411/2227-9407- 2020-10106.
10. Viktorovich, V.M., Vasilyevich, D.A., Vladimirovich, M.K. and Nikolaevich, S.V. Comprehensive Automation of Microprocessor Protection Relay Terminals Operated on AC Railways// Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. №10. – P/ 491-503. <https://doi.org/10.4236/jamp.2022.102037>.

11. Ершов М.С., Ноздря Е.Г. Адаптация показателей и идентификация нарушения устойчивости промышленных электротехнических систем/ Промышленная энергетика. 2018. -№12. – С. 2-5.
12. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Егоров А.В. Определение эквивалентных параметров питающей сети для расчета тока короткого замыкания узла нагрузки/Электричество. – 1993. - №10. – С. 19-22.
13. Ting Yang, Xiyang Qian and Liqing Ren. Application of Artificial Intelligence Algorithm in Relay Protection of Distribution Network// International Transactions on Electrical Energy Systems Volume 2022, Article ID 7138367, 12 p. <https://doi.org/10.1155/2022/713836714>.
14. Zozan Saadallah Hussain, Ahmed J. Ali, Ahmed A. Allu, Rakan Khalil Antar. Improvement of protection relay with a single-phase auto reclosing mechanism based on artificial neural network// International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 505-514. ISSN: 2088-8694. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp505-514 .
15. Huo, C., Rong, X.-T., Huang, Z.-W., Han, Z.-X., Fan, Y.-P., Wang, Z.-J., & Fu, J.-R. (2025). A Novel Static Voltage Stability Region Boundary Generation Method Combining Analytics with Predictive Correction. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(5), 2977–2991. <https://doi.org/10.1007/s42835-025-02206-5>
16. Ahmad, H., Yousif, M., Shah, M., & Ullah, N. (2023). Monitoring Transient Stability in Electric Power Systems Using a Hybrid Model of Convolutional Neural Network and Random Forest. *Electric Power Components and Systems*, 52(6), 946–958. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2237034>
17. Umair Shahzad. Probabilistic Transient Stability Assessment of Power Systems Using Artificial Neural Network// Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science – JEECCS. 2021, Volume 8, Issue 27, pages 35-42.

Авторы публикации

Ершов Михаил Сергеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-7772-0095>. ershov.ms@gubkin.ru

Журавлев Семен Михайлович – аспирант кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. *ORCID*: <http://orcid.org/0009-000-2502-9414>. semen386z@gmail.com

References

1. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. Stability of industrial electrical systems. – M.: Nedra Publishing House LLC, 2010. – 319 p.
2. Dzyuin D.V., Skopin G.A., Komkov A.N., Dmitrieva V.V. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (2): 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.
3. Sattarov RR, Garafutdinov RR. research of the operation of a group of asynchronous motors at short-term voltage slopes for the conditions of the oil industry *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):92-100. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.
4. Ershov M.S., Komkov A.N., Blyuk V.V. Procedures for calculating stability indicators of multi-machine electrical systems of industrial production / *Industrial Power Engineering*. - 2021, No. 9. - P. 18-26.
5. Blyuk V., Ershov M., Komkov A. Models and algorithms for quick calculation of electromechanical transition process of multi-machine electrotechnical systems/ *Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019*. P. 686-689.
6. Galeeva RU, Kuksov SV. Algorithm for simulating the self-starting of a group of asynchronous electric motors with a short-circuited rotor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):181-193. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-181-193.
7. Liu A., Wang Y., Zhu Y., Park S.-J. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer // *IET Power Electron*. 2024. Vol. 17. Pp. 1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696.
8. Ivanov IYu., Novokreshchenov VV., Ivanova VR. Current state of the problems of functioning of relay protection and automation complexes used in an active adaptive network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):102-123. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123.

9. Sharygin M. V., Vukolov V. Y., Petrov A. A. Algorithm of automatic adaptation of multidimensional relay protection setpoints to the configurable power distribution network // Bulletin NGIEI. 2020. № 11 (114). P. 65–78. (In Russ.). DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10106 .
10. Viktorovich, V.M., Vasilyevich, D.A., Vladimirovich, M.K. and Nikolaevich, S.V. Comprehensive Automation of Microprocessor Protection Relay Terminals Operated on AC Railways// Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. №10. – P/ 491-503. <https://doi.org/10.4236/jamp.2022.102037>.
11. Ershov M.S., Nozdrya E.G. Adaptation of indicators and identification of violation of stability of industrial electrical systems / Industrial Power Engineering. 2018. - No. 12. - P. 2-5.
12. Menshov B.G., Ershov M.S., Egorov A.V. Determination of equivalent parameters of the power supply network for calculating the short-circuit current of the load node/Electricity. – 1993. - No. 10. – P. 19-22.
13. Ting Yang, Xiyang Qian and Liqing Ren. Application of Artificial Intelligence Algorithm in Relay Protection of Distribution Network// International Transactions on Electrical Energy Systems Volume 2022, Article ID 7138367, 12 p. <https://doi.org/10.1155/2022/713836714>.
14. Zozan Saadallah Hussain, Ahmed J. Ali, Ahmed A. Allu, Rakan Khalil Antar. Improvement of protection relay with a single-phase auto reclosing mechanism based on artificial neural network// International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 505-514. ISSN: 2088-8694. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp505-514 .
15. Huo, C., Rong, X.-T., Huang, Z.-W., Han, Z.-X., Fan, Y.-P., Wang, Z.-J., & Fu, J.-R. (2025). A Novel Static Voltage Stability Region Boundary Generation Method Combining Analytics with Predictive Correction. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(5), 2977–2991. <https://doi.org/10.1007/s42835-025-02206-5>
16. Ahmad, H., Yousif, M., Shah, M., & Ullah, N. (2023). Monitoring Transient Stability in Electric Power Systems Using a Hybrid Model of Convolutional Neural Network and Random Forest. *Electric Power Components and Systems*, 52(6), 946–958. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2237034>
17. Umair Shahzad. Probabilistic Transient Stability Assessment of Power Systems Using Artificial Neural Network// Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science – JEECCS, 2021, Volume 8, Issue 27, pages 35-42.

Authors of the publication

Mikhail S. Ershov – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7772-0095>. ershov.ms@gubkin.ru

Semen M. Zhuravlev – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-2502-9414>. semen386z@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **07.08.2025 г.**

Отредактировано **01.10.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГИЕЙ, ОСНОВАННЫХ НА ПРАВИЛАХ В КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

Карабаджак И.Д.

Петербургский государственный университет путей сообщения, г. Санкт-Петербург,
Россия

iwana.karabajack@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в моделировании и исследовании работы стратегий управления потоками энергии, основанных на правилах, применительно для комбинированной электроэнергетической установки с аккумуляторной батареей и батареей топливных элементов. ЦЕЛЬ работы: рассмотреть проблемы повышения энергоэффективности, экономичности и долговечности источников в комбинированных энергоустановках при помощи стратегий управления, разработать имитационную модель гибридной системы двумя источниками энергии, провести расчёт модели управляемой четырьмя стратегиями основанных на правилах. РЕЗУЛЬТАТЫ. При решении поставленных задач были разработаны модели и алгоритмы в программном комплексе MatLab. В статье описана актуальность темы, рассмотрены стратегии управления потоками энергии и особенности их работы. Проведено моделирование работы гибридной энергоустановки с различными стратегиями управления, рассмотрена возможность обеспечить работу энергоустановки в заданном диапазоне нагрузки с требуемыми условиями. Представлены результаты моделирования работы в виде общей эффективности и экономичности работы гибридной энергоустановки с разными стратегиями управления. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Все исследованные стратегии обеспечивают работу энергоустановки во всём диапазоне нагрузки с высокой эффективностью. Наиболее эффективной стратегией является стратегия состояний, так как на представленном цикле нагрузки стратегия обеспечивает максимальный КПД 95,43%. Самой экономичной стратегией, при которой расход водорода и воздуха минимален (452,3 и 1076,5 л) – стратегия, основанная на алгоритмах нечёткой логики.

Ключевые слова: энергоустановка; батарея топливных элементов; стратегия управления энергией.

Для цитирования: Карабаджак И.Д. Исследование работы стратегий управления энергией, основанных на правилах в комбинированных энергоустановках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 53-66. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-53-66.

RESEARCH OF RULE-BASED ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR HYBRID POWERTRAINS

Karabadzhak I.D.

Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Peterburg, Russia

iwana.karabajack@yandex.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in modeling and studying the operation of energy management systems based on rule-based strategies as applied to a hybrid electric powertrain with a battery and a fuel cell stack. THE PURPOSE of the work: to consider the problems of increasing energy efficiency, cost-effectiveness and durability of power sources in a hybrid electric powertrain using energy control strategies, to design a simulation model of a hybrid system with two energy sources, to develop the model controlled by four rule-based strategies. RESULTS. During researching the problems, models and algorithms were developed in the MatLab software. The article describes the relevance of the research, considers energy

management control strategies and features of their operation. Simulation of the hybrid powertrain with different control strategies was described, the possibility of ensuring the operation of the powertrain with a given load cycle with the required conditions was considered. The results of the simulation of the operation are presented in the form of overall efficiency and cost-effectiveness of the hybrid powertrain with different control strategies. CONCLUSION. All the studied strategies ensure the operation of the powertrain in the entire load range with high efficiency. The most effective strategy is the state machine control strategy, it implements maximum efficiency on the presented load cycle. The most cost-effectiveness strategy, in which the consumption of hydrogen and air is minimal, is the strategy based on fuzzy logic algorithms.

Keywords: *powertrain; fuel cell stack; rule-based strategy.*

For citation: Karabadzhak I.D. Research of rule-based energy management strategies for hybrid powertrains. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 53-66. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-53-66.

Введение (Introduction)

В течение последнего десятилетия интерес транспортной отрасли к разработке эффективных и экологически чистых тяговых систем сделал транспортные средства на топливных элементах реальностью. В настоящее время топливные элементы используются в автомобилях, автобусах, трамваях, поездах и самолетах. Они обеспечивают электроэнергию с высокой эффективностью, меньшим шумом и практически нулевыми выбросами по сравнению с обычными двигателями внутреннего сгорания. Согласно Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации, развитие науки и технологии планируется направить на водородную энергетику, как в области производства водорода, так и в области технологий и промышленной продукции. В России первый тестовый проезд трамвая на водородном топливе состоялся на Московском проспекте в Санкт-Петербурге 20 октября. Для улучшения динамики и плотности мощности систем топливных элементов требуется гибридизация топливных элементов с новыми устройствами хранения энергии, такими как литий-ионные батареи или суперконденсаторы. Эта гибридизация позволяет оптимизировать систему топливных элементов для достижения лучшей экономии топлива и производительности. Эта оптимизация достигается с помощью стратегий управления потоками энергии, которые распределяют мощность нагрузки между источниками энергии. Применение стратегий управления в гибридных силовых установках сможет повысить срок службы силовых агрегатов и снизить расход топлива, как например было реализовано в зарубежной автомобильной промышленности на автомобилях Honda Insight, Toyota Prius, Toyota Mirai и др. В 2000 году был продемонстрирован Chevrolet Suburban с гибридной силовой установкой. Используя контроллер управления, реализующий оптимизационную стратегию управления, переделанный внедорожник достиг значительных улучшений в топливной экономичности, сохранив при этом большинство эксплуатационных характеристик исходного автомобиля. Усреднив участки цикла по шоссе и городу, средняя экономия топлива в эквиваленте бензина составила 11,2 л/100 км. Это примерно в 1,5 раза меньше расхода топлива оригинального Suburban с его 5,3-литровым бензиновым двигателем. Общая эффективность гибридной силовой установки от бака до колёс (tank-to-wheels) составила чуть менее 33% [1].

Один из самых распространённых и простых способов реализовать менеджмент энергии в гибридных установках – это использование алгоритмов управления, основанных на правилах (rule-based). Принцип работы таких алгоритмов состоит во включении или отключении источников и регулировании их выходной мощности на основе заранее заданных, эвристических правил.

Главным преимуществом алгоритмов, основанных на правилах, является их простота и возможность реализации в реальном времени. Однако эти стратегии управления имеют несколько недостатков. Первым из них является отсутствие оптимальности при необходимости получения информации о цикле нагрузки заранее. Кроме того, требуются значительные усилия по калибровке, чтобы гарантировать производительность в удовлетворительном диапазоне для любого цикла нагрузки. Также правила настройки не масштабируются для различных размеров компонентов.

Rule-based стратегии можно разделить на детерминированные и нечеткие. В детерминированных стратегиях правила могут быть заданы вручную исходя из опыта, следуя этим правилам источники энергии работают оптимальных рабочих условиях или в

области высокой эффективности. К детерминированным стратегиям относятся стратегия термостата (ON/OFF), стратегия базовой линии (baseline / power follower), и стратегию состояний (state machine).

Нечёткие стратегии основаны на использовании алгоритмов нечёткой логики (fuzzy logic). Поскольку нечеткие правила можно легко настраивать, преимуществом этого метода является его надежность благодаря его независимости от математической модели контролируемой системы и ее адаптации.

В статье «Powertrain design and control in electrified vehicle. A critical review» авторства Ху С., Хань Ц., Тан С. и др. представлен всесторонний критический обзор текущего состояния и перспектив проектирования электрифицированных силовых агрегатов и управления энергопотреблением. Рассматривается и обсуждается статус исследований в области проектирования силовых агрегатов и развития управления энергопотреблением. Подробно описываются принципы работы стратегий, основанных на правилах [2].

Авторы Тран Д., Вафаейпур М., Эль Багдади М., и др. в работе «Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies» изучают системы менеджмента энергии для качественного исследования, классификации и сравнения существующих подходов с точки зрения принципов, преимуществ и недостатков посредством всестороннего обзора. Рассматриваются как классические стратегии, основанные на правилах так и системы оптимального управления и стратегии на них основанные. Также стратегии управления оцениваются с учётом топологии гибридного и электрических транспортных средств [3].

Литературный обзор (Literature Review)

Стратегия термостата (ON/OFF). В стратегии термостата основным источником энергии является аккумуляторная батарея (АКБ), а батарея топливных элементов (БТЭ) может работать в своей оптимальной точке эффективности, обеспечивая поддержание заряд аккумулятора между predetermined верхним и нижним пределами. Этого можно достичь, включая/выключая БТЭ при необходимости. Разница между мощностью оптимальной точкой эффективности и мощностью нагрузки будет либо подаваться на зарядку аккумулятора, либо поддерживать заряд аккумулятор для подачи требуемой мощности в гибридном режиме. Стратегия термостата (вкл./выкл.) обеспечивает высокий КПД источников энергии, однако частые включения и выключения источников и высокие нагрузки для АКБ негативно сказываются на долговечности источников. Эта стратегия применяется в основном в гибридных транспортных средствах с последовательной гибридной установкой и городском транспорте с частыми остановками.

Яо Д., Лу С., Чао С., и др. в исследовании «Adaptive Equivalent Fuel Consumption Minimization Based Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle» разработали стратегию управления для гибридного электромобиля с увеличенным ходом. Так же для сравнения была представлена классическая стратегия термостата, являющаяся распространённой для данного вида транспортных средств [4].

Парк Дж., О Дж., Парк Й. и др. в работе «Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles» представлена стратегия распределения мощности для гибридного транспортного средства, основанная на стратегии термостата, которая использует карты управления для минимизации потерь в потоке мощности и работы двигателя в эффективной точке [5].

Ханнан М., Азидин Ф., Мохамед А., в работе «Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles» разработана система менеджмента энергии, основанная на стратегии термостата с контроллером мощности, которая позволяет использовать источники энергии в номинальных условиях нагрузки [6].

Стратегия базовой линии. Эта стратегия разработана на основе мощности нагрузки и заряда АКБ. В настоящее время стратегия используется в ADVISOR. Единственным недостатком является то, что она не учитывает напрямую эффективность компонентов и стратегии минимизации расхода топлива/выбросов. Эта стратегия использовалась Honda Insight и Toyota Prius. В стратегии в качестве основного источника питания используется БТЭ, а контроллер регулирует выходную мощность в соответствии с требованиями к мощности системы. АКБ работает только в режиме высокого заряда и низкой нагрузки, а БТЭ заряжает батарею. Стратегия может предложить преимущества общей эффективности системы и улучшенной долговечности батарей по сравнению со стратегией термостата. Стратегия также обеспечивает устойчивый заряд со стабильным напряжением шины.

Ким М., Юнг Д., Мин К. в исследовании «Hybrid thermostat strategy for enhancing fuel economy of series hybrid intracity bus» предлагают новую стратегию управления.

Предлагаемая стратегия основана на стратегии термостата и включает в себя достоинства стратегии базовой линии, что позволяет преодолеть слабые стороны этой стратегии и достичь значительного повышения эффективности. Разработка предлагаемой стратегии основана на совместном моделировании AMESim и Simulink с оптимизацией метода Simplex [7].

Кэ С., Син Х., Чжэнь Ц., и др. в работе «Research on energy management strategy of fuel-cell vehicles based on nonlinear model predictive control» разрабатывают стратегию управления энергией, основанную на технологии нелинейного модельного прогнозирующего управления для решения проблемы экономичности и долговечности гибридного транспортного средства с топливными элементами. Предложенная стратегия сравнивается со стратегиями основанных на правилах, таких как стратегия термостата и стратегия базовой линии [8].

В исследовании «Engine optimal operation lines for power-split hybrid electric vehicles» авторы Ан К. и Папаламброс Я. разработали систему управления энергией, позволяющей работать силовой установке гибридного транспортного средства либо в режиме форсирования мощности, либо в режиме энергосбережения. Первый режим используется для реагирования на полную нагрузку, а второй — для достижения высокой топливной экономичности с учетом увеличенного числа степеней свободы в управлении энергией. Формулируются задачи оптимизации для двух режимов работы, а проектные пространства анализируются для общих архитектур с разделением мощности. В основе разработанной системы лежит стратегия базовой линии [9].

Сун Д., Линь С., Цинь Д., и др. в работе «Power-balancing instantaneous optimization energy management for a novel series-parallel hybrid electric bus» предлагают тип стратегии управления питанием с мгновенной оптимизацией балансировки мощности для нового последовательно-параллельного гибридного электробуса. В соответствии с характеристикой новой последовательно-параллельной архитектуры разрабатываются граничные условия переключения между последовательным и параллельным режимами, а также правила управления стратегии балансировки мощности. По средством моделирования в программном комплексе MATLAB проводится сравнение предложенной стратегии управления с стратегией базовой линии [10].

Хеми Х., Гуили Дж., Черити А. в работе «A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS» представляют стратегию управления энергией в реальном времени для транспортного средства на топливных элементах. Она основана на стратегии базовой линии, в сочетании с эквивалентной стратегией минимизации потребления. Эта стратегия разрабатывается и моделируется с использованием динамической модели транспортного средства, разработанной в среде MatLab/Simulink. В конечном итоге предоставляются результаты моделирования для проверки стратегии при различных массах транспортного средства [11].

Стратегия состояний (state machine). Стратегия, также известная как стратегия многорежимности (multi-mode), управляет состоянием энергоустановки, используя блок-схему или дерево решений стабильных условий, связанных с предыдущими условиями и текущими входными значениями. Стратегия состояний диктует режимы работы, например, режим работы от БТЭ, режим форсирования мощности и режим зарядки. Переход между режимами работы решается на основе изменения требований нагрузки, условий эксплуатации и неисправностей системы/подсистемы. Реализация контроллера энергоустановки через стратегию состояний облегчает отказоустойчивый контроль всей системы.

Сонг К., Ли Ф., Ху Х., и др. в работе «Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm» предлагают многорежимную стратегию управления энергией для электромобилей с расширенным запасом хода на топливных элементах. Эта многорежимная стратегия может автоматически переключаться на оптимизированную генетическим алгоритмом стратегию термостата при определенных условиях вождения с учетом различий в результатах распознавания условий вождения [12].

Ван, Х., Чан, Ч., Пан, З. в исследовании «Optimization of energy management strategies for multi-mode hybrid electric vehicles driven by travelling road condition data» провели работу по оптимизации системы менеджмента энергии для многорежимного гибридного электромобиля. Во-первых, скорость движения была установлена интервально с помощью анализа охвата данных, и были построены городские комплексные циклы вождения на основе пропорции времени вождения. Затем была разработана система управления,

оптимизированная на основе информации о состоянии дороги, в соответствии с рабочими кривыми и пороговыми значениями интервалов двигателей [13].

Кануни, Б., Бадуд Е., Мехилеф, С. в исследовании «Advanced efficient energy management strategy based on state machine control for multi-sources PV-PEMFC-batteries system» предлагают стратегию управления энергией, которая направлена на достижение следующих целей: поддержание параметров шины постоянного тока на заданном уровне, увеличение срока службы батареи и удовлетворение требований мощности. Основным источником энергии является фотоэлектрическая система. Предлагаемое управление отдает приоритет батарее топливных элементов в качестве вторичного источника для зарядки батареи, когда мощности достаточно, а уровень заряда низкий [14].

Для повышения эффективности гибридной системы беспилотного летательного аппарата и продления срока службы в статье «A State Machine EMS Based on Equivalent Consumption Minimization for Hybrid Power System in UAVs» авторами Чу Кю, Ци Чж., Тонг С., и др. предлагается метод управления энергией гибридных систем питания на основе трехпортового импульсного преобразователя постоянного напряжения. В этом методе стратегия эквивалентного потребления эффективно сочетается со стратегией состояний, которая использует взаимодополняющие преимущества обеих стратегий. Она не только решает проблему неравномерного распределения мощности от стратегии эквивалентного потребления, но и преодолевает ограничение стратегией состояний в достижении оптимальной производительности системы [15].

Стратегия нечёткой логики. Стратегия преобразует человеческий опыт и рассуждения в набор правил IF-THEN. Производительность стратегии определяется функцией принадлежности и нечеткими правилами на этапе нечеткого рассуждения. Поскольку нечеткие правила можно легко настраивать, преимуществом этого метода является его надежность благодаря его независимости от математической модели контролируемой системы и ее адаптации, однако стратегия не может гарантировать оптимальную производительность.

В исследовательской работе «Comparative analysis of hybrid vehicle energy management strategies with optimization of fuel economy and battery life» авторами Шраддха С., Сачин Г., Бин С. представлен сравнительный анализ оптимизации срока службы батареи с различными стратегиями управления в параллельном гибридном транспортном средстве. Рассматривается влияние нескольких параметров, включая температуру и ток, на старение батареи, что обеспечивает более точный прогноз срока службы батареи. Анализируются четыре различные стратегии управления, включая стратегию термостата, стратегию нечеткой логики, адаптивную стратегию минимизации эквивалентного потребления. Сравниваются результаты, касающиеся старения батареи и экономии топлива [16].

Авторами Ян Х., Сан И., Ся Ц., и др. в работе «Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Tractor Based on Multi-Algorithm Fusion and Optimization» предлагается гибридный трактор с батареей топливных элементов в качестве основного источника питания и аккумуляторной батареей в качестве вспомогательного. Также была разработана новая стратегия управления энергией, которая объединяет стратегию термостата, стратегию базовой линии и стратегию нечеткой логики. Стратегия управления энергией использует преимущества различных алгоритмов и реализует рациональное распределение выходной мощности батареи топливных элементов и аккумулятора. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая стратегия управления энергией может хорошо работать в различных состояниях SOC и уменьшать колебания мощности топливного элемента [17].

В статье «Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review» авторами Марфироу Х., Вахюнгоро О. и Кахьяди А. всесторонне рассматриваются различные применения контроллеров, основанных на нечёткой логике в качестве систем менеджмента энергии в гибридных транспортных средствах. Проводится сравнительный анализ с другими методами управления и рассматриваются преимущества и проблемы, связанные с каждым методом. Проведено детальное исследование различных типов контроллеров, представляя широкий обзор предлагаемых методологий в каждой категории [18].

Саид Б., Абдельфатах Н., Теджини Х., и др. в исследовании «Fuzzy logic-based Energy Management System (EMS) of hybrid power sources: Battery/Super capacitor for electric scooter supply» разработали алгоритм управления на основе нечеткой логики для управления энергией, чтобы поддерживать батарею и суперконденсатор в их оптимальном состоянии заряда, удовлетворять требованиям нагрузки во время торможения и противонагрузки и повышать независимость энергетической системы. Производительность электроскутера при

изменяющихся нагрузках моделируется в MatLab для проверки эффективности системы управления [19].

Материалы и методы (Materials and methods)

Согласно концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации развитие науки и технологии планируется направить на водородную энергетику, как в области производства водорода, так и в области технологий и промышленной продукции. Одним из направлений является внедрение энергоустановок с водородными топливными элементами. Промежуточным этапом может являться гибридизация имеющихся систем, однако для эффективной работы комбинированных систем необходимо реализации стратегий распределения потоков энергии между источниками энергии. Исследования работы стратегий управления комбинированными электроэнергетическими системами в отечественной литературе практически отсутствуют.

В данной работе рассматриваются различные стратегии управления основанные на правилах на примере энергоустановки с батареей топливных элементов (блок Fuel cell stack) и аккумуляторной батареей (блок Battery) работающей на трёхфазную нагрузку частоты 50 Гц фазного напряжения 220 В активного характера (блок three-phase RLC load). Структурная схема исследуемой гибридной электроустановки и её параметры представлены на рисунке 1 и в таблице 1. График изменения нагрузки представлен на рисунке 2. Моделирование работы энергоустановки и систем управления проводится в программном комплексе MatLab. MatLab – это среда и язык технических расчетов, предназначенный для решения широкого спектра инженерных и научных задач любой сложности в любых отраслях. Это одновременно: язык инженерных расчетов, графические приложения (приложения с графическим интерфейсом), средства разработки программного обеспечения, более сотни прикладных программ (toolboxes) – профессиональных расширений системы и ее адаптации под решение определенных классов математических и научно-технических задач. В Matlab включен Simulink – визуальный редактор для моделирования динамических систем. Несомненным достоинством Simulink является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее устойчивость и скорость работы.

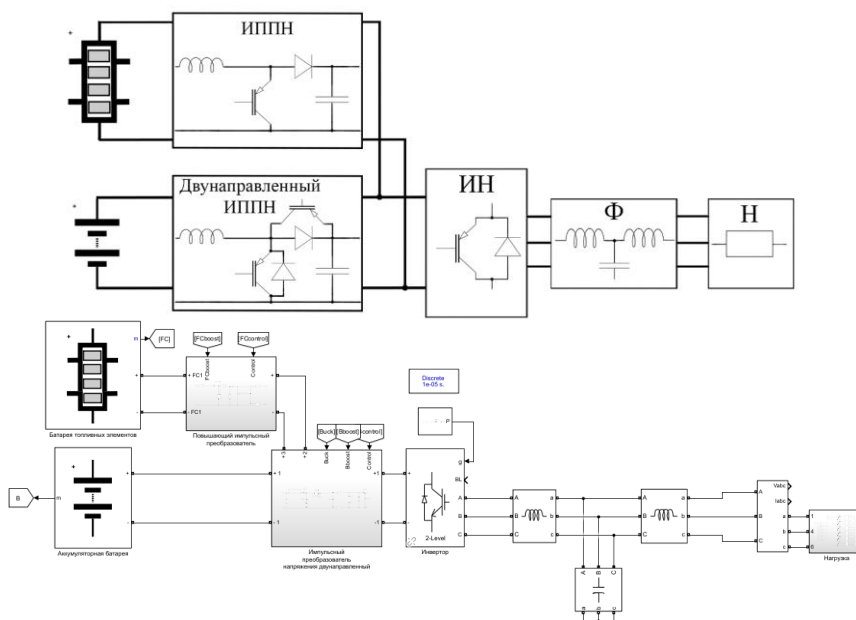


Рис. 1. Структурная схема гибридной энергоустановки и модель реализованная в Simulink

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

Параметры электроэнергетической установки
Parameters of the power plant

Батарея топливных элементов	Мощность номинальная, кВт	100
	Напряжение номинальное, В	390
	Напряжение холостого хода, В	520
	Ток номинальный, А	252
Аккумуляторная батарея	Мощность номинальная, кВт	90
	Напряжение номинальное, В	300
	Ток разряда номинальный, А	300
	Ёмкость, Ач	4
Нагрузка	Мощность, кВт	0 – 100
	Коэффициент мощности	1
	Частота, Гц	50
	Число фаз	3
Инвертор	Частота коммутации ключей, кГц	10
	Число фаз	3

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



Рис. 2. График изменения нагрузки

Fig. 2. Load cycle

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

Результаты (Results)

Для моделирования работы стратегии уровень заряда батареи (SOC) будет поддерживаться в пределах 85-90%. Величины, выводимые на блок осциллографа (Scope): действующее значение напряжение фазы нагрузки, уровень заряда АКБ, расход водорода и воздуха БТЭ, напряжение шины постоянного тока, мощность АКБ на выходе преобразователя напряжения, мощность БТЭ на выходе преобразователя напряжения. Результаты моделирования представлены на рисунках 3 и 4. Интерес представляют графики действующего напряжения фазы нагрузки (измеряется при помощи блока Three-phase measurement), расход водорода и кислорода (выводится из стандартного блока Fuel cell stack), уровень заряда батареи (выводится из стандартного блока Battery), напряжение общей шины постоянного тока (измеряется блоком Voltage measurement), а также выходной мощности источников (из стандартных блоков выводятся значения тока и напряжения источника и умножается блоком Product).

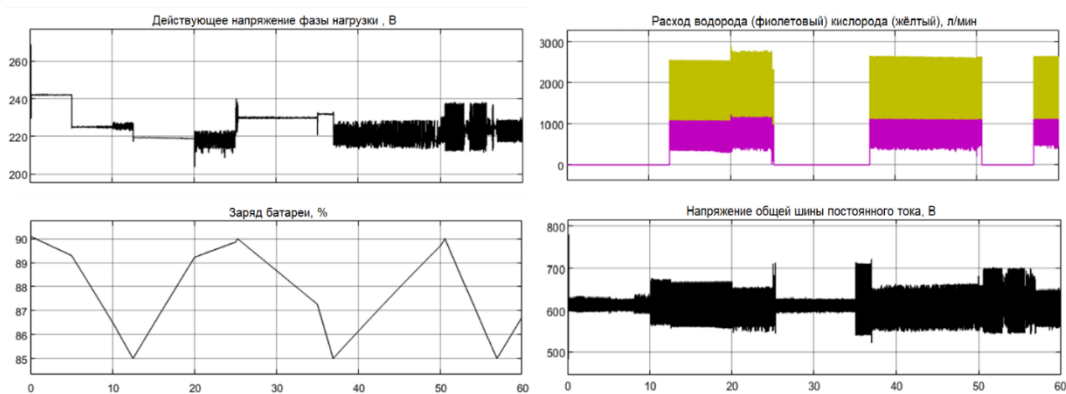


Рис. 3. Результаты моделирования работы стратегии термостата (ON/OFF) *Fig. 3. Results of the simulation of the thermostat strategy (ON/OFF)*

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

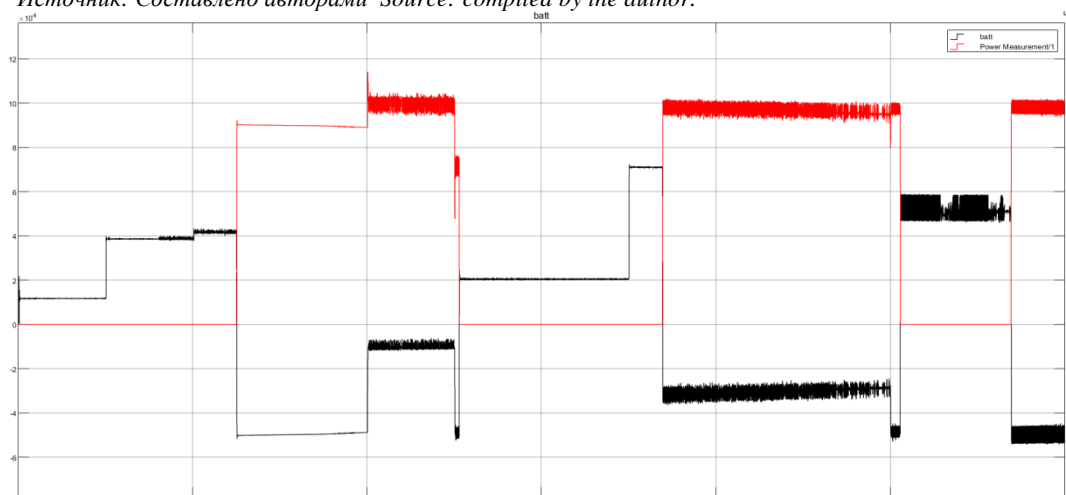


Рис. 4. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ *Fig. 4. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery*

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

Правила заложенные в стратегию управления базовой линии изображены на рисунке 5. При высоком уровне заряда АКБ и нагрузке менее 30 кВт система работает исключительно от АКБ (тёмно-серый участок). В случае низкого заряда АКБ или нагрузок свыше 40 кВт система работает только от БТЭ, часть энергии отправляется на зарядку АКБ. Заштрихованная область на графике представляет собой гистерезис, используемый для предотвращения переключений между АКБ и БТЭ. Гистерезис реализуется блоком Relay. Результаты моделирования представлены на рисунках 6 и 7.

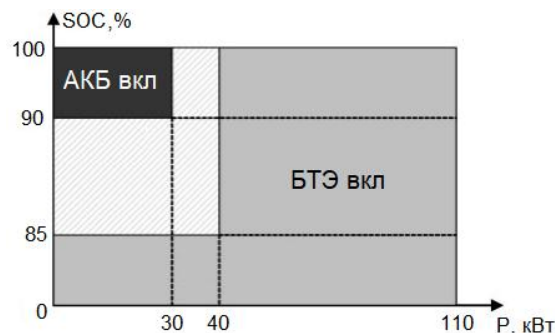


Рис. 5. Принципы управления, реализуемые стратегией базовой линии *Fig. 5. Management principles implemented by the baseline strategy*

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

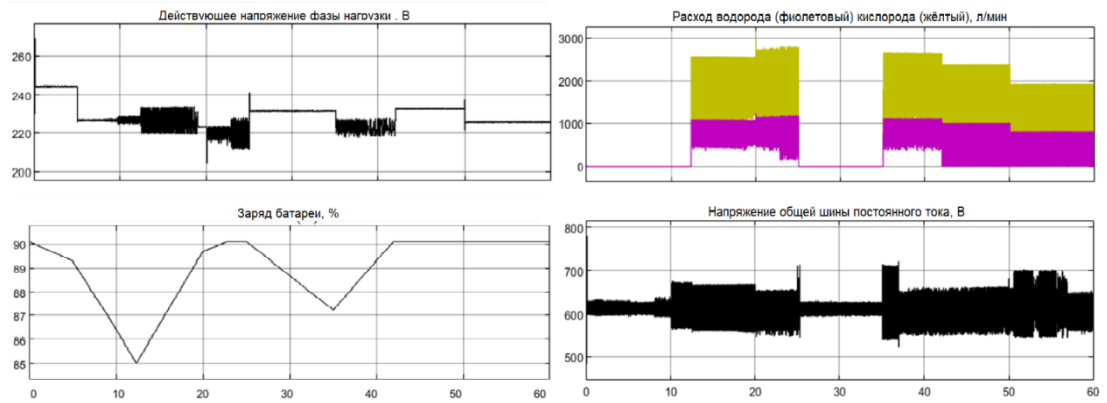


Рис. 6. Результаты моделирования работы стратегии базовой линии

Fig. 6. Results of modeling the operation of the baseline strategy

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

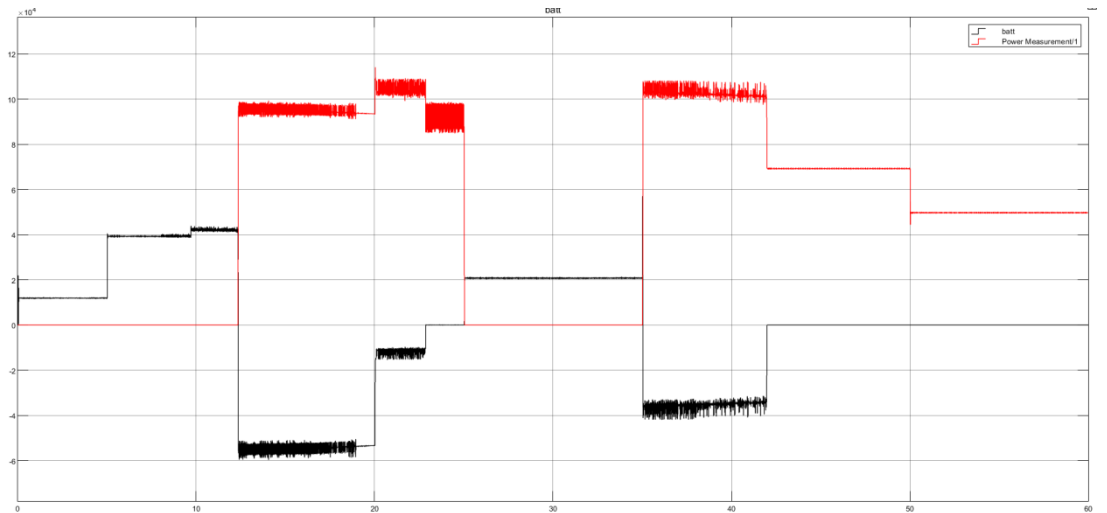


Рис. 7. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ

Fig. 7. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery

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

Правила, заложенные в стратегию состояний, реализуются при помощи блока MatLab-function и описаны в таблице 2. Результаты моделирования представлены на рисунках 8 и 9.

Таблица 2
Table 2

Принципы управления, реализуемые стратегией состояний
Management principles implemented by the state strategy

№	Заряд батареи %	Мощность нагрузки кВт	Мощность источников кВт
1	SOC > 89	$P_H \geq 80$	$P_{BTЭ} = P_H; P_{AKБ} = 0$
2		$45 \leq P_H < 80$	$P_{BTЭ} = P_H + P_{AKБ}; P_{AKБ} = -10$
3		$P_H \leq 45$	$P_{BTЭ} = 0; P_{AKБ} = P_H$
4	$86 < SOC < 89$	$P_H \geq 70$	$P_{BTЭ} = P_H; P_{AKБ} = 0$
5		$45 \leq P_H < 70$	$P_{BTЭ} = P_H + P_{AKБ}; P_{AKБ} = -40$
6		$P_H \leq 45$	$P_{BTЭ} = 0; P_{AKБ} = P_H$
7	SOC < 86	$P_H > 60$	$P_{BTЭ} = P_H; P_{AKБ} = 0$
8		$P_H \leq 60$	$P_{BTЭ} = P_H + P_{AKБ}; P_{AKБ} = -50$

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

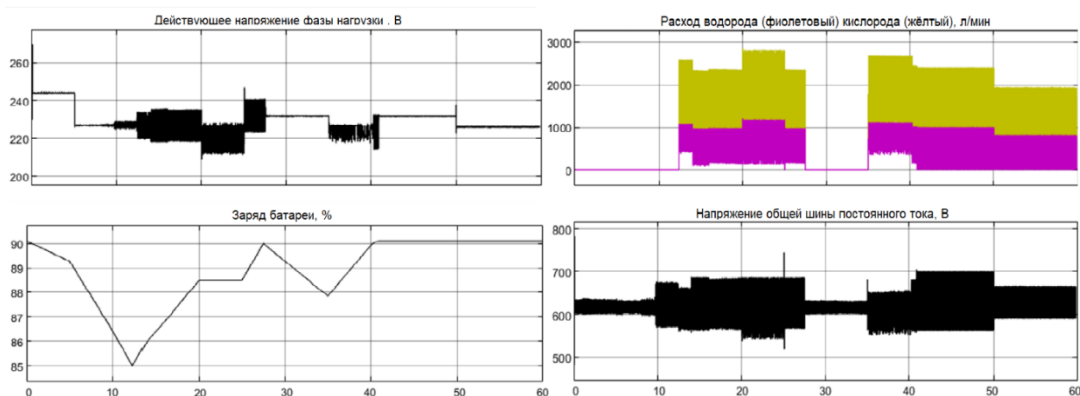


Рис. 8. Результаты моделирования работы стратегии состояний

Fig. 8. Results of modeling the operation of the state machine strategy

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

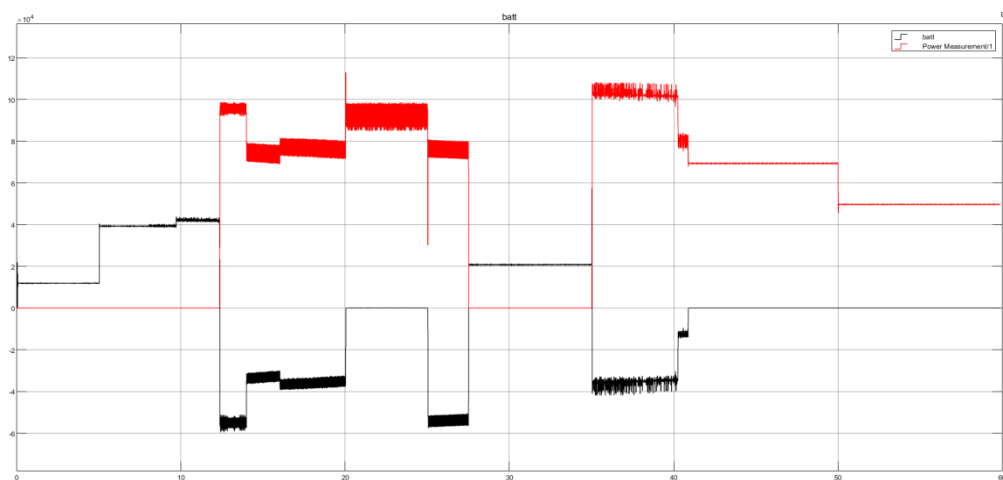


Рис. 9. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ

Fig. 9. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery

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

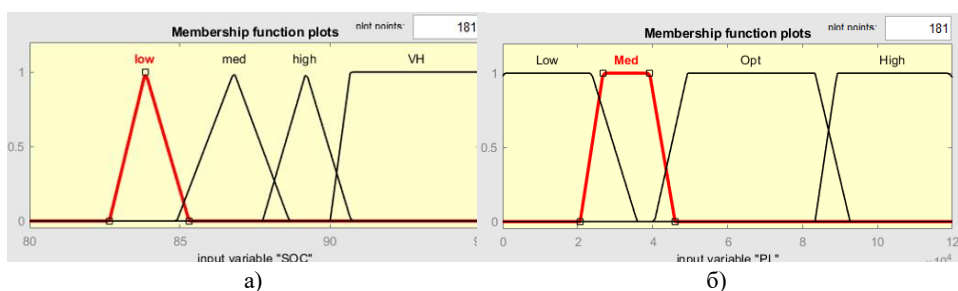
Алгоритмы нечёткой логики задаются при помощи MatLab fuzzy logic toolbox. Правила заложенные в стратегию управления нечёткой логики изображены на рисунках 10 и 11. Результаты моделирования представлены на рисунках 12 и 13.

1. If (SOC is high) and (PL is High) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
2. If (SOC is high) and (PL is Opt) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
3. If (SOC is high) and (PL is Med) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
4. If (SOC is high) and (PL is Low) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
5. If (SOC is med) and (PL is High) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
6. If (SOC is med) and (PL is Opt) then (Bcontrol is Low)(FCcontrol is ON) (1)
7. If (SOC is med) and (PL is Med) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
8. If (SOC is med) and (PL is Low) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
9. If (SOC is low) and (PL is High) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
10. If (SOC is low) and (PL is Opt) then (Bcontrol is Low)(FCcontrol is ON) (1)
11. If (SOC is low) and (PL is Med) then (Bcontrol is Med)(FCcontrol is ON) (1)
12. If (SOC is low) and (PL is Low) then (Bcontrol is High)(FCcontrol is ON) (1)
13. If (SOC is VH) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)

Рис. 10. Правила, реализуемые стратегией нечёткой логики

Fig. 10. Rules implemented by the fuzzy logic strategy

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



а)

б)

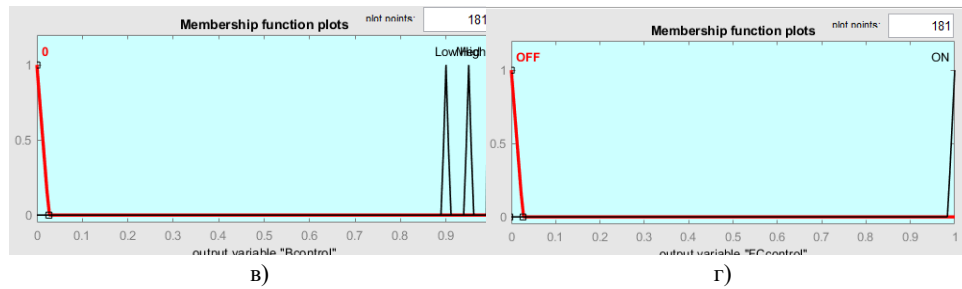


Рис. 11. Функции принадлежности для: а) заряда батареи SOC; б) Мощности нагрузки; в) коэффициент заполнения ИППН АКБ; г) Вкл/выкл БТЭ

Fig. 11. Membership functions for: a) battery charge SOC; b) load power; c) duty cycle; d) Fuel cell on/off

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

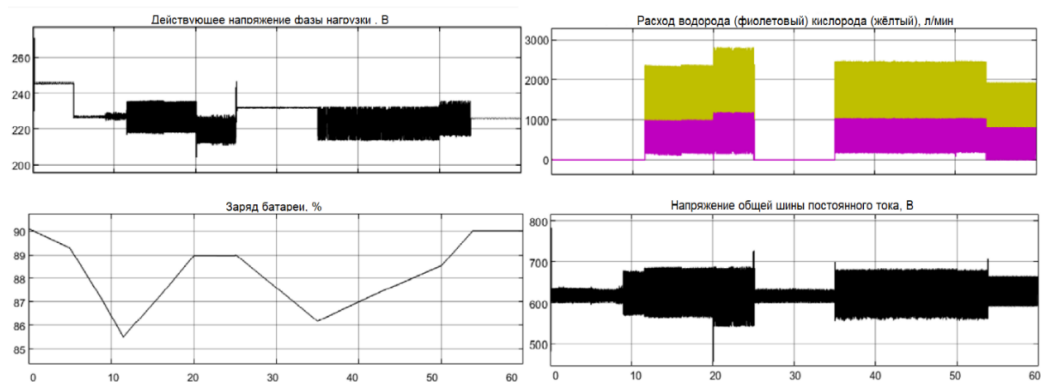


Рис. 12. Результаты моделирования работы стратегии нечёткой логики

Fig. 12. Results of modeling the operation of the fuzzy logic strategy

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

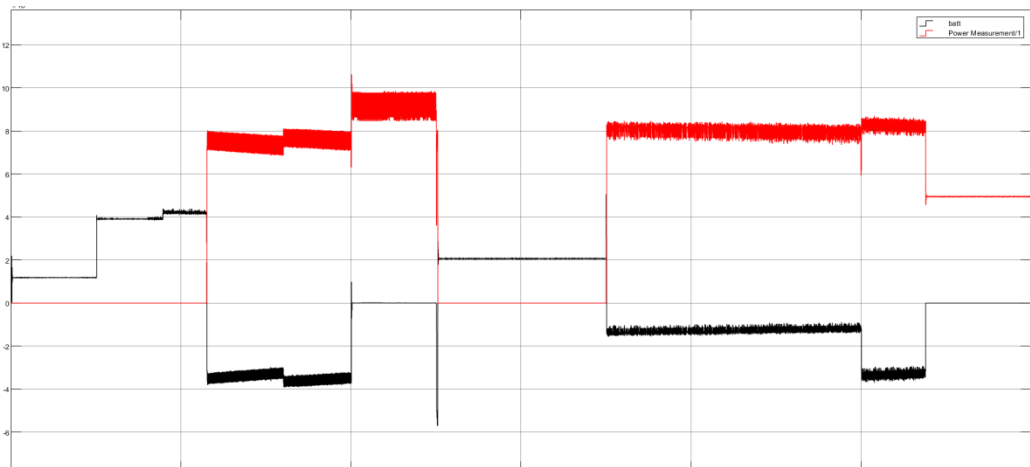


Рис. 13. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ

Fig. 13. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery

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

Обсуждение (Discussions)

В таблице 3 представлены общая эффективность и экономичность работы гибридной энергоустановки с разными стратегиями управления. Все исследованные стратегии обеспечивают работу энергоустановки во всём диапазоне нагрузки с высокой эффективностью.

При реализации стратегии термостата необходимо учитывать, что АКБ может работать при высоких нагрузках, в других стратегиях возможно задать ограничения мощности работы батареи.

Наиболее эффективной стратегией является стратегия состояний, так как на представленном цикле нагрузки реализует максимальный КПД. Самой экономичной стратегией, при которой расход водорода и воздуха минимален – стратегия, основанная на алгоритмах нечёткой логики. Обе эти стратегии обеспечивают высокие экономические и

энергоэффективные показатели, и обладают широкими возможностями настройки и регулировки.

Таблица 3

Table 3

Общая эффективность и экономичность работы гибридной энергоустановки с разными стратегиями управления

Overall efficiency and cost effectiveness of a hybrid power plant with different control strategies

	Стратегия термостата	Стратегия базовой линии	Стратегия состояний	Стратегия нечёткой логики
Общий КПД, %	93,95	94,13	95,43	94,31
Расход водорода, л	452,8	467,9	460,2	452,3
Расход воздуха, л	1077,5	1113,5	1095,1	1076,5

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

Заклучение (Conclusions)

В работе был проанализирован зарубежный опыт в сфере стратегии управления потоками энергии в гибридных электроэнергетических установках. Особенно рассматривались стратегии, основанные на правилах. Такие стратегии являются самыми широко используемыми, простыми в реализации и обеспечивающими быстрое действие в условиях реального времени.

Также в программном комплексе MatLab была создана имитационная модель комбинированной энергоустановки, имеющая в качестве источников энергии батарею топливных элементов и аккумуляторную батарею. На основе этой модели были реализованы четыре стратегии управления энергией основанных на правилах. И проведено сравнение этих стратегий с точки зрения эффективности и экономичности.

В ходе проведённого моделирования можно сделать вывод, что все исследуемые стратегии обеспечивают работу установки в заданном цикле нагрузки с высокой эффективностью и экономичностью. При этом самой экономичной стратегией оказалась стратегия нечёткой логики, а самой эффективной – стратегия состояний.

Исследованные стратегии применимы для любых топологий гибридных энергоустановок с различными видами используемых источников энергии. Применение стратегий в реальных системах позволит увеличить срок службы силовых агрегатов и снизить расход топлива.

В рамках дальнейших исследований следует обратить внимание на теорию оптимального управления и возможность интеграции в rule-based стратегии методов оптимального управления, например, принципа минимума Понтрягина или динамического программирования.

Литература

1. Paganelli G., Ercole G., Brahma A., et al. General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles // JSAE Review. 2001 Vol. 22, N4. pp 511-518.
2. Hu X., Han J., Tang X., et al. Powertrain Design and Control in Electrified Vehicles: A Critical Review // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. Vol. 7, N3. pp. 1990-2009.
3. Tran D., Vafaeipour M., El Baghdadi M., et al. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 119, доступно по <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308044>
4. Yao D., Lu X., Chao X., et al. Adaptive Equivalent Fuel Consumption Minimization Based Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle // Sustainability. 2023. Vol. 15, N5, pp. 4607 – 4625
5. Park J., Oh J., Park Y., et al. Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles. In: IEEE “2006 International Forum on Strategic Technology”; 18-20 Oct 2006. Ulsan, Korea (South). 2006. pp. 37–42. Доступно по <https://ieeexplore.ieee.org/document/4107305>. Ссылка активна на 1 июня 2025.
6. Hannan M., Azidin F., Mohamed A., Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles // Energy Conversion and Management. 2012. Vol. 62, pp. 123–130.
7. Kim M., Jung D., Min K., Hybrid thermostat strategy for enhancing fuel economy of series hybrid intracity bus // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2014. Vol. 63, N 8. pp. 3569–3579.

8. Ke S., Xing H., Zhen C., et al. Research on energy management strategy of fuel-cell vehicles based on nonlinear model predictive control // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 50, Pt. B. pp 1604 – 1621.
9. Ahn K., Papalambros Y., Engine optimal operation lines for power-split hybrid electric vehicles // *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*. 2009. Vol. 223, Pt. D. pp. 1149–1162.
10. Sun D., Lin X., Qin D., et al. Power-balancing instantaneous optimization energy management for a novel series-parallel hybrid electric bus // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 25. Pp. 1161–1170.
11. Hemi H., Ghouili J., Cheriti A. A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS. In: 2013 IEEE “Electrical Power & Energy Conference”; 21-23 Aug 2013; Halifax, NS, Canada; 2013. pp. 1–6. Доступно по <https://ieeexplore.ieee.org/document/6802927>. Ссылка активна на 1 июня 2025.
12. Song K., Li F., Hu X., et al. Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm // *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 389, pp. 230–239.
13. Wang H., Chang C., Pan Z., et al. Optimization of energy management strategies for multi-mode hybrid electric vehicles driven by travelling road condition data // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, доступно по https://www.researchgate.net/publication/390733685_Optimization_of_energy_management_strategies_for_multi-mode_hybrid_electric_vehicles_driven_by_travelling_road_condition_data
14. Kanouni B., Badoud A.E., Mekhilef S., et al. Advanced efficient energy management strategy based on state machine control for multi-sources PV-PEMFC-batteries system // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, доступно по https://www.researchgate.net/publication/379602451_Advanced_efficient_energy_management_strategy_based_on_state_machine_control_for_multi-sources_PV-PEMFC-batteries_system
15. Chu K., Qi Z., Tong X., et al. A State Machine EMS Based on Equivalent Consumption Minimization for Hybrid Power System in UAVs. In: Qu Y., Gu M., Niu Y., editors. *Proceedings of “3rd 2023 International Conference on Autonomous Unmanned Systems”*; 27 April 2024; Springer, Singapore; 2024. vol 1176.
16. Shradhdha S., Sachin G., Bin X. Comparative analysis of hybrid vehicle energy management strategies with optimization of fuel economy and battery life // *Energy*. 2021. Vol. 228. pp 150–161. Доступно по https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-1099-7_15. Ссылка активна на 1 июня 2025.
17. Yang H., Sun Y., Xia C., et al. Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Tractor Based on Multi-Algorithm Fusion and Optimization // *Energies*. 2022. Vol. 15, N 17. pp. 6389 – 6404.
18. Maghfiroh H., Wahyunggoro O., Cahyadi A. Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. pp. 56097-56109.
19. Saied B., Abdelfatah N., Tedjini H., et al. Fuzzy logic-based Energy Management System (EMS) of hybrid power sources: Battery/Super capacitor for electric scooter supply // *Journal of Engineering Research*. 2024. Vol. 12. Pt. 1. pp. 148-159.

Авторы публикации

Карабаджак Иван Дмитриевич – ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0004-5368-6373>. iwan.karabajack@yandex.ru

References

1. Paganelli G., Ercole G., Brahma A., et al. General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. *JSAE Review*. 2001;22(4):511-518. doi.org/10.1016/S0389-4304(01)00138-2
2. Hu X., Han J., Tang X., et al. Powertrain Design and Control in Electrified Vehicles: A Critical Review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021;7(3):1990-2009. doi: 10.1109/TTE.2021.3056432
3. Tran D., Vafaeipour M., El Baghdadi M., et al. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 119 doi: 10.1016/j.rser.2019.109596. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308044>

4. Yao D., Lu X., Chao X., et al. Adaptive Equivalent Fuel Consumption Minimization Based Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle. *Sustainability*. 2023;15(5): 4607–4625. doi.org/10.3390/su15054607.
5. Park J., Oh J., Park Y., et al. Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles. In: *IEEE “2006 International Forum on Strategic Technology”*; 18–20 Oct 2006. Ulsan, Korea (South); 2006. pp. 37–42. doi.org/10.1109/IFOST.2006.312240. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4107305>. Accessed: 1 Jun 2025.
6. Hannan M., Azidin F., Mohamed A. Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles. *Energy Conversion and Management*. 2012;62:123–130. doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.001.
7. Kim M., Jung D., Min K. Hybrid thermostat strategy for enhancing fuel economy of series hybrid intracity bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014;63(8):3569–3579. doi.org/10.1109/TVT.2013.2290700.
8. Ke S., Xing H., Zhen C., et al. Research on energy management strategy of fuel-cell vehicles based on nonlinear model predictive control. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;50(Pt B):1604–1621. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.304.
9. Ahn K., Papalambros Y. Engine optimal operation lines for power-split hybrid electric vehicles. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*. 2009;223(Pt D):1149–1162. doi.org/10.1243/09544070JAUTO1124.
10. Sun D., Lin X., Qin D., et al. Power-balancing instantaneous optimization energy management for a novel series-parallel hybrid electric bus. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012;25:1161–1170. doi.org/10.3901/CJME.2012.06.1161.
11. Hemi H., Ghouili J., Cheriti A. A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS. In: *2013 IEEE “Electrical Power & Energy Conference”*; 21–23 Aug 2013; Halifax, NS, Canada; 2013. pp. 1–6. doi.org/10.1109/EPEC.2013.6802927. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6802927>. Accessed: 1 Jun 2025.
12. Song K., Li F., Hu X., et al. Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm. *Journal of Power Sources*. 2018;389:230–239. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.024.
13. Wang H., Chang C., Pan Z., et al. Optimization of energy management strategies for multi-mode hybrid electric vehicles driven by travelling road condition data. *Scientific Reports*. 2025;15. doi.org/10.1038/s41598-025-97521-2 Available at: https://www.researchgate.net/publication/390733685_Optimization_of_energy_management_strategies_for_multi-mode_hybrid_electric_vehicles_driven_by_travelling_road_condition_data
14. Kanouni B., Badoud A.E., Mekhilef S., et al. Advanced efficient energy management strategy based on state machine control for multi-sources PV-PEMFC-batteries system. *Scientific Reports* 2024;14. doi.org/10.1038/s41598-024-58785-2 Available at: https://www.researchgate.net/publication/379602451_Advanced_efficient_energy_management_strategy_based_on_state_machine_control_for_multi-sources_PV-PEMFC-batteries_system
15. Chu K., Qi Z., Tong X., et al. A State Machine EMS Based on Equivalent Consumption Minimization for Hybrid Power System in UAVs. In: Qu Y., Gu M., Niu Y., editors. *Proceedings of “3rd 2023 International Conference on Autonomous Unmanned Systems”*; 27 Apr 2024; Springer, Singapore; 2024. vol 1176. doi.org/10.1007/978-981-97-1099-7_15
16. Shradhdha S., Sachin G., Bin X. Comparative analysis of hybrid vehicle energy management strategies with optimization of fuel economy and battery life. *Energy*. 2021;228:150–161. doi.org/10.1016/j.energy.2021.120604. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-1099-7_15. Accessed: 1 Jun 2025.
17. Yang H., Sun Y., Xia C., et al. Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Tractor Based on Multi-Algorithm Fusion and Optimization. *Energies*. 2022;15(17):6389–6404. doi.org/10.3390/en15176389
18. Maghfiroh H., Wahyungoro O., Cahyadi A. Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review. *IEEE Access*. 2024;12:56097–56109. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3390436.
19. Saied B., Abdelfatah N., Tedjini H., et al. Fuzzy logic-based Energy Management System (EMS) of hybrid power sources: Battery/Super capacitor for electric scooter supply. *Journal of Engineering Research*. 2024;12(Pt. 1):148–159. doi.org/10.1016/j.jer.2023.07.008.

Authors of the publication

Ivan D. Karabadjhak – Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-5368-6373>. iwan.karabajack@yandex.ru

© Карабаджак И.Д.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено ***11.06.2025 г.***

Отредактировано ***28.08.2025 г.***

Принято ***01.10.2025 г.***



АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНОЙ РОБАСТНОСТИ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИНОМОВ ЭРМИТА-БИЛЕРА

Малёв Н.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данной работы заключается в анализе локальной робастности управляемого электропривода, представляющем собой ключевую задачу в случае функционирования в условиях неопределенности, когда одним из важнейших требований к системе является поддержание способности объекта исследования сохранять стабильность и требуемое качество процессов управления при влиянии дестабилизирующих факторов различной физической природы. ЦЕЛЬ. В работе исследуются системные свойства позиционного электропривода с определением количественных оценок допустимых вариаций параметров математической модели системы. Целевой установкой данной аналитики является оценка прямых и косвенных показателей качества функционирования позиционного электропривода на основе сформированного в результате исследования интервального полинома с применением методов компьютерного моделирования. Анализ локальной робастности позволяет оценить границы асимптотической устойчивости исследуемой системы в условиях параметрических возмущений. Формирование интервального многочлена на основе аппарата полиномов Эрмита-Билера и компьютерное моделирование исследуемого позиционного электроприводов в диапазоне рассчитанных границ вариаций параметров является важной и актуальной задачей. МЕТОДЫ. При решении задачи исследования применялись методы математического анализа, теории устойчивости и теории систем автоматического управления, векторно-матричные уравнения в форме пространств состояний и дифференциальные уравнения в операторной форме записи, математический аппарат полиномов Эрмита-Билера, а также моделирование уравнений динамики исследуемого электропривода в программной среде MatLab. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе решена задача анализа локальной робастности позиционного электропривода и получен интервальный полином с нижней и верхней границами коэффициентов, сопровождающий характеристический многочлен исследуемой системы. На основании результатов анализа проведено компьютерное моделирование и получены количественные оценки показателей качества функционирования исследуемого электропривода во временной и частотной областях. Приведены графики дополнительного движения, позволяющие при формировании объектов управления данного класса с устройствами коррекции и измерения компонентов вектора состояния проводить сравнительный анализ конфигурации исследуемой системы на предмет потенциальной стабильности показателей качества функционирования в условиях параметрических возмущений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Исследование системных свойств позиционного электропривода по выходу его математической модели с точки зрения анализа локальной робастности позволяет оценить диапазон вариаций параметров по степени достижимости требуемых показателей качества функционирования объекта исследования с использованием характерных особенностей различных алгоритмов управления. Результаты проведенного анализа обеспечивают возможность рационально распределять ресурсы управления на основе классических алгоритмов, оценивать эффект введения в систему регуляторов выходных координат в условиях параметрических возмущений, а также проводить сравнение альтернативных вариантов формирования алгоритмов коррекции с применением классических методов с адаптивным подходом поискового или аналитического (беспоискового) видов, базирующихся на использовании эталонных моделей объекта исследования с идентификационным или прямым типами управления.

Ключевые слова: локальная робастность; характеристический полином; позиционный электропривод; устойчивость; качество функционирования; неопределенность; параметрические возмущения.

Для цитирования: Малёв Н.А. Анализ локальной робастности позиционного электропривода с применением полиномов Эрмита-Билера // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 67-85. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-67-85.

ANALYSIS OF LOCAL ROBUSTNESS OF A POSITIONAL ELECTRIC DRIVE USING HERMITE-BIEHLER POLYNOMIALS

Malev N.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of this work lies in the analysis of the local robustness of a controlled electric drive, which is a key task in the case of operation under conditions of uncertainty, when one of the most important requirements for the system is to maintain the ability of the object of study to maintain stability and the required quality of control processes under the influence of destabilizing factors of various physical natures. *PURPOSE.* The paper studies the system properties of a positional electric drive with the definition of quantitative estimates of permissible variations in the parameters of the mathematical model of the system. The target setting of this analysis is to evaluate direct and indirect indicators of the quality of the positional electric drive operation based on the interval polynomial formed as a result of the study using computer modeling methods. Analysis of local robustness allows us to estimate the boundaries of asymptotic stability of the system under study under parametric disturbances. Formation of an interval polynomial based on the apparatus of Hermite-Biehler polynomials and computer modeling of the positional electric drive under study in the range of calculated boundaries of parameter variations is an important and urgent task. *METHODS.* When solving the research problem, methods of mathematical analysis, stability theory and theory of automatic control systems, vector-matrix equations in the form of state spaces and differential equations in operator form, the mathematical apparatus of Hermite-Biehler polynomials, as well as modeling of the dynamics equations of the electric drive under study in a software environment were used MatLab. *RESULTS.* In this work, the problem of analyzing the local robustness of a positional electric drive is solved and an interval polynomial with lower and upper bounds of the coefficients is obtained that accompanies the characteristic polynomial of the system under research. Based on the results of the analysis, computer modeling was carried out and quantitative estimates of the quality indicators of the functioning of the electric drive under research were obtained in the time and frequency domains. Graphs of additional motion are presented, which allow, when forming control objects of this class with sensors and coordinate controllers, to carry out a comparative analysis of the configuration of the system under research for the potential stability of performance indicators under conditions of parametric disturbances. *CONCLUSION.* The research of the system properties of a positional electric drive according to the output coordinate of its mathematical model from the point of view of local robustness analysis allows us to evaluate the range of parameter variations according to the degree of achievability of the required indicators of the quality of functioning of the object using the characteristic features of various control algorithms. The results of the analysis provide the opportunity to rationally distribute control resources based on classical algorithms and evaluate the effect of introducing output coordinate controllers into the system under conditions of parametric disturbances. It is also possible to compare options for the formation of correction algorithms using classical methods with an adaptive approach of search or analytical (non-search) types, based on the use of reference models of the research object with identification or direct types of control.

Keywords: local robustness; characteristic polynomial; positional electric drive; stability; quality of operation; uncertainty; parametric disturbances.

For citation: Malev N.A. Analysis of local robustness of a positional electric drive using Hermite-Biehler polynomials. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 67-85. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-67-85.

Введение (Introduction)

Классические методы анализа и синтеза систем управления электроприводов базируются на предположении, что математические модели объектов исследования с необходимой и достаточной точностью описывают реальное поведение объектов [1, 2], не допускают структурных изменений в процессе функционирования, а параметры моделей стационарны и не подвержены флуктуациям [3, 4]. На практике электроприводы являются объектами, работающими в условиях влияния различных дестабилизирующих воздействий [5, 6], вызванных, в том числе, нестабильностью параметров в процессе эксплуатации [7-9]. В данном случае речь идет о параметрической неопределенности математической модели объекта [10-12], которая может существенно отличаться от номинальной или эталонной модели, положенной в основу формирования алгоритма управления с применением классических методов синтеза [13-15]. Параметрическая неопределенность предполагает изменение системных параметров математических моделей, таких как коэффициенты полиномов числителей и знаменателей передаточных функций или коэффициентов матриц состояния, входа и выхода объектов исследования [16, 17]. Другие виды неопределенностей, такие как сигнальная, вызванная воздействием на объект заранее неизвестного возмущения экзогенного или эндогенного происхождения, функциональная, при наличии которой математическая модель объекта содержит неизвестные функциональные зависимости переменных состояния, регулируемых координат или сигналов управления и структурная, когда структура математической модели объекта известна неточно и является причиной возникновения паразитной динамики, – все перечисленные виды неопределенностей могут быть сведены к параметрической неопределенности, которая учитывает как априорные, так и текущие вариации параметров математической модели [18-20].

Приведенные выше соображения наряду с гипотезой о возможности рассмотрения сигнальной, функциональной и структурной неопределенностей как параметрической позволяют рассматривать управляемый позиционный электропривод как объект с параметрической неопределенностью [21, 22]. В итоге возникает задача аналитического определения вариаций нестабильных параметров относительно их номинальных (эталонных) значений. Результаты решения данной задачи, в зависимости от особенностей их применения, могут быть представлены в абсолютных или относительных единицах в аддитивной или мультипликативной форме [23, 24]. Целью данного исследования является определение показателей качества динамических процессов регулируемого позиционного электропривода, функционирующего в условиях параметрической неопределенности на основе анализа локальной робастности, т.е. аналитической оценки вариаций параметров математической модели объекта исследования с применением аппарата полиномов Эрмита-Билера. Научная значимость исследования состоит в определении прямоугольного гиперпараллелепипеда в пространстве нестабильных параметров при произвольной параметрической неопределенности в условиях сохранения асимптотической устойчивости системы. Практическая значимость исследования заключается в формировании алгоритма вычисления интервального полинома, сопровождающего характеристический полином эталонной модели объекта, с определением верхнего и нижнего диапазонов изменений параметров в рамках устойчивого решения уравнений динамики с возможностью автоматизированной реализации указанного алгоритма.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрим объект исследования, позиционный следящий электропривод, представленный линейной стационарной системой вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$$

с характеристическим многочленом

$$\det[\mathbf{E}s - \mathbf{A}] = D(s) = s^n + \sum_{i=1}^n a_i s^{n-i} = \prod_{i=1}^n (s - \lambda_i) = 0, \quad (1)$$

удовлетворяющим критерию Рауса-Гурвица, т.е. полюсами $\operatorname{Re} \lambda_i < 0$ ($i = \overline{1, n}$) [25-27].

Решим задачу определения интервального многочлена

$$D_{\text{int}}(s) = s^n + \sum_{i=1}^n [\underline{a}_i, \overline{a}_i] s^{n-i}, \quad (2)$$

сопровождающего характеристический полином (1), с верхней \overline{a}_i и нижней \underline{a}_i границами коэффициентов, удовлетворяющих неравенствам

$$\underline{a}_i < a_i < \overline{a}_i \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3)$$

Поставленную задачу будем решать с применением полиномов Эрмита-Билера [28], позволяющих представить характеристический полином $D(s)$ суммой

$$D(s) = G(a_n, a_{n-2}, a_{n-4}, \dots) + sH(a_{n-1}, a_{n-3}, a_{n-5}, \dots).$$

Полиномы Эрмита-Билера G и H определяются выражениями

$$G(a_n, a_{n-2}, a_{n-4}, \dots) = a_n + a_{n-2}s^2 + a_{n-4}s^4 + \dots = G(l) = a_1^{n-2\lfloor n/2 \rfloor} \Phi_G(l),$$

$$\Phi_G(l) = \prod_{i=1}^{\lfloor n/2 \rfloor} (l - \mu_i) = 0, \quad l = s^2;$$

$$H(a_{n-1}, a_{n-3}, a_{n-5}, \dots) = a_{n-1} + a_{n-3}s^2 + a_{n-5}s^4 + \dots = H(l) = a_1^{n-1-2\lfloor (n-1)/2 \rfloor} \Phi_H(l),$$

$$\Phi_H(l) = \prod_{i=1}^{\lfloor (n-1)/2 \rfloor} (l - \eta_i) = 0.$$

Здесь $\Phi_G(l)$, $\Phi_H(l)$ – приведенные многочлены полиномов Эрмита-Билера G и H , а квадратные скобки означают операцию взятия целой части действительного числа.

Если характеристический полином $D(s)$ имеет устойчивое решение, то при условии $a_1 > 0$, корни приведенных многочленов Эрмита-Билера $\Phi_G(l)$, $\Phi_H(l)$ отрицательны, вещественны и перемежаются, удовлетворяя неравенствам

$$0 > \mu_1 > \eta_1 > \mu_2 > \eta_2 > \dots > \mu_i > \eta_i > \dots \quad (4)$$

Устойчивое решение интервального полинома $D_{\text{int}}(s)$ означает, что устойчивыми будут решения следующих четырех полиномов, составленных из верхних и нижних граничных значений коэффициентов интервального полинома (2):

$$\begin{aligned} D_1(s) &= G_1(\overline{a}_n, \overline{a}_{n-2}, \overline{a}_{n-4}, \dots) + sH_1(\overline{a}_{n-1}, \overline{a}_{n-3}, \overline{a}_{n-5}, \dots), \\ D_2(s) &= G_1(\underline{a}_n, \underline{a}_{n-2}, \underline{a}_{n-4}, \dots) + sH_2(\underline{a}_{n-1}, \underline{a}_{n-3}, \underline{a}_{n-5}, \dots), \\ D_3(s) &= G_2(\overline{a}_n, \overline{a}_{n-2}, \overline{a}_{n-4}, \dots) + sH_2(\overline{a}_{n-1}, \overline{a}_{n-3}, \overline{a}_{n-5}, \dots), \\ D_4(s) &= G_2(\underline{a}_n, \underline{a}_{n-2}, \underline{a}_{n-4}, \dots) + sH_1(\underline{a}_{n-1}, \underline{a}_{n-3}, \underline{a}_{n-5}, \dots). \end{aligned} \quad (5)$$

Если приведенные многочлены $\Phi_G(l)$, $\Phi_H(l)$ полиномов Эрмита-Билера G и H , фигурирующих в (5), представить в виде

$$\begin{aligned} \Phi_{G_1}(l) &= l^m + \beta_1^{\overline{G}} l^{m-1} + \beta_2^{\overline{G}} l^{m-2} + \beta_3^{\overline{G}} l^{m-3} + \beta_4^{\overline{G}} l^{m-4} + \dots, \quad m = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, \\ \Phi_{G_2}(l) &= l^m + \beta_1^{\underline{G}} l^{m-1} + \beta_2^{\underline{G}} l^{m-2} + \beta_3^{\underline{G}} l^{m-3} + \beta_4^{\underline{G}} l^{m-4} + \dots, \\ \Phi_{H_1}(l) &= l^k + \beta_1^{\overline{H}} l^{k-1} + \beta_2^{\overline{H}} l^{k-2} + \beta_3^{\overline{H}} l^{k-3} + \beta_4^{\overline{H}} l^{k-4} + \dots, \quad k = \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor, \\ \Phi_{H_2}(l) &= l^k + \beta_1^{\underline{H}} l^{k-1} + \beta_2^{\underline{H}} l^{k-2} + \beta_3^{\underline{H}} l^{k-3} + \beta_4^{\underline{H}} l^{k-4} + \dots, \end{aligned} \quad (6)$$

то устойчивость решения интервального полинома означает, что для всех $i, j = 1, 2$ полиномы G_i, H_j , определяемые выражениями:

$$\begin{aligned} &\text{при нечетном } n \\ &G_1(l) = \underline{a}_1 \Phi_{G_1}(l), \quad G_2(l) = \overline{a}_1 \Phi_{G_2}(l), \\ &H_1(l) = \Phi_{H_1}(l), \quad H_2(l) = \Phi_{H_2}(l), \\ &\text{при четном } n \\ &G_1(l) = \Phi_{G_1}(l), \quad G_2(l) = \Phi_{G_2}(l), \\ &H_1(l) = \underline{a}_1 \Phi_{H_1}(l), \quad H_2(l) = \overline{a}_1 \Phi_{H_2}(l), \end{aligned} \quad (7)$$

составляют положительные пары $[G_i, H_j]$.

Пары полиномов $[\Phi_{G_1}, \Phi_{G_2}], [\Phi_{H_1}, \Phi_{H_2}]$, сопровождающих многочлены $\Phi_G(l), \Phi_H(l)$, верхняя и нижняя границы которых чередуются при условии выполнения неравенств

$$\underline{\beta}_i^G < \beta_i^G < \overline{\beta}_i^G \quad (i = \overline{1, m}), \quad \underline{\beta}_i^H < \beta_i^H < \overline{\beta}_i^H \quad (i = \overline{1, k}), \quad (8)$$

называются парами Лобачевского [29, 30].

При заданном характеристическом полиноме $D(s)$ (1), удовлетворяющем критерию Рауса-Гурвица, можно вычислить корни соответствующей ему положительной пары многочленов Эрмита-Билера $\Phi_G(l), \Phi_H(l)$ и, с учетом выполнения неравенств (4), разбить отрицательную полуось оси вещественных чисел комплексной плоскости корней на непересекающиеся вариации возможных изменений корней положительных пар полиномов Φ_{G_i}, Φ_{H_j} ($i, j = 1, 2$) в соответствии с неравенством

$$\begin{aligned} 0 > \overline{\mu}_1 > \underline{\mu}_1 > \overline{\mu}_2 > \underline{\mu}_2 > \overline{\mu}_3 > \underline{\mu}_3 > \dots \\ \dots > \overline{\mu}_i > \underline{\mu}_i > \overline{\mu}_{i+1} > \underline{\mu}_{i+1} > \dots, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\overline{\mu}_i, \underline{\mu}_i, \overline{\eta}_j, \underline{\eta}_j$ ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}$) – отрицательные действительные числа, корни положительных пар полиномов Φ_{G_i}, Φ_{H_j} ($i, j = 1, 2$).

Связь корней приведенных многочленов $\Phi_G(l), \Phi_H(l)$ с коэффициентами полиномов $[\Phi_{G_i}, \Phi_{H_j}]$ ($i, j = 1, 2$) определяется выражениями

$$\begin{aligned} \Phi_{G_1}(l) &= (l - \underline{\mu}_m)(l - \overline{\mu}_{m-1})(l - \underline{\mu}_{m-2})(l - \overline{\mu}_{m-3}) \dots, \\ \Phi_{G_2}(l) &= (l - \overline{\mu}_m)(l - \underline{\mu}_{m-1})(l - \overline{\mu}_{m-2})(l - \underline{\mu}_{m-3}) \dots, \\ \Phi_{H_1}(l) &= (l - \underline{\eta}_k)(l - \overline{\eta}_{k-1})(l - \underline{\eta}_{k-2})(l - \overline{\eta}_{k-3}) \dots, \\ \Phi_{H_2}(l) &= (l - \overline{\eta}_k)(l - \underline{\eta}_{k-1})(l - \overline{\eta}_{k-2})(l - \underline{\eta}_{k-3}) \dots \end{aligned}$$

Таким образом, алгоритм определения интервального полинома $D_{\text{int}}(s)$, сопровождающего характеристический полином $D(s)$ устойчивой замкнутой системы может быть представлен следующей последовательностью действий:

- 1) формирование полиномов Эрмита-Билера G и H , сопровождающих заданный характеристический полином $D(s)$ устойчивой замкнутой системы;
- 2) формирование приведенных многочленов Эрмита-Билера $\Phi_G(l), \Phi_H(l)$, сопровождающих полиномы G и H ;
- 3) определение корней приведенных многочленов Эрмита-Билера $\Phi_G(l), \Phi_H(l)$;
- 4) разбиение отрицательной полуоси оси вещественных чисел комплексной плоскости на непересекающиеся интервалы возможных вариаций корней, определенных в п.3, в соответствии с неравенством (9), с учетом выполнения условия, что восстановленные по границам этих корней положительные пары полиномов Φ_{G_i}, Φ_{H_j} ($i, j = 1, 2$), сопровождающие приведенные многочлены Эрмита-Билера $\Phi_G(l), \Phi_H(l)$, составляли пары Лобачевского, удовлетворяющие неравенствам (8);
- 5) выбор верхней и нижней границ коэффициента a_1 в соответствии с условиями, следующими из (7):

при нечетном n

$$\begin{aligned} \underline{a_1} < \min \left[a_1, \frac{a_5}{\beta_2^G}, \frac{a_9}{\beta_4^G}, \frac{a_{13}}{\beta_6^G}, \dots \right], \quad \underline{a_1} > \max \left[\frac{a_3}{\beta_1^G}, \frac{a_7}{\beta_3^G}, \frac{a_{11}}{\beta_5^G}, \frac{a_{15}}{\beta_7^G}, \dots \right], \\ \overline{a_1} > \left[a_1, \frac{a_5}{\beta_2^G}, \frac{a_9}{\beta_4^G}, \frac{a_{13}}{\beta_6^G}, \dots \right], \quad \overline{a_1} > \left[\frac{a_3}{\beta_1^G}, \frac{a_7}{\beta_3^G}, \frac{a_{11}}{\beta_5^G}, \frac{a_{15}}{\beta_7^G}, \dots \right]; \end{aligned} \tag{10}$$

при четном n

$$\begin{aligned} \underline{a_1} < \min \left[a_1, \frac{a_5}{\beta_2^H}, \frac{a_9}{\beta_4^H}, \frac{a_{13}}{\beta_6^H}, \dots \right], \quad \underline{a_1} > \max \left[\frac{a_3}{\beta_1^H}, \frac{a_7}{\beta_3^H}, \frac{a_{11}}{\beta_5^H}, \frac{a_{15}}{\beta_7^H}, \dots \right], \\ \overline{a_1} > \left[a_1, \frac{a_5}{\beta_2^H}, \frac{a_9}{\beta_4^H}, \frac{a_{13}}{\beta_6^H}, \dots \right], \quad \overline{a_1} > \left[\frac{a_3}{\beta_1^H}, \frac{a_7}{\beta_3^H}, \frac{a_{11}}{\beta_5^H}, \frac{a_{15}}{\beta_7^H}, \dots \right]; \end{aligned}$$

б) формирование интервального полинома (2), соответствующего выражениям (7).

Рассмотрим подробнее выполнение п. 4, исходя из условия, что восстановленные по непересекающимся интервалам возможных вариаций корней многочленов Эрмита-Билера $\Phi_G(l)$, $\Phi_H(l)$ полиномы Φ_{G_j}, Φ_{H_j} ($j = 1, 2$) составляют пары Лобачевского.

В соответствии с формулами Виета связь коэффициентов a_i ($i = \overline{1, n}$) характеристического полинома $D(s)$ с его корнями λ_i ($i = \overline{1, n}$) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} a_1 &= -\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \dots - \lambda_{n-1} - \lambda_n = -\sum_{i=1}^n \lambda_i, \\ a_2 &= \lambda_1(\lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_{n-1} + \lambda_n) + \lambda_2(\lambda_3 + \dots + \lambda_{n-1} + \lambda_n) + \dots \\ &\quad \dots + \lambda_{n-2}(\lambda_{n-1} + \lambda_n) + \lambda_{n-1}\lambda_n = \sum_{\substack{i_1=1 \\ i_2=2 \\ i_1 < i_2}}^n \lambda_{i_1}\lambda_{i_2}, \\ a_3 &= -\lambda_1\lambda_2(\lambda_3 + \lambda_4 + \dots + \lambda_{n-1} + \lambda_n) - \lambda_1\lambda_3(\lambda_4 + \lambda_5 + \dots + \lambda_{n-1} + \lambda_n) - \dots \\ &\quad \dots - \lambda_1\lambda_{n-1}\lambda_n - \lambda_2\lambda_3(\lambda_4 + \lambda_5 + \dots + \lambda_{n-1} + \lambda_n) - \dots \\ &\quad \dots - \lambda_2\lambda_{n-1}\lambda_n - \dots - \lambda_{n-2}\lambda_{n-1}\lambda_n = \sum_{\substack{i_1=1 \\ i_2=2 \\ i_3=3 \\ i_1 < i_2 < i_3}}^n \lambda_{i_1}\lambda_{i_2}\lambda_{i_3}, \\ &\quad \dots \\ a_{n-1} &= (-1)^{n-1} [\lambda_1\lambda_2 \dots \lambda_{n-3}\lambda_{n-2}(\lambda_{n-1} + \lambda_n) + \\ &\quad + \lambda_1\lambda_2 \dots \lambda_{n-3}\lambda_{n-1}\lambda_n + \dots + \lambda_2\lambda_3 \dots \lambda_{n-1}\lambda_n] = \\ &= (-1)^{n-1} \sum_{\substack{i_1=1 \\ i_2=2 \\ \dots \\ i_{n-1}=n-1 \\ i_1 < i_2 < \dots < i_{n-1}}}^n \lambda_{i_1} \dots \lambda_{i_{n-1}}, \\ a_n &= (-1)^n \lambda_1 \dots \lambda_n. \end{aligned}$$

Введем обозначения $\mathbf{a} = \text{col}[a_1, \dots, a_n]$, $\mathbf{\Lambda} = \text{col}[\lambda_1, \dots, \lambda_n]$ и запишем приведенные выше формулы в векторно-матричной форме в двух вариантах:

1) левая верхне-треугольная форма:

$$\mathbf{a} = W_1(\lambda_2, \dots, \lambda_n)x,$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \dots & w_{2,n-1} & 0 \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n-1,1} & w_{n-1,2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ w_{n,1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$w_{ij} = (-1)^i \sum_{\substack{i_1=2 \\ \dots \\ i_{i-1}=i \\ i_1 < \dots < i_{i-1}}}^n \lambda_{i_1} \dots \lambda_{i_{i-1}}, \quad i = \overline{2, n-1}; \quad j = \overline{1, n-1},$$

$$w_{n,1} = (-1)^n \lambda_2 \dots \lambda_n;$$

2) правая верхне-треугольная форма:

$$\mathbf{a} = W_2(\lambda_1, \dots, \lambda_{n-1})x,$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 \\ 0 & w'_{22} & w'_{23} & \dots & w'_{2,n-1} & w'_{2,n} \\ 0 & 0 & w'_{33} & \dots & w'_{3,n-1} & w'_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & w'_{n-1,n-1} & w'_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & w'_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$w'_{ij} = (-1)^i \sum_{\substack{i_1=1 \\ \dots \\ i_{i-1}=i-1 \\ i_1 < \dots < i_{i-1}}}^{n-1} \lambda_{i_1} \dots \lambda_{i_{i-1}}, \quad i = \overline{2, n-1}; \quad j = \overline{1, n-1},$$

$$w'_{n,1} = (-1)^n \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}.$$

Анализ выражений (11), (12) позволяет заключить, что матрица W_1 не зависит от корня λ_1 , матрица W_2 не зависит от корня λ_2 и обе матрицы являются невырожденными в случае отсутствия нулевых корней.

Исследуем особенности применения формул (11), (12) при оценке вариаций корней (1) с учетом неравенства (9). Определим пару Лобачевского, сопровождающую полином Φ_G для случая четной степени характеристического полинома $D(s)$ при условии соблюдения неравенств

$$\beta_i^G(\overline{\mu_m}, \overline{\mu_{m-1}}, \overline{\mu_{m-2}}, \overline{\mu_{m-3}}, \dots) < \beta_i^G < \beta_i^G(\underline{\mu_m}, \underline{\mu_{m-1}}, \underline{\mu_{m-2}}, \underline{\mu_{m-3}}, \dots) \quad (i = 1, 3, 5, \dots), \quad (13)$$

$$-\beta_j^G(\overline{\mu_m}, \overline{\mu_{m-1}}, \overline{\mu_{m-2}}, \overline{\mu_{m-3}}, \dots) < -\beta_j^G < -\beta_j^G(\underline{\mu_m}, \underline{\mu_{m-1}}, \underline{\mu_{m-2}}, \underline{\mu_{m-3}}, \dots) \quad (j = 2, 4, 6, \dots).$$

Введем обозначения

$$\mathbf{B}_G = \text{col}[\beta_1^G, -\beta_2^G, \beta_3^G, -\beta_4^G, \dots],$$

$$\overline{\mathbf{B}}_G = \text{col}[\overline{\beta_1^G}, -\overline{\beta_2^G}, \overline{\beta_3^G}, -\overline{\beta_4^G}, \dots],$$

$$\underline{\mathbf{B}}_G = \text{col}[\underline{\beta_1^G}, -\underline{\beta_2^G}, \underline{\beta_3^G}, -\underline{\beta_4^G}, \dots],$$

$$\mathbf{M} = \text{col}[\dots, \mu_{m-3}, \mu_{m-2}, \mu_{m-1}, \mu_m],$$

$$\overline{\mathbf{M}} = \text{col}[\dots, \overline{\mu_{m-3}}, \overline{\mu_{m-2}}, \overline{\mu_{m-1}}, \overline{\mu_m}],$$

$$\underline{\mathbf{M}} = \text{col}[\dots, \underline{\mu_{m-3}}, \underline{\mu_{m-2}}, \underline{\mu_{m-1}}, \underline{\mu_m}],$$

$$W_1^* = \begin{bmatrix} -1 & -1 & \dots & -1 & -1 \\ -w_{21} & -w_{21} & \dots & -w_{2,m-1} & 0 \\ w_{31} & w_{32} & \dots & 0 & 0 \\ -w_{41} & -w_{42} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

и перепишем неравенства (13) с учетом выражения (11) в векторно-матричной форме

$$\underline{B}_G = W_1^* \overline{M} < B_G = W_1^* M < \overline{B}_G = W_1^* \underline{M}. \quad (14)$$

Неравенство (14) позволяет при заданном интервале вариаций корней, удовлетворяющих неравенству (9), начиная со второго, найти границы возможных вариаций корня $\mu_1(\underline{\mu}_1, \overline{\mu}_1)$, при которых полиномы Φ_{G_1}, Φ_{G_2} образуют пару Лобачевского.

Следует отметить, что при флуктуации корней $\mu_j (j = \overline{2, m})$ необходимо учитывать тот факт, что границы возможных вариаций корней $\eta_i (j = \overline{1, l})$ должны быть такими, чтобы соответствующая этим корням пара полиномов Φ_{H_1}, Φ_{H_2} была бы парой Лобачевского.

В случае нечетной степени характеристического полинома $D(s)$ построение пары Лобачевского Φ_{G_1}, Φ_{G_2} производится согласно процедуре, рассмотренной выше. При определении пары Лобачевского, сопровождающей полином ϕ_H , должны быть удовлетворены неравенства

$$\begin{aligned} \beta_i^H(\overline{\eta}_k, \underline{\eta}_{k-1}, \overline{\eta}_{k-2}, \underline{\eta}_{k-3}, \dots) < \beta_i^H < \beta_i^H(\underline{\eta}_k, \overline{\eta}_{k-1}, \underline{\eta}_{k-2}, \overline{\eta}_{k-3}, \dots) \quad (i = 1, 3, 5, \dots), \\ -\beta_j^H(\underline{\eta}_k, \underline{\eta}_{k-1}, \underline{\eta}_{k-2}, \underline{\eta}_{k-3}, \dots) < -\beta_j^H < -\beta_j^H(\underline{\eta}_k, \overline{\eta}_{k-1}, \underline{\eta}_{k-2}, \overline{\eta}_{k-3}, \dots) \quad (j = 2, 4, 6, \dots). \end{aligned} \quad (15)$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} B_H &= \text{col}[\beta_1^H, -\beta_2^H, \beta_3^H, -\beta_4^H, \dots], \\ \overline{B}_H &= \text{col}[\overline{\beta}_1^H, -\overline{\beta}_2^H, \overline{\beta}_3^H, -\overline{\beta}_4^H, \dots], \\ \underline{B}_H &= \text{col}[\underline{\beta}_1^H, -\underline{\beta}_2^H, \underline{\beta}_3^H, -\underline{\beta}_4^H, \dots], \\ H &= \text{col}[\dots, \eta_{k-3}, \eta_{k-2}, \eta_{k-1}, \eta_k], \\ \overline{H} &= \text{col}[\dots, \underline{\eta}_{k-3}, \overline{\eta}_{k-2}, \underline{\eta}_{k-1}, \overline{\eta}_k], \\ \underline{H} &= \text{col}[\dots, \overline{\eta}_{k-3}, \underline{\eta}_{k-2}, \overline{\eta}_{k-1}, \underline{\eta}_k], \\ W_2^* &= \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ 0 & -w_{22} & -w_{23} & \dots & -w_{2,l} \\ 0 & 0 & w_{33} & \dots & w_{3,l} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -w_{4,l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

С учетом введенных обозначений неравенства (15) на основании выражения (11) в векторно-матричной форме можно записать как

$$\underline{B}_H = W_2^* \overline{H} < B_H = W_2^* H < \overline{B}_H = W_2^* \underline{H}. \quad (16)$$

Неравенство (16) позволяет при заданном интервале вариаций корней, удовлетворяющих неравенству (9), найти границы возможных вариаций корня $\eta_k(\underline{\eta}_k, \overline{\eta}_k)$, при которых полиномы Φ_{H_1}, Φ_{H_2} образуют пару Лобачевского.

Следует отметить, что при флуктуации корней $\eta_i (i = \overline{1, l-1})$ необходимо учитывать тот факт, что границы возможных вариаций корней $\mu_j (j = \overline{1, m})$ должны быть такими, чтобы соответствующая этим корням пара полиномов Φ_{G_1}, Φ_{G_2} была бы парой Лобачевского.

Результаты (Results)

В качестве объекта исследования рассмотрим позиционный следящий электропривод с двигателем постоянного тока типа 4ПБ112М2Г [15, 17] и главной отрицательной обратной связью по углу с ПИ-регулятором углового перемещения.

К параметрам динамической модели электропривода относятся следующие величины: $k_{\text{рп}} = 2$ – коэффициент передачи регулятора углового перемещения; $T_{\text{рп}} = 20$ с – постоянная времени регулятора углового перемещения; $k_{\text{п}} = 10$ – коэффициент передачи

управляемого преобразователя; $T_{\Pi} = 0,002$ с – постоянная времени управляемого преобразователя; $T_{\Sigma} = 0,0075$ с – электромагнитная постоянная времени якорной цепи; $T_M = 0,05$ с – электромеханическая постоянная времени; $k_{дв} = 1,5083$ В·с/рад – коэффициент передачи двигателя; $k_p = 0,1$ – коэффициент передачи редуктора; $k_{дп} = 6$ В/рад – коэффициент передачи датчика углового перемещения.

С учетом приведенных величин характеристический полином вида (1) для замкнутой системы запишется как

$$D(s) = s^5 + \frac{T_{\Sigma}T_M T_{рп} + T_M T_{\Pi} T_{рп}}{T_{\Sigma}T_M T_{\Pi} T_{рп}} s^4 + \frac{T_M T_{рп} + T_{\Pi} T_{рп}}{T_{\Sigma}T_M T_{\Pi} T_{рп}} s^3 + \frac{1}{T_{\Sigma}T_M T_{\Pi}} s^2 + \frac{k_{рп}k_{п}k_{дв}k_{р}k_{дп}}{T_{\Sigma}T_M T_{\Pi}} s + \frac{k_{п}k_{дв}k_{р}k_{дп}}{T_{\Sigma}T_M T_{\Pi} T_{рп}}. \quad (17)$$

Решим задачу определения интервального полинома вида (2), сопровождающего характеристический полином (17), с верхней \bar{a}_i и нижней \underline{a}_i границами коэффициентов

Подставляя в (17) числовые значения, получим

$$D(s) = s^5 + 633,3333s^4 + 69333,3333s^3 + 1,3333 \cdot 10^6 s^2 + 2,41328 \cdot 10^7 s + 603320. \quad (18)$$

Представим характеристический полином (18) в виде полиномов Эрмита-Билера

$$D(s) = G(s) + sH(s),$$

$$G(s) = 633,3333s^4 + 1,3333 \cdot 10^6 s^2 + 603320 = a_1 \varphi_G(l) = l^2 + 69333,3333l + 38100 = 633,3333(l + 0,4526)(l + 2104,5473);$$

$$H(s) = s^4 + 69333,3333s^2 + 38100 = \varphi_H(l) = l^2 + 69333,3333l + 38100 = (l + 0,5495)(l + 69332,7838).$$

Из полученных результатов видно, что исходный характеристический полином соответствует критерию Рауса-Гурвица, поскольку сопровождающие его полиномы Эрмита-Билера составляют положительную пару:

$$0 > [\mu_1 = -0,4526] > [\eta_1 = -0,5495] > [\mu_2 = -2104,5473] > [\eta_2 = -69332,7838].$$

Запишем сопровождающую полином φ_G пару Лобачевского

$$\Phi_{G_1}(l) = (l - \underline{\mu}_2)(l - \bar{\mu}_1) = l^2 + \bar{\beta}_1^G l + \underline{\beta}_2^G, \\ \Phi_{G_2}(l) = (l - \bar{\mu}_2)(l - \underline{\mu}_1) = l^2 + \underline{\beta}_1^G l + \bar{\beta}_2^G,$$

где $0 > \bar{\mu}_1 > -0,4526 > \underline{\mu}_1 > -0,5495 > \bar{\mu}_2 > -2104,5473 > \underline{\mu}_2 > -69332,7838$.

Примем $\underline{\mu}_2 = -60000$, $\bar{\mu}_2 = -2000$ и сформируем неравенство (14)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{\beta}_1^G \\ -\underline{\beta}_2^G \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -w_{21}(\underline{\mu}_2) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mu}_1 \\ \bar{\mu}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 2000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mu}_1 \\ -2000 \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} \bar{\beta}_1^G \\ -\underline{\beta}_2^G \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -w_{21}(\underline{\mu}_2) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mu}_1 \\ \bar{\mu}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 2104,5473 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,4526 \\ -2104,5473 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2105 \\ -952,5181 \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} \bar{\beta}_1^G \\ -\underline{\beta}_2^G \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -w_{21}(\underline{\mu}_2) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mu}_1 \\ \bar{\mu}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 60000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mu}_1 \\ -60000 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

из которого следует, что

$$-\underline{\mu}_1 + 2000 < 2105 < -\bar{\mu}_1 + 60000; \\ 2000\underline{\mu}_1 < -952,5181 < 60000\bar{\mu}_1,$$

или, что то же самое,

$$57895 > \bar{\mu}_1 > \frac{-952,5181}{60000} = -0,0159; \\ -105 < \underline{\mu}_1 < \frac{-952,5181}{2000} = -0,4763.$$

Полученные неравенства позволяют принять верхнюю и нижнюю границы $\underline{\mu}_1 = -0,015; \underline{\mu}_1 = -100$ и определить искомые коэффициенты пары Лобачевского:

$$\begin{bmatrix} \underline{\beta}_1^G \\ -\underline{\beta}_2^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 2000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -100 \\ -2000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2100 \\ -200000 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \overline{\beta}_1^G \\ -\overline{\beta}_2^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -60000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,015 \\ -60000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 60000,015 \\ -900 \end{bmatrix},$$

т.е. $\overline{\beta}_1^G = 60000,015; \underline{\beta}_1^G = 2100; \overline{\beta}_2^G = 200000; \underline{\beta}_2^G = 900$.

Поскольку рассматриваемый характеристический полином (18) имеет нечетную степень, для определения пар Лобачевского Φ_{H_1}, Φ_{H_2} воспользуемся соотношением (16). Значения флуктуаций корней полинома φ_H примем близкими к соответствующим значениям корней μ_i с точностью до 0,001 согласно интервалу «неулучшаемости» интервального полинома: $\overline{\eta}_1 = -100,001; \underline{\eta}_1 = 2099,999; \overline{\eta}_2 = -60000,001$. Тогда для рассматриваемого случая неравенство (16) запишется как

$$\begin{bmatrix} \underline{\beta}_1^H \\ -\underline{\beta}_2^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -w'_{22}(\underline{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\eta}_1 \\ \underline{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 60000,001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2099,999 \\ \underline{\eta}_2 \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} \beta_1^H \\ -\beta_2^H \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -w_{22}(\overline{\eta}_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\eta}_1 \\ \overline{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 0,5495 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,5495 \\ -69332,7838 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 69333,3333 \\ -38098,3647 \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} \overline{\beta}_1^H \\ -\overline{\beta}_2^H \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -w_{22}(\overline{\eta}_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\eta}_1 \\ \overline{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 100,001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -100,001 \\ \overline{\eta}_2 \end{bmatrix}.$$

Из полученного соотношения следует, что

$$2099,999 - \underline{\eta}_2 < 69333,3333 < 100,001 - \underline{\eta}_2;$$

$$2099,999 \overline{\eta}_2 < -38098,3647 < 100,001 \overline{\eta}_2,$$

или, что то же самое,

$$-67233,3343 < \underline{\eta}_2 < \frac{-38098,3647}{2099,999} = -18,1421$$

$$69233,3323 > \overline{\eta}_2 > \frac{-38098,3647}{100,001} = -380,9836.$$

Полученные неравенства позволяют принять верхнюю и нижнюю границы $\overline{\eta}_2 = -18; \underline{\eta}_2 = -300$ и определить искомые коэффициенты пары Лобачевского:

$$\begin{bmatrix} \underline{\beta}_1^H \\ -\underline{\beta}_2^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 60000,001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2099,999 \\ -18 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2117,999 \\ -1080000,018 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \overline{\beta}_1^H \\ -\overline{\beta}_2^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 100,001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -100,001 \\ -300 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 400,001 \\ -30000,3 \end{bmatrix},$$

т.е. $\overline{\beta}_1^H = 400,001; \underline{\beta}_1^H = 2117,999; \overline{\beta}_2^H = 1080000,018; \underline{\beta}_2^H = 30000,3$.

Далее в соответствии с (10) для нечетного n определим границы коэффициента a_1 :

$$\underline{a_1} < \min \left[a_1, \frac{a_5}{\beta_2^G} \right] = \left[633,3333, \frac{603320}{900} = 670,3555 \right] = 633,3333,$$

$$\underline{a_1} > \frac{a_3}{\beta_1^G} = \frac{1333300}{60000,015} = 22,2217,$$

$$\overline{a_1} > \max \left[a_1, \frac{a_5}{\beta_2^G} \right] = \left[633,3333, \frac{603320}{200000} = 3,0166 \right] = 633,3333,$$

$$\overline{a_1} < \frac{a_3}{\beta_1^G} = \frac{1333300}{2100} = 634,9048.$$

Принимаем $\underline{a_1} = 22,23$; $\overline{a_1} = 634$. Окончательно искомым интервальный полином запишется как

$$D_{int}(s) = s^5 + [22,23; 634]s^4 + [8892,0222; 253600,634]s^3 + [46683; 38040009,51]s^2 + [666906,669; 684720011,412]s + [180063; 44446000]. \quad (19)$$

Обсуждение (Discussions)

Проведем моделирование исследуемого позиционного электропривода по уравнению (18) с учетом полученного интервального полинома (19) по верхней и нижней границам диапазона вариаций параметров с получением временных и частотных зависимостей. Соответствующие графики переходных и логарифмических частотных характеристик, полученные автором в результате моделирования в программной среде MatLab с помощью приведенного ниже скрипта (рис. 1), представлены на рисунках 2 и 3.

```
Command Window
>> num1=[2.41328e7 603320.0];
den1=[1 633.333333333333333333333333333333 69333.3333333333333333333333333333 1.333333333333333333333333333333e6 2.41328e7 603320];
Qnom=tf(num1, den1); % номинальная модель
num2=[666906.669 180063];
den2=[1 22.23 8892.0222 46683 666906.669 180063];
Qlow=tf(num2, den2); % интервальный полином с нижней границей параметров
num3=[684720011.412 44446000];
den3=[1 634 253600.634 38040009.51 684720011.412 44446000];
Qup=tf(num3, den3); % интервальный полином с верхней границей параметров
```

Рис. 1. Скрипт для задания параметров моделей позиционного электропривода

Fig. 1. Script for setting parameters of positional electric drive models

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

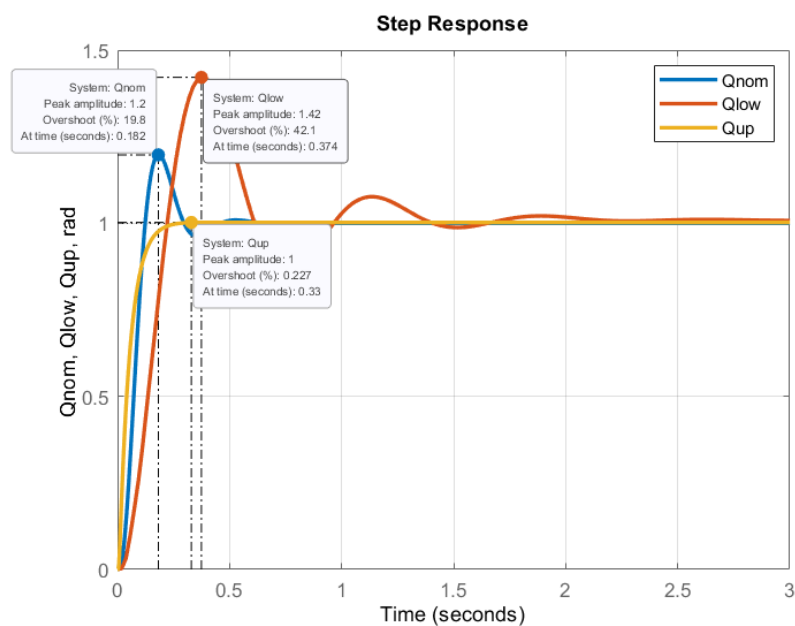


Рис. 2. Переходные характеристики позиционного электропривода

Fig. 2. Step response of a positional electric drive

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

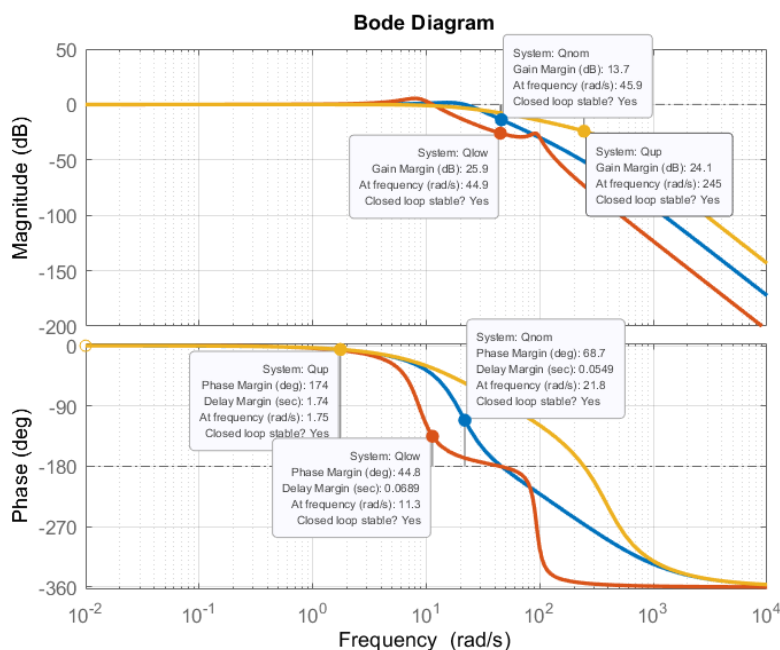


Рис. 3. Логарифмические частотные характеристики позиционного электропривода

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

Из анализа характеристик, показанных на рисунке 2 видно, что переходный процесс выходной регулируемой координаты, угла перемещения исполнительного вала электропривода $\theta_{nom}(t)$, при номинальных значениях параметров характеризуется перерегулированием 19,8%, временем нарастания 0,08 с и временем установления 0,414 с. На графиках угол перемещения $\theta(t)$ обозначен буквой Q , поскольку в среде *MatLab* греческие буквы представляют недопустимые текстовые символы, а индексы *up* и *low* означают соответственно верхнюю и нижнюю границы интервального полинома.

На переходной характеристике электропривода с параметрами, соответствующими нижней границе значений $\theta_{low}(t)$ перерегулирование возрастает до 42,1%, время нарастания – до 0,146 с, а время установления составляет 1,94 с, т.е. колебательность увеличилась в 2 раза, а длительность переходного процесса – более, чем в 4 раза, что свидетельствует об ухудшении показателей качества.

Переходный процесс $\theta_{up}(t)$, соответствующий верхней границе значений параметров электропривода, можно считать аperiodическим с перерегулированием, близким к нулю и существенно меньшим временем установления, около 0,19 с; при этом время нарастания, равное 0,105 с, незначительно отличается от соответствующего показателя при номинальных значениях параметров.

Логарифмические частотные характеристики, показанные на рисунке 3, позволяют оценить запасы устойчивости по фазе $\varphi_3(\omega)$ и амплитуде $L_3(\omega)$. Так, запасы по фазе $\varphi_3^{nom}(\omega) = 68,7$ град; $\varphi_3^{low}(\omega) = 44,8$ град; $\varphi_3^{up}(\omega) = 174$ град, запасы по амплитуде $L_3^{nom}(\omega) = 13,7$ дБ; $L_3^{low}(\omega) = 25,9$ дБ; $L_3^{up}(\omega) = 24,1$ дБ. К характерным особенностям полученных графиков можно отнести наличие двух резонансных пиков на амплитудно-частотной характеристике $L_{up}(\omega)$, что свидетельствует о наличии в составе соответствующего интервального полинома двух колебательных звеньев. Запасы устойчивости по фазе имеют четкую корреляцию с перерегулированием (рис. 1) и меньшее значение $\varphi_3(\omega)$ соответствует большему перерегулированию. Запасы устойчивости по амплитуде распределились иначе, и минимальное значение соответствует электроприводу с номинальными параметрами, а максимальное – электроприводу с процессом $\theta_{low}(t)$. Данный показатель не является определяющим, однако изменение общего коэффициента усиления может привести к неустойчивым решениям.

На рисунке 4 представлены полученные автором графики дополнительного движения (невязки $\varepsilon(t)$) выходной координаты $\theta(t)$ при вариациях параметров. Соответствующие зависимости определяются разностью $\varepsilon(t) = \theta_{nom}(t) - \theta_{var}(t)$, где $\theta_{var}(t)$ – выходная координата при граничных значениях параметров.

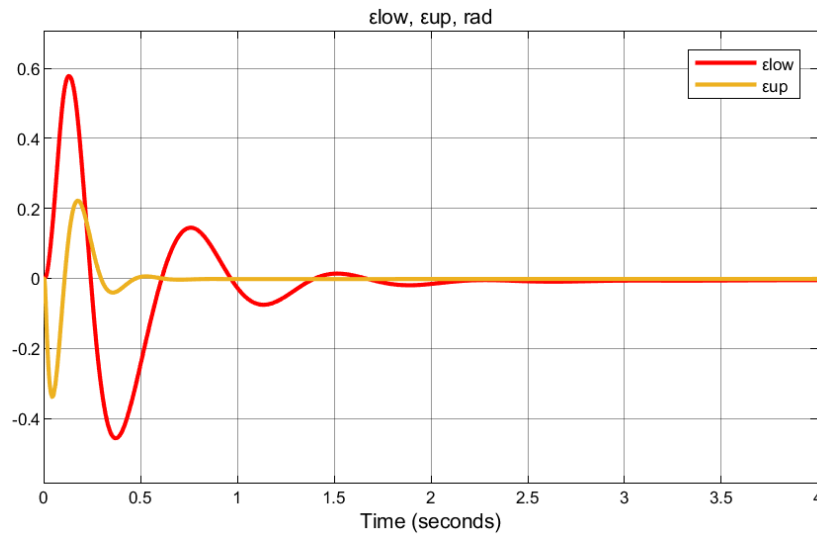


Рис. 4. Графики дополнительного движения (невязки) позиционного электропривода *Fig. 4. Graphs of additional movement (discrepancy) of a positional electric drive*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Графики невязки характеризуют отличия временных зависимостей выходных координат $\theta_{var}(t)$ от эталонного процесса как в динамике, так и в статике. Из анализа рисунка 4 следует, что в установившемся режиме погрешность от вариаций параметров пренебрежимо мала, поскольку по истечении 2 с процессы $\varepsilon(t)$ устанавливаются около нуля. Оценку динамических погрешностей целесообразно осуществить путем вычисления

интеграла от квадрата невязки $\delta(t) = \int_0^t \varepsilon^2(t) dt$. Полученные автором графики представлены

на рисунке 5.

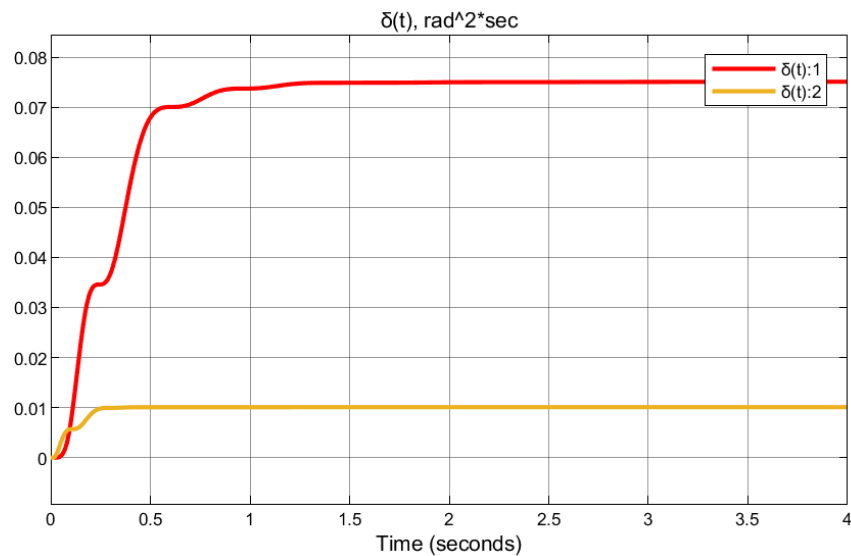


Рис. 5. Графики квадрата невязки позиционного электропривода *Fig. 5. Graphs of the squared discrepancy of a positional electric drive*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Из представленных графиков видно, что погрешность $\delta_{low}(t) = 0,075 \text{ рад}^2 \cdot c(\delta(t):1$ на рисунке 5) значительно больше погрешности $\delta_{up}(t) = 0,01 \text{ рад}^2 \cdot c(\delta(t):2$ на рисунке 5), что является количественным выражением отличий соответствующей переходной характеристики от графика эталонного переходного процесса.

Проведенные расчеты с получением интервального полинома (19) и последующее моделирование исследуемой системы позволяют сделать вывод о том, что в заданном диапазоне вариаций параметров система с последовательным корректирующим устройством является робастно устойчивой.

Кроме того, интерес представляет определение такого сочетания параметров объекта исследования, при котором система окажется на границе устойчивости. Как правило, определяющее влияние на динамическое поведение системы и, в частности, на ее устойчивость оказывают коэффициенты усиления соответствующих элементов, которые могут быть представлены граничным значением общего коэффициента передачи. С учетом известных номинальных значений коэффициентов a_i характеристического полинома (17) исследуемого объекта при условии их положительности система будет устойчивой при выполнении неравенства

$$(a_1 a_2 - a_0 a_3)(a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0. \quad (20)$$

Общий коэффициент передачи K позиционного электропривода представляет собой произведение соответствующих коэффициентов неизменяемой части системы:

$$K = k_{\Pi} k_{дв} k_{р} k_{дп}.$$

Перепишем неравенство (20) с учетом коэффициентов (17) относительно K , приравняем его к нулю и после некоторых преобразований получим уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{(T_3 T_{рп} k_{рп} - T_3 T_{\Pi} + T_{\Pi} T_{рп} k_{рп})^2}{T_3^4 T_M^2 T_{\Pi}^4 T_{рп}^2} K^2 - \frac{(T_M + T_{\Pi})(T_{\Pi}^2 + T_M T_{\Pi} + T_3 T_M)}{T_3^4 T_M^3 T_{\Pi}^4 T_{рп}} K + \\ & + \frac{(T_M + T_{\Pi})(T_{\Pi}^2 + T_M T_{\Pi} + T_3 T_M)}{T_3^4 T_M^3 T_{\Pi}^4} = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Корни уравнения (21) вещественные и равны $K_1 = 1,1408$; $K_2 = -1,2098$. Поскольку коэффициенты передачи не могут быть отрицательными, искомое решение соответствует корню K_1 . Результаты данного решения коррелируют с полученными выше частотными и временными зависимостями, из которых видно, что ухудшение прямых показателей качества переходных процессов и снижение запасов устойчивости наблюдается при уменьшении коэффициентов характеристического уравнения (17) и, в том числе, общего коэффициента передачи системы. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что математическая модель исследуемой системы допускает в теории неограниченное повышение общего коэффициента передачи, что говорит о высокой степени робастности и возможности получения хороших точностных показателей позиционного электропривода.

Детальный анализ влияния полюсов уравнения (17) на динамические процессы объекта исследования при бесконечных пределах изменения общего коэффициента передачи позволяет получить метод корневого годографа. Поскольку исследуемая система относится к классу SISO-систем (один вход – один выход) для применения метода корневого годографа целесообразно использовать оператор *rlocus* программной среды *MatLab*. Запишем скрипт с использованием указанного оператора (рис. 6) и проведем соответствующий анализ.

```
Command Window
>> sys=tf([2.41328e7 603320.0],[1 633.33333333333333333333333333333333 69333.3333333333333333 1.33333333333333333333333333333333e6 2.41328e7 603320]);
>> [r,k] = rlocus(sys)
```

Рис. 6. Скрипт для построения корневого годографа Fig. 6. Script for plotting a root hodograph

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

На рисунке 6 r представляет собой массив полюсов размерностью 5×56 при $K = 0, \infty$, а, собственно, k – это общий коэффициент передачи, представленный вектором из 56 значений в указанном диапазоне изменения. Результаты моделирования в силу чрезмерно большого объема информации в работе не приводятся.

Оператор *rlocus* позволяет также получить графическое представление корневого годографа на комплексной *s*-плоскости нулей и полюсов исследуемой замкнутой системы. Соответствующие зависимости, полученные автором, представлены на рисунке 7.

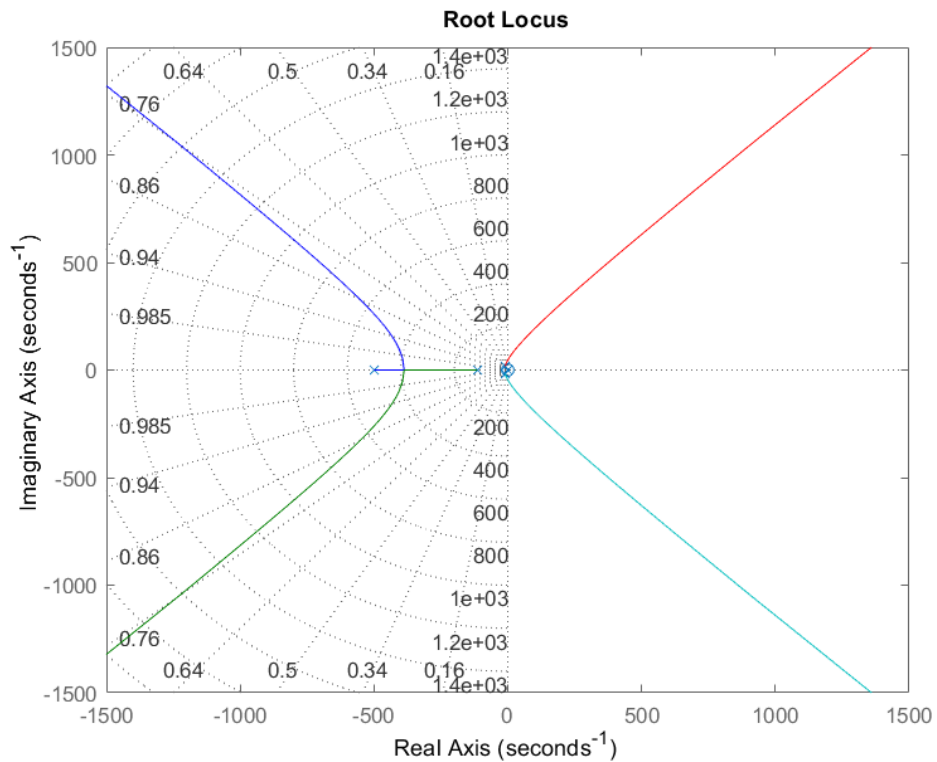


Рис. 7. Корневой годограф позиционного электропривода

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

Годограф начинается в точках, соответствующих нулевому значению общего коэффициента передачи со следующими значениями полюсов, показанных на рисунке 7 крестиками (рис. 8).

$$\begin{aligned}
 & -4.997400708294452e+02 + 0.000000000000000e+00i \\
 & -1.148659536274685e+02 + 0.000000000000000e+00i \\
 & -9.351137147369521e+00 + 1.823142081064976e+01i \\
 & -9.351137147369521e+00 - 1.823142081064976e+01i \\
 & -2.503458168081735e-02 + 0.000000000000000e+00i
 \end{aligned}$$

Рис. 8. Точки, соответствующие нулевому значению общего коэффициента передачи

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

Два первых корня $s_1 = -499,74$; $s_2 = -114,866$ вещественные и по мере увеличения K трансформируются в пару комплексно-сопряженных корней с удаляющимися от границы устойчивости в отрицательную область действительными и мнимыми частями. Пятый полюс $s_5 = -0,025$ также является вещественным и при $K \rightarrow \infty$ стремится к соответствующему нулю $s_0 = -0,025$, обозначенному на рисунке 5 кружком. Третий и четвертый корни представлены комплексно-сопряженной парой $s_{3,4} = -9,3511 \pm j18,2314$ и при увеличении K траектория указанных корней стремится в правую полуплоскость, что соответствует неустойчивому состоянию системы. Граница устойчивости отвечает частоте $\omega_\pi = 45,9$ рад/с (синие графики на рисунке 2) и общему коэффициенту передачи $K = 4,87$. Отличие от граничного значения коэффициента передачи, вычисленного с помощью выражения (21) вызвано в данном случае учетом параметров ПИ-регулятора углового перемещения, которые при использовании критерия Рауса-Гурвица вошли в (21) в качестве постоянных коэффициентов.

Таким образом, проведенный анализ позиционного электропривода с двигателем

постоянного тока и последовательным корректирующим устройством в виде ПИ-регулятора углового перемещения позволил на основе применения аппарата полиномов Эрмита-Билера выявить допустимый диапазон вариаций параметров, обеспечивающий робастную устойчивость функционирования исследуемого объекта. Также были определены граничные значения общего коэффициента передачи электропривода с учетом и без учета корректирующего устройства.

Заключение (Conclusions)

В работе сформулированы основные теоретические положения методики определения интервального полинома $D_{\text{int}}(s)$, сопровождающего характеристический полином $D(s)$ устойчивой замкнутой системы с применением математического аппарата полиномов Эрмита-Билера в форме последовательного алгоритма с возможностью автоматизации выполнения указанных в данном алгоритме вычислительных процедур. Приведены два альтернативных способа записи формул Виета, характеризующих связь коэффициентов a_i ($i = \overline{1, n}$) характеристического полинома $D(s)$ с его корнями λ_i ($i = \overline{1, n}$) в левой и правой верхне-треугольных формах. Рассмотрена процедура формирования вариаций корней для случая четной и нечетной степеней характеристического многочлена, позволяющая записать в компактной векторно-матричной форме неравенства, характеризующие границы возможных вариаций корней, при которых соответствующая этим корням пара полиномов удовлетворяет условию получения положительных пар Лобачевского.

Рассмотренная методика применена для анализа локальной робастности позиционного электропривода с двигателем постоянного тока, последовательным корректирующим устройством (ПИ-регулятором) и главной отрицательной обратной связью по угловому перемещению. Получен интервальный полином $D_{\text{int}}(s)$ и определены верхняя и нижняя границы вариаций параметров, принадлежащих области прямоугольного гиперпараллелепипеда в пространстве нестабильных параметров при сохранении асимптотической устойчивости системы. Подтверждено путем компьютерного моделирования, что анализируемая система робастно устойчива в заданном диапазоне вариаций параметров, причем переходный процесс $\theta_{\text{уп}}(t)$ при заданных параметрических изменениях имеет монотонный характер. Данное обстоятельство целесообразно использовать при синтезе малоколебательных систем управления электроприводов. Тем не менее, на основании полученных результатов можно утверждать, что последовательная коррекция и, в том числе, находящие широкое применение при проектировании электроприводов системы подчиненного регулирования, не обеспечивают системе управления, функционирующей в условиях параметрической неопределенности, поддержания эталонного качества переходных характеристик и запасов устойчивости

Таким образом, в работе сформулирована методика анализа локальной робастности замкнутых систем управления электроприводов, на основании которой имеется возможность проведения исследований различных алгоритмов формирования управляющих воздействий с применением как традиционных, так и адаптивных методов синтеза с целью выявления таких способов коррекции, которые обеспечивают исследуемой системе малую чувствительность к параметрическим возмущениям.

Литература

1. Фокин А.Л. Синтез робастных систем управления технологическими процессами с типовыми регуляторами. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. – 2014. – № 27 (53). – С. 101–106.
2. Oishi, M., Mitchell, I., Tomlin, C. & Saint-Pierre, P. Computing viable sets and reachable sets to design feedback linearizing control laws under saturation. In *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. San Diego, CA. 2006; pp. 3801–3807.
3. Воронин А.И., Тютиков В.В. Методика синтеза регуляторов для независимого формирования статических и динамических показателей нелинейных объектов. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2015. – № 3 (164). – С. 154–164.
4. Greg Anderson, Shankara Pailoor, Isil Dillig and Swarat Chaudhuri. Optimization and abstraction: a synergistic approach for analyzing neural network robustness. In *Proceedings of the 40th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*, pp. 731–744, 2019.
5. Куликов В.Е. Решение обратной задачи модального управления при синтезе регулятора минимальной размерности для режима стабилизации вертикальной скорости полета самолета. *Навигация и управление летательными аппаратами*. – 2022. – № 38. – С. 39–59.

6. Zhou, X., Wang, Z., Shen, H., et al. Robust Adaptive Path Tracking Control of Autonomous Ground Vehicles with Considerations of Steering System Backlash. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 315–325.
7. Balavoine A., Rozell C.J., Romberg J. Discrete and Continuous-time Soft-Thresholding with Dynamic Inputs. In: arXiv preprint arXiv:1405.1361. 2014.
8. Bernstein A., Dall’Anese E., Simonetto A. Online primal-dual methods with measurement feedback for time-varying convex optimization. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 67.8; 2019, pp. 1978–1991.
9. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Бобко Е.Ю., Тимошенко А.А. Построение интервальных наблюдателей для нестационарных систем. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2024;25(10):513-519.
10. Ushakov V.N., Ershov A.A., Ushakov A.V. An Approach Problem with an Unknown Parameter and Inaccurately Measured Motion of the System. *IFAC-Papers-OnLine*. 2018. Vol. 51, № 32. P. 234–238.
11. Новикова А.О. Построение множеств достижимости двумерных нелинейных управляемых систем пиксельным методом. *Труды «Прикладная математика и информатика»*. 2015. Т. 50. С. 62–82.
12. Ushakov V.N., Ershov A.A., Ershova A.A., Alekseev A.V. Linear Interpolation of Program Control with Respect to a Multidimensional Parameter in the Convergence Problem // *Mathematical Optimization Theory and Operations Research: Recent Trends. MOTOR 2023. Communications in Computer and Information Science*. 2023. Vol. 1881. P. 324-337.
13. Khan A., Xie W, Zhang L., Liu L. Design and applications of interval observers for uncertain dynamical systems // *IET Circuits Devices Syst*. 2020. Vol. 14. P. 721-740.
14. Liu L., Xie W. Khan A., Zhang L. Finite-time functional interval observer for linear systems with uncertainties // *IET Control Theory and Applications*. 2020. Vol. 14. P. 2868-2878.
15. N. Malev, "Analysis of the Servo Drive Dynamics with Allowance for Uncertainties by Methods of the Robust Control Theory," 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 423-429.
16. Wu, X., Xu, K., Lei, M., He, X., “Disturbance-Compensation-Based Continuous Sliding Mode Control for Overhead Cranes with Disturbances”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17:4 (2020), 2182–2189.
17. Малёв Н.А. Исследование цифровых моделей чувствительности следящего электропривода. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2024. – Т. 16, № 1(61). – С. 52-69.
18. Duman-Mammadov A., Dincel E., Söylemez M.T. Design of decentralized proportional–integral proportional–retarded controllers in discrete-time domain for two-input two-output processes. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2023;45(3):427-439.
19. Derksen H., Makam V. Invariant Theory and wheeled PROPs. *Journal of Pure and Applied Algebra*. 2023; 227(9):107302.
20. Sun N., Fang Y., Wu Y., and Chen H., “Adaptive Positioning and Swing Suppression Control of Underactuated Cranes Exhibiting Double-Pendulum Dynamics: Theory and Experimentation”, *Proceedings of 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (Wuhan, China, 2016)*, 87–92.
21. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Малацион А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(1):126-140.
22. Срочко В. А., Аргучинцев А. В. Параметрическая регуляризация функционала в линейно-квадратичной задаче оптимального управления // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика*. 2024. Т. 49. С. 32–44.
23. Дмитрук Н. М. Многократно замыкаемая стратегия управления в линейной терминальной задаче оптимального гарантированного управления // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2022. Т. 28, № 3. С. 66–82.
24. Xu L., Ding F. The parameter estimation algorithms for dynamical response signals based on the multiinnovation theory and the hierarchical principle. *IET Signal Processing*. 2017; 11(2):228-237.
25. Dincel E., Mutlu İ., Schrödel F. et al. Further Results on Dominant Pole Placement via Stability Mapping Approach. *IFAC-PapersOnLine*, 2018; 51(4):918-923.
26. Bhojanapalli S., Neyshabur B., Srebro N. “Global optimality of local search for low rank matrix recovery”. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2016, pp. 3873–3881.
27. Chandak Y. et al. “Optimizing for the future in non-stationary MDPs” In: *International Conference on Machine Learning. PMLR*. 2020, pp. 1414–1425.
28. Бадонова С.А. О пространстве де Бранжа, связанном с дзета-функцией Римана // *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*. 2024. Т. 30, № 2. С. 7–11.

29. Kemper G. Computing quotients by connected solvable groups. *Journal of Symbolic Computation*. 2022;109:426-440.
30. Berthomieu, C. Eder, & M. Safey El Din. msolve: A library for solving polynomial systems. In Proceedings of the 2021 on International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, pages 51-58, 2021.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2224-0681>. maleev@mail.ru

References

1. Fokin A.L. The Synthesis of Robust Control Systems of Technological Processes with Standard Regulators. *Bulletin of St PbSIT(TU)*. – 2014. – № 27 (53). – P. 101–106 (in Russ.).
2. Oishi, M., Mitchell, I., Tomlin, C. & Saint-Pierre, P. Computing viable sets and reachable sets to design feedback linearizing control laws under saturation. In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA. 2006; pp. 3801–3807.
3. Voronin A.I., Tyutikov V.V. Procedure for the Synthesis of Controllers for Independent Formation of Static and Dynamic Parameters of Nonlinear Objects. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* – 2015. – № 3 (164). – P. 154–164 (in Russ.).
4. Greg Anderson, Shankara Pailoor, Isil Dillig and Swarat Chaudhuri. Optimization and abstraction: a synergistic approach for analyzing neural network robustness. In Proceedings of the 40th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, pp. 731–744, 2019.
5. Kulikov, V.E. Inverse Problem of Modal Control Solution Using Reduced-Dimension Controller Synthesis for Aircraft Vertical Speed Hold. *Navigation and control of aircraft*. – 2022. – № 38. – P. 39–59 (in Russ.).
6. Zhou, X., Wang, Z., Shen, H., et al. Robust Adaptive Path Tracking Control of Autonomous Ground Vehicles with Considerations of Steering System Backlash. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 315–325.
7. Balavoine A., Rozell C.J., Romberg J. Discrete and Continuous-time Soft-Thresholding with Dynamic Inputs. In: arXiv preprint arXiv:1405.1361. 2014.
8. Bernstein A., Dall’Anese E., Simonetto A. Online primal-dual methods with measurement feedback for time-varying convex optimization. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 67.8; 2019, pp. 1978–1991.
9. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Bobko E.Yu., Timoshenko A.A. Interval Observers Design for Non-Stationary Systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2024;25(10):513-519. (In Russ.)
10. Ushakov V.N., Ershov A.A., Ushakov A.V. An Approach Problem with an Unknown Parameter and Inaccurately Measured Motion of the System. *IFAC-Papers-OnLine*. 2018. Vol. 51, № 32. P. 234–238.
11. Novikova A.O. Construction of reachability sets of two-dimensional nonlinear control systems using the pixel method. *Proceedings "Applied Mathematics and Computer Science"*. 2015. Vol. 50. P. 62–82.
12. Ushakov V.N., Ershov A.A., Ershova A.A., Alekseev A.V. Linear Interpolation of Program Control with Respect to a Multidimensional Parameter in the Convergence Problem // *Mathematical Optimization Theory and Operations Research: Recent Trends. MOTOR 2023. Communications in Computer and Information Science*. 2023. Vol. 1881. P. 324-337.
13. Khan A., Xie W, Zhang L., Liu L. Design and applications of interval observers for uncertain dynamical systems // *IET Circuits Devices Syst*. 2020. Vol. 14. P. 721-740.
14. Liu L., Xie W, Khan A., Zhang L. Finite-time functional interval observer for linear systems with uncertainties // *IET Control Theory and Applications*. 2020. Vol. 14. P. 2868-2878.
15. N. Malev, "Analysis of the Servo Drive Dynamics with Allowance for Uncertainties by Methods of the Robust Control Theory," 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 423-429.
16. Wu, X., Xu, K., Lei, M., He, X., "Disturbance-Compensation-Based Continuous Sliding Mode Control for Overhead Cranes with Disturbances", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17:4 (2020), 2182–2189.
17. Malev N.A. Research of digital models of the sensitivity of a servo drive. *Bulletin of Kazan State Power Energy University*. – 2024. – Vol. 16, № 1(61). – P. 52-69.
18. Duman-Mammadov A., Dincel E., Söylemez M.T. Design of decentralized proportional–integral proportional–retarded controllers in discrete-time domain for two-input two-output processes. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2023;45(3):427-439.

19. Derksen H., Makam V. Invariant Theory and wheeled PROPs. *Journal of Pure and Applied Algebra*. 2023; 227(9):107302.
20. Sun N., Fang Y., Wu Y., and Chen H., “Adaptive Positioning and Swing Suppression Control of Underactuated Cranes Exhibiting Double-Pendulum Dynamics: Theory and Experimentation”, *Proceedings of 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (Wuhan, China, 2016)*, 87–92.
21. Malev N.A., Pogoditsky O.V., Kozelkov O.V., Malacion A.S. Digital algorithm monitoring functioning of electromechanical dc converter. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):126-140. (In Russ.).
22. Srochko V. A., Arguchintsev A. V. Parametric Regularization of the Functional in a Linear-quadratic Optimal Control Problem. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*, 2024, vol. 49, pp. 32–44. (in Russ.).
23. Dmitruk N. M. Multiply closed control strategy in a linear terminal problem of optimal guaranteed control. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 2022, vol. 319, suppl. 1, pp. 112–128.
24. Xu L., Ding F. The parameter estimation algorithms for dynamical response signals based on the multiinnovation theory and the hierarchical principle. *IET Signal Processing*. 2017; 11(2):228-237.
25. Dincel E., Mutlu İ., Schrödel F. et al. Further Results on Dominant Pole Placement via Stability Mapping Approach. *IFAC-PapersOnLine*, 2018; 51(4):918-923.
26. Bhojanapalli S., Neyshabur B., Srebro N. “Global optimality of local search for low rank matrix recovery”. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2016, pp. 3873–3881.
27. Chandak Y. et al. “Optimizing for the future in non-stationary MDPs” In: *Inter-national Conference on Machine Learning*. PMLR. 2020, pp. 1414–1425.
28. Badonova S.A. On a de Branges space related to the Riemann zeta function. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya / Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 7–11.
29. Kemper G. Computing quotients by connected solvable groups. *Journal of Symbolic Computation*. 2022;109:426-440.
30. Berthomieu, C. Eder, & M. Safey El Din. msolve: A library for solving polynomial systems. In *Proceedings of the 2021 on International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation*, pages 51-58, 2021.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2224-0681>. maleev@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено	21.01.2025 г.
Отредактировано	07.09.2025 г.
Принято	04.10.2025 г.



ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Солюянов Ю.И.¹, Федотов Е.А.², Федотов А.И.², Ахметшин А.Р.², Солюянов В.И.¹

¹ООО Ассоциация «РЭМ», г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
fed.ai@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Аккумуляторные системы накопления энергии позволяют снижать пиковые нагрузки в системах внешнего электроснабжения, это способствует снижению потерь электроэнергии при эксплуатации и позволяет на этапе проектирования выбирать трансформаторы меньшей мощности. Для жилых и общественных зданий появляется возможность снижения расходов на оплату электроэнергии в часы максимальной нагрузки, а также подключения электрочаговых станций, устанавливаемых на придомовых территориях. **ЦЕЛЬ.** Разработка методики выбора мощности и энергоёмкости аккумуляторных систем накопления энергии, используемых в городской инфраструктуре для ограничения потребляемой из питающей сети мощности в часы пиковых нагрузок, а также последующая разработка предложений по внесению изменений в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа». **МЕТОДЫ.** В работе использованы натурные измерения суточных графиков нагрузок жилых и общественных зданий, а именно: многоквартирных домов с электрическими плитами высотой от 11 до 25 этажей, детских садов и школ, а также общественных зданий культурно-досугового назначения и торговых центров. Для многоквартирных домов сформирован типовой суточный график нагрузок. На его примере показано использование баланса энергии заряда и разряда накопителя для расчёта максимальных значений требуемой мощности и энергоёмкости. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Рассмотрены особенности подключения системы накопления электроэнергии к системам городского электроснабжения. Показано, что максимальная выдача накопителем электроэнергии достигается при его заряде в режиме потребления постоянной мощности из сети. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Заряд аккумуляторных батарей стабилизированным пониженным током, продлевающий их ресурс, целесообразен для систем накопления энергии, работающих в кратковременном режиме разряда. На основе полученного типового графика нагрузок МКД предложены расчетные формулы для выбора параметров системы накопления электроэнергии, устанавливаемых на объектах, имеющих повторяющиеся графики нагрузки.

Ключевые слова: система накопления электроэнергии; аккумуляторная батарея; электрическая мощность; электроэнергия; график нагрузок; пиковая нагрузка; типовой график; система электроснабжения.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств, выделяемых Федеральным центром нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве по договору № 32514965236-1/2025 от 21.07.2025 г. на выполнение НИОКР на тему «Проведение исследования с целью разработки методики расчета определения мощности и энергоёмкости накопителей электроэнергии для потребителей с установленными суточными графиками электропотребления с целью оптимизации заявленной электрической нагрузки в жилых и общественных зданиях».

Для цитирования: Солюянов Ю.И., Федотов Е.А., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солюянов В.И. Выбор параметров системы накопления электроэнергии, используемой для покрытия пиковых нагрузок жилых и общественных зданий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 86-105. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-86-105.

SELECTION OF PARAMETERS OF AN ELECTRICITY STORAGE SYSTEM USED TO COVER PEAK LOADS OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS

Soluyanov Yu.I.¹, Fedotov E.A.², Fedotov A.I.², Akhmetshin A.R.², Soluyanov V.I.¹

¹LLC Association "REM", Moscow, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

fed.ai@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE.* Battery energy storage systems reduce peak loads in external power supply systems, which helps reduce operational energy losses and allows for the selection of lower-power transformers during the design stage. Residential and public buildings benefit from reduced electricity bills during peak hours, as well as the ability to connect to electric charging stations installed in adjacent areas. *THE PURPOSE.* Developing a methodology for selecting the capacity and energy capacity of battery energy storage systems used in urban infrastructure to limit power consumed from the power grid during peak load hours, as well as the subsequent development of proposals for amending SP 256.1325800.2016 "Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Design and Installation Rules." *METHODS.* The study utilized in-kind measurements of daily power profiles for residential and public buildings, specifically apartment buildings with electric stoves ranging from 11 to 25 stories tall, kindergartens and schools, as well as public buildings serving cultural and leisure purposes and shopping centers. A typical daily power profile was generated for apartment buildings. This profile demonstrates the use of the energy balance of the storage device's charge and discharge to calculate the maximum required power and energy capacity. *RESULTS.* The specifics of connecting an energy storage system to the city's power grid are discussed. It is shown that the storage system achieves its maximum output when charged while drawing constant power from the grid. *CONCLUSION.* Charging batteries with a stabilized, reduced current, which extends their lifespan, is beneficial for energy storage systems operating in short-term discharge modes. Based on the obtained typical power profile of an apartment building, calculation formulas are proposed for selecting the parameters of energy storage systems installed at facilities with recurring load patterns.

Keywords: energy storage system; battery; electric power; electric energy; power profile; peak load; typical schedule; power supply system.

Acknowledgments: The work was carried out using funds allocated by the Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment of Conformity in Construction under contract No. 32514965236-1/2025 dated July 21, 2025, for the implementation of R&D on the topic of "Conducting research to develop a methodology for calculating the power and energy capacity of electricity storage devices for consumers with established daily electricity consumption schedules in order to optimize the declared electrical load in residential and public buildings".

For citation: Soluyanov Yu.I., Fedotov E.A., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Soluyanov V.I. Selection of parameters of an electricity storage system used to cover peak loads of residential and public buildings. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 86-105. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-86-105.

Введение (Introduction)

В настоящее время наблюдается широкое распространение аккумуляторных систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), и в первую очередь, для стабилизации частоты в энергосистемах, где используются возобновляемые источники электроэнергии, характеризующиеся нестабильностью её выработки [1-7]. Мощность и энергоёмкость наиболее крупных балансирующих хабов достигает 850 МВт и 1680 МВт·ч (рис. 1) [8]. Одновременно наблюдается применение СНЭЭ относительно небольшой мощности на уровне нескольких десятков или сотен киловатт для частных домовладений, имеющих ВИЭ [9-15], в функции хранителей электроэнергии (ЭЭ) с целью её последующей продажи на розничном рынке на интервалах с наиболее высокими тарифами (рис. 2).



Рис. 1. СНЭЭ проекта «супербатареи» Waratah, Австралия

Fig. 1. Waratah Super Battery Energy Storage System Project, Australia

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



а)



б)

Рис. 2. Аккумуляторные СНЭЭ для домохозяйств: а – централизованная стационарная СНЭЭ на несколько сотен кВт; б – мачтовая СНЭЭ на 30 кВт для нескольких домохозяйств, проект Symphony, Австралия

Fig. 2. Battery energy storage systems for households: a – centralized stationary energy storage system with a capacity of several hundred kW; b – 30 kW pole-mounted energy storage system for multiple households, Symphony Project, Australia

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

Существуют и другие области применения СНЭЭ, в частности, для обеспечения устойчивой работы газопоршневых энергоустановок в локальных энергосистемах при набросах и сбросах нагрузки [16-21], для экономии жидкого топлива дизель-генераторов в условиях его северного завоза и т.д. ПАО «Россети» активно развивает направление по созданию мобильных СНЭЭ, используемых для питания точечных поселений на территориях, удаленных от централизованного электроснабжения. Для экономичного технического решения по выбору мощности и энергоёмкости мобильных СНЭЭ в этих случаях необходимо располагать информацией по закономерностям электропотребления (ЭП) объектов, подключаемых к накопителю, чтобы правильно спрогнозировать периодичность замены подвижной части СНЭЭ, т.е. аккумуляторных батарей (АБ) [22-27]. В условиях уже функционирующих объектов это не вызывает каких-либо принципиальных затруднений. Однако на этапе проектирования электротехнического комплекса «объект жилого/общественного назначения – СНЭЭ» приходится сталкиваться с отсутствием нормативной информации об их суточных графиках электрических нагрузок (ГЭН).

Экономическая эффективность снижения потребляемой мощности из сети в часы максимального отпускного тарифа на ЭЭ была оценена промышленными предприятиями еще несколько десятилетий тому назад. К наиболее ярким примерам середины 80-х годов можно отнести испытательную установку завода корабельных двигателей в г. Николаев, где в качестве нагрузки двигателей служил синхронный генератор мощностью 30 МВт, работающий на внешнюю сеть, а также Казанский моторостроительный завод, где для снижения потребляемой из сети мощности в часы максимальных нагрузок использовались несколько автономных газотурбинных электростанций мощностью по 2,5 МВт. В наше время малая генерация на промышленных предприятиях становится обыденной, но на объектах городской инфраструктуры её применение ограничивается только в виде

резервных источников питания. Такая ситуация вполне закономерная, т.к. при постоянной эксплуатации энергоустановок требуется, помимо непрерывной подачи топлива, еще и квалифицированный обслуживающий персонал с соответствующей оплатой труда. Причем удельная часть расходов на его содержание тем выше, чем ниже мощность энергоустановок. Появление на электротехническом рынке аккумуляторных СНЭЭ в диапазоне мощностей от нескольких десятков до нескольких тысяч киловатт позволяет рассмотреть вопрос об их использовании в жилых и общественных зданиях как в качестве компенсатора локальных набросов нагрузки, так и на длительных интервалах времени для снижения оплаты за ЭЭ посредством выдачи её потребителям в часы максимального тарифа. Одновременно с этим выравнивание ГЭН в городских распределительных сетях способствует снижению потерь ЭЭ, т.е. имеет место энергосберегающий эффект. К электрохимическим СНЭЭ относятся и суперконденсаторные установки [1, 2], но преимущественная сфера их применения – тяговый электротранспорт, и в этой связи они далее не рассматриваются. Ниже приводятся методики выбора мощности и энергоёмкости аккумуляторных СНЭЭ (рис. 3) в зависимости от функционала здания.



Рис. 3. Принципиальная схема аккумуляторной СНЭЭ *Fig. 3. Schematic diagram of a battery energy storage system*

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

Графики электрической нагрузки жилых и общественных зданий

Для выбора параметров СНЭЭ с целью их установки как на уже действующих объектах, так и на этапе их интеграции в проектируемые системы электроснабжения, главной информацией служат суточные ГЭН. Нормативно-технические документы^{1,2}, определяющие методики расчета электрических нагрузок непромышленных объектов, содержат только значения расчётных удельных мощностей жилых и общественных зданий, по которым, в конечном счёте, выбираются проводники, силовые трансформаторы (СТ) и коммутационные аппараты, а также рассчитывается мощность технологического присоединения [28-32]. Использование СНЭЭ ставит задачу оценки нагрузки во времени, т.к. необходимо согласовывать режимы заряда и разряда АБ. Во-первых, израсходовать накопитель может только то, что в нём предварительно запасено, причём с учётом ряда ограничений, о которых будет изложено ниже. Во-вторых, уже в процессе его работы система управления должна опираться на некоторую прогнозную модель ГЭН [28-32], иначе АБ можно разрядить раньше, чем необходимо. Ни в современной нормативной^{1,2}, ни в справочной литературе ГЭН городских жилых и общественных зданий не приводятся, т.к. до настоящего времени не были востребованы проектировщиками. В последние годы был выполнен ряд исследований в этом направлении [28-32]. На рисунках 4-8 представлены суточные ГЭН ряда объектов городской инфраструктуры, полученные Ассоциацией «Росэлектромонтаж» в процессе мониторинга ЭП жилых и общественных зданий с получасовым усреднением результатов измерений. Вначале представлены графики удельной нагрузки объектов, имеющие выраженный максимум нагрузки. К ним относятся многоквартирные жилые дома (МКД), детские и школьные образовательные учреждения (ДОУ и СОШ) (рис. 4-8). Записывалась суммарная нагрузка МКД двух строительных кластеров (с газовыми плитами, МКД 5-10 этажей (рис. 4)), включающая в себя ЭП квартир, общедомовых нужд (ОДН) и коммерческих потребителей, расположенных на первых этажах зданий (с электрическими плитами, МКД 11 этажей и выше (рис. 5)).

¹ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

² РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей».

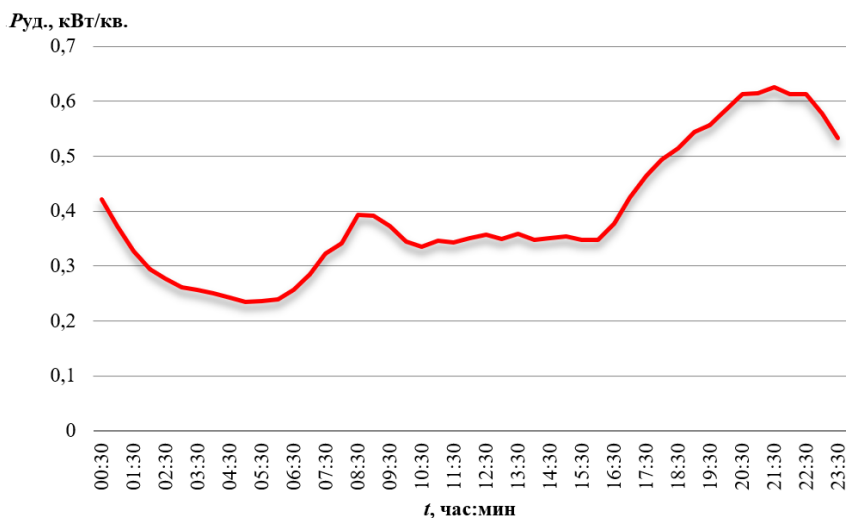


Рис. 4. Суточный график удельной нагрузки *Fig. 4. Daily power density profile of a 9-story building*

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

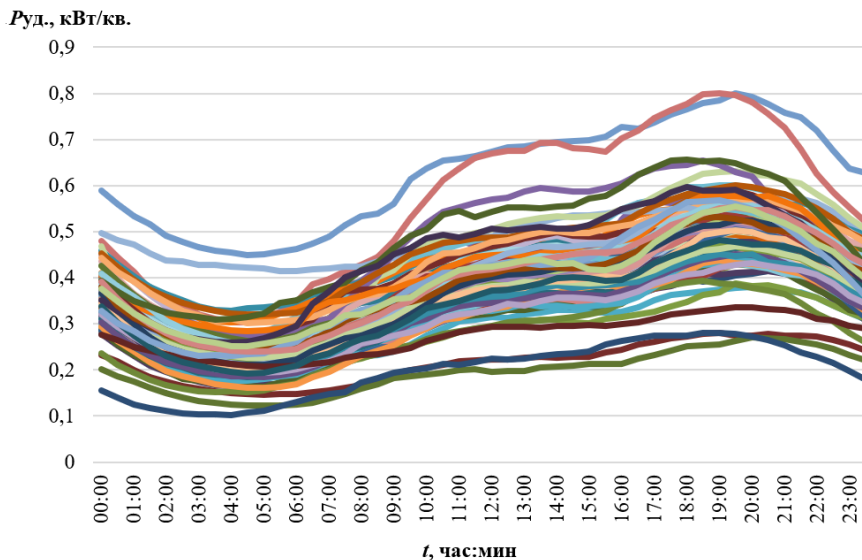


Рис. 5. Суточные графики удельной нагрузки *Fig. 5. Daily power density profiles for МКД 19-25 этажей*

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

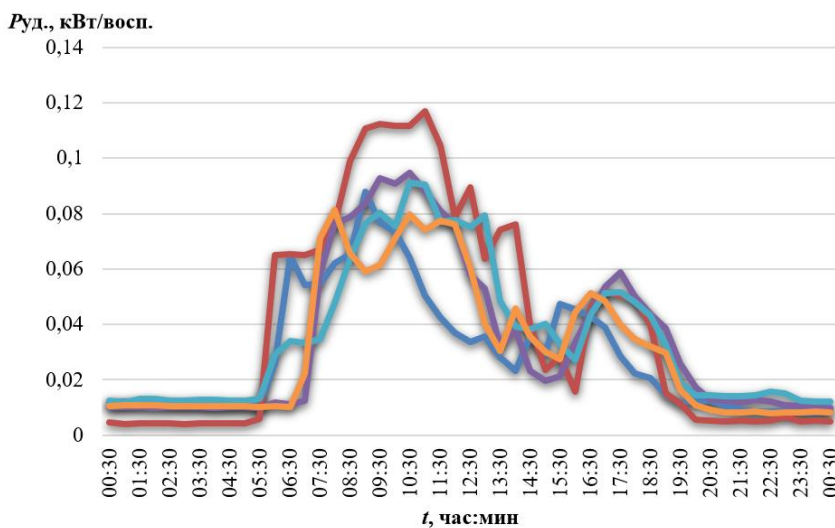


Рис. 6. Суточный график удельной нагрузки *Fig. 6. Daily profile of specific capacity of ДОУ*

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

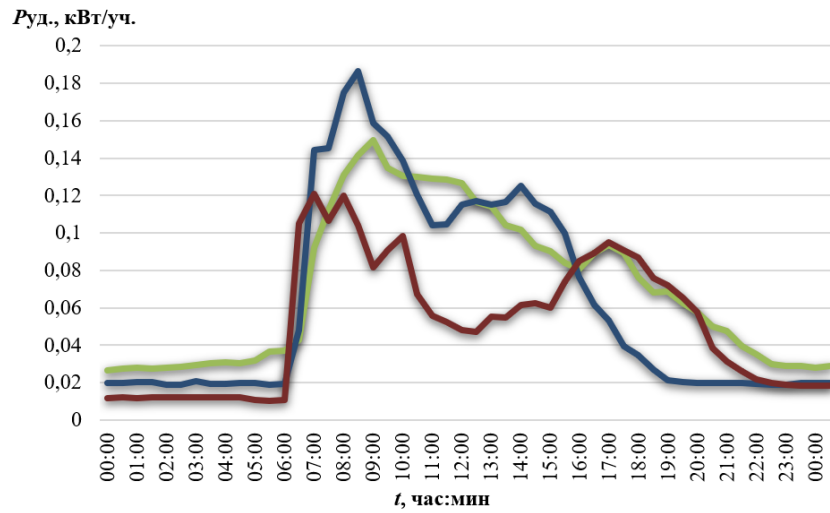


Рис. 7. Суточный график удельной нагрузки СОШ Fig. 7. Daily profile of specific capacity of schools SOSh

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

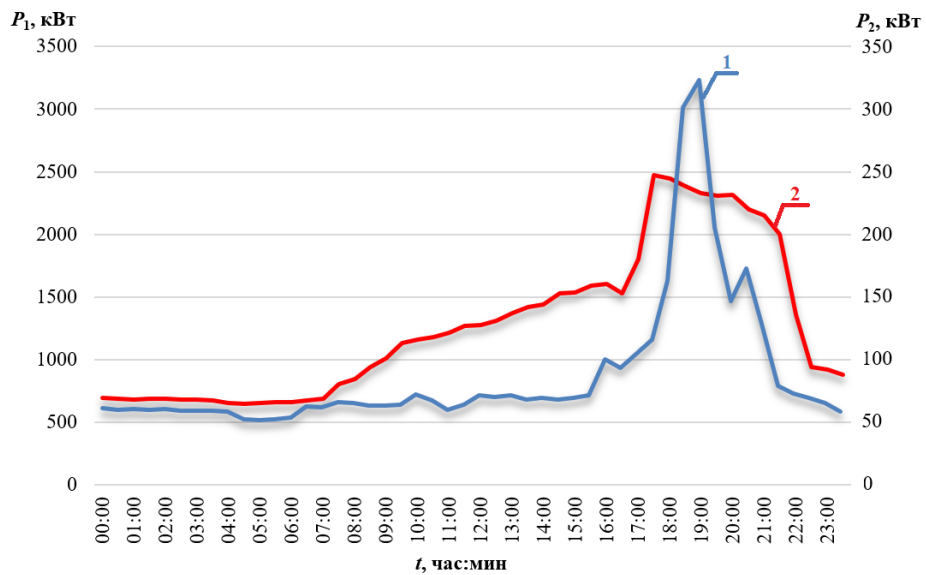


Рис. 8. Суточные ГЭН зданий культурного и оздоровительного назначения: 1 – спортивно-тренировочный комплекс (P_1); 2 – театр оперы и балета (P_2) Fig. 8. Daily power profiles of cultural and recreational buildings: 1 – sports and training complex (P_1); 2 – opera and ballet theatre (P_2)

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

Несмотря на отличие в абсолютных значениях удельной мощности МКД (рис. 4 и 5), наблюдается устойчивый максимум нагрузки в вечернее время и частично локальный максимум нагрузки в утренние часы.

Для ДООУ и СОШ максимум нагрузки приходится на утренние часы, а локальные максимумы смещены ближе к вечеру (рис. 6 и 7).

Для театрально-концертных зданий характерен вечерний максимум нагрузки в силу специфики их работы, как и для спортивно-тренировочных комплексов (рис. 8).

Помещения и здания общественного назначения характеризуются относительно ровными ГЭН в рабочие часы (рис. 9-13).

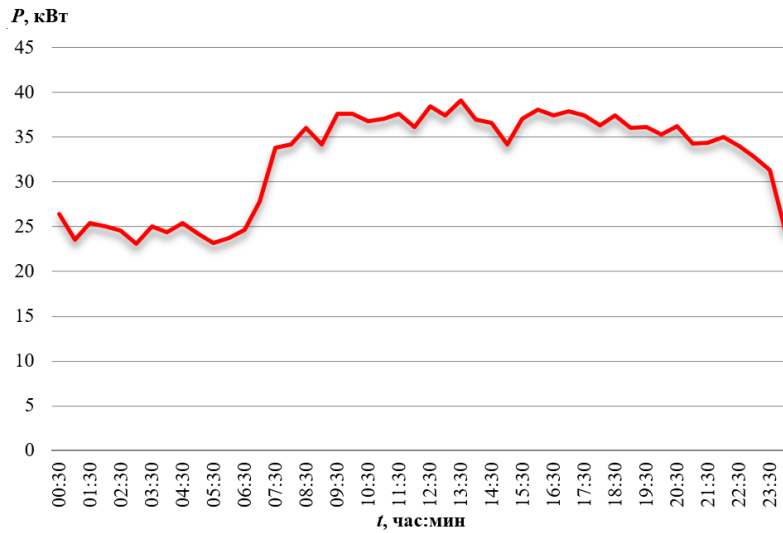


Рис. 9. Суточный ГЭН магазина «Пятерочка» *Fig. 9. Daily load profile of the Pyaterochka store*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

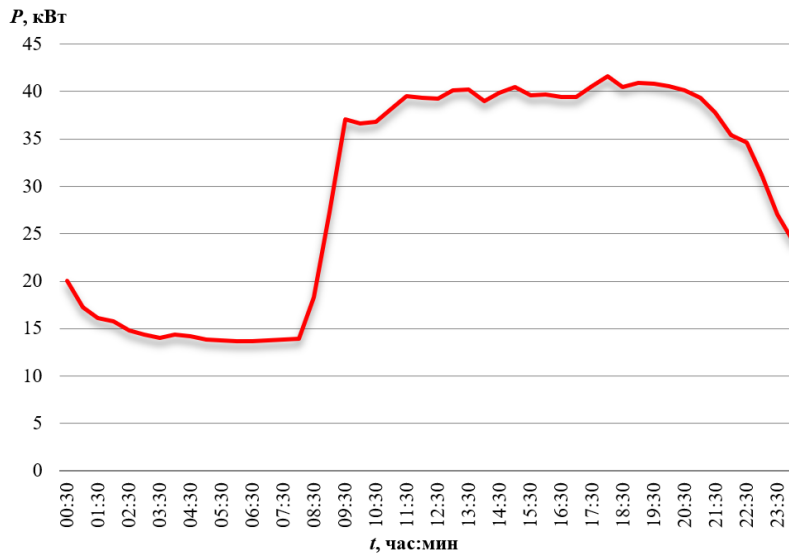


Рис. 10. Суточный ГЭН кафе *Fig. 10. Daily load profile of the cafe*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

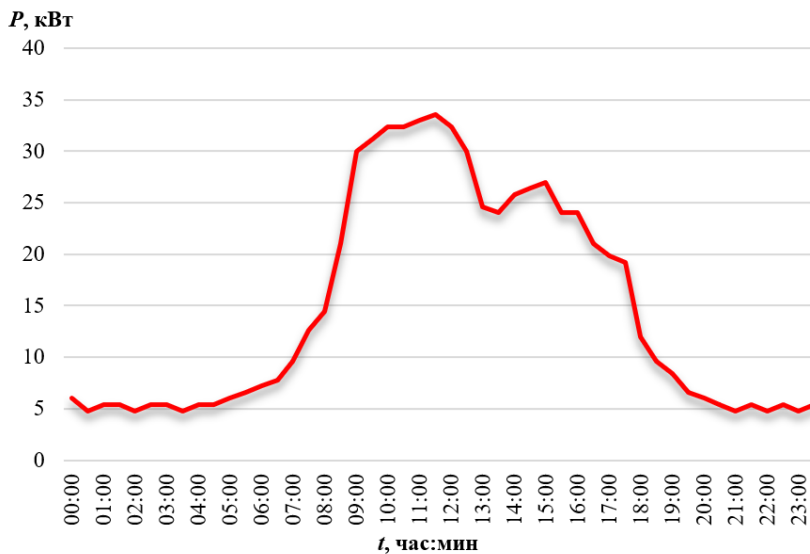


Рис. 11. Суточный ГЭН поликлиники *Fig. 11. Daily capacity profile of the clinic*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

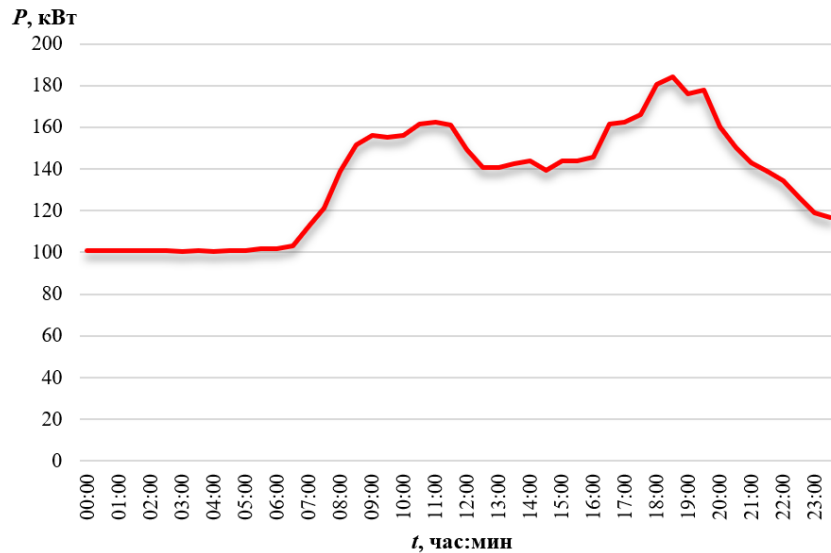


Рис. 12. Суточный ГЭН физкультурно-оздоровительного комплекса

Fig. 12. Daily power profile of the multifunctional complex

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

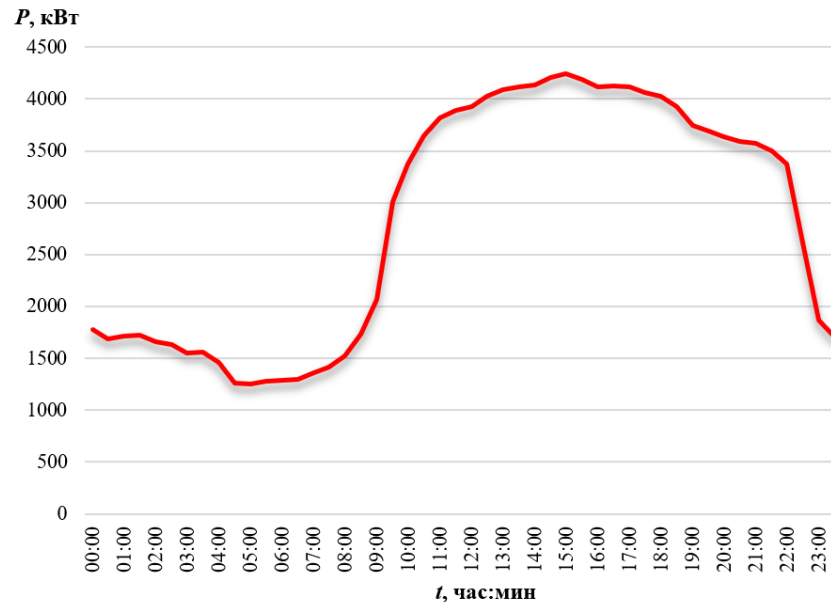


Рис. 13. Суточный ГЭН торгового центра

Fig. 13. Daily power profile of the shopping center

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

Определенная общность ГЭН относится к их форме, максимальная нагрузка при этом может значительно отличаться, что иллюстрирует применительно к МКД кластера 19-25 этажей (рис. 5). Распределение по времени суток значений максимальной нагрузки всех обследованных образовательных учреждений и МКД представлены на рисунке 14 в виде точечных диаграмм. Из них видно, что для некоторых МКД (без их разделения по строительным кластерам) наблюдается глобальный максимум нагрузки в первой половине дня, но в целом максимальной нагрузке соответствуют вечерние часы в интервале от 18 до 23 часов. Для всех ДОУ и СОШ максимумы нагрузки наблюдались только в первой половине дня от 6 до 12 часов.

На шинах трансформаторных подстанций (ТП) суточный ГЭН сильно зависит от состава нагрузок и их относительной мощности. Так, на рисунке 14 для одной из ТП, питающей МКД и СОШ, максимум нагрузки приходится на 14:30 ч, а для одной из ТП, питающей МКД и ДОУ, суточный максимум смещен на 10:30 ч (рис. 15), что характерно именно для ДОУ.

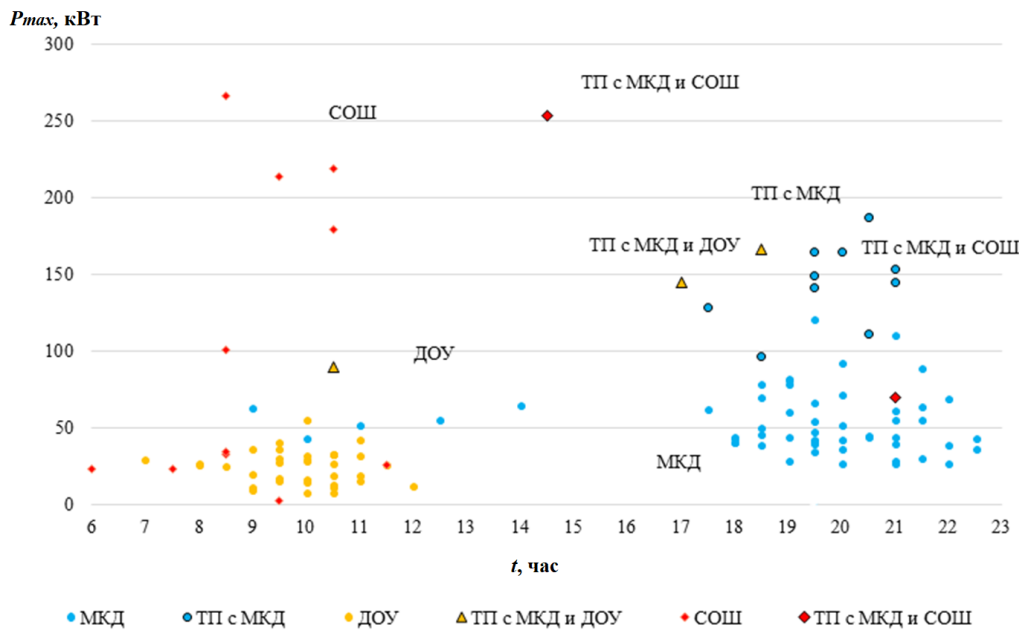


Рис. 14. Диаграмма распределения максимальной нагрузки по времени суток
 Fig. 14. Diagram of distribution of maximum load by time of day
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

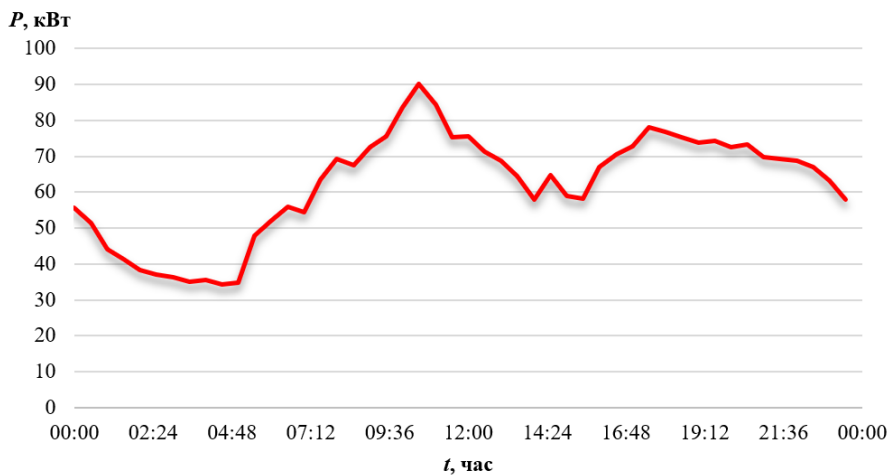


Рис. 15. Суточный ГЭН на ТП, питающей МКД и ДОУ
 Fig. 15. Daily power profile at the transformer substation supplying an apartment building and a kindergarten
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В общем случае на этапе проектирования для оценки величины суммарной мощности на шинах ТП следует использовать коэффициенты одновременности максимальной нагрузки^{1,2}, при этом временная зона его проявления диктуется наибольшей из складываемых нагрузок.

Подключение СНЭЭ к системе электроснабжения

При проектировании непромышленных объектов городской инфраструктуры для снижения затрат на оплату мощности технологического присоединения можно предусмотреть использовать СНЭЭ. На этапе их эксплуатации СНЭЭ также могут обеспечить снижение затрат на оплату потребляемой ЭЭ, если использовать разницу в тарифах на отпускаемую ЭЭ по времени суток. Экономический эффект будет зависеть от ГЭН объектов. Так, для МКД явно выражен вечерний максимум нагрузки (рис. 4 и 5), и поскольку наибольший тариф приходится на часы максимальной нагрузки МКД, то одновременно при выдаче энергии от СНЭЭ будут выполняться и условия договора на соблюдение предельной потребляемой из сети мощности. Для объектов с достаточно ровным ГЭН (рис. 9-13) экономический эффект может быть получен за счет питания электрозарядных станций (ЭЗС) в вечерние часы, используя накопленную в ночные часы ЭЭ. В любом случае, необходимо рассмотреть вопрос, куда именно может быть подключена СНЭЭ, и как она может повлиять на проектирование системы электроснабжения объекта.

Рассмотрим примеры конкретных проектных решений. На рисунке 16 приведена принципиальная схема электроснабжения одного МКД, СОШ и дренажной насосной станции (ДНС) от общей подстанции. Представлена типовая схема, где от шин подстанции радиально питаются вводные распределительные устройства (ВРУ) каждого объекта.

Схемы питания ВРУ «двойная сквозная магистраль» практически не применяются в современных системах городского электроснабжения. Поскольку электрическая нагрузка каждого объекта примерно равномерно распределяется между СТ, а секционный выключатель 0,4 кВ в нормальном режиме отключен (он включается по команде автоматики аварийного включения резерва (рис. 16)), то необходима установка двух СНЭЭ, подключаемых либо непосредственно на секции шин 0,4 кВ, либо на вводах объектов. С позиции решения вопроса среза максимальной нагрузки на подстанции нет разницы между способами подключения накопителей. Однако имеет значение, какой именно объект по договору заявляет максимальную нагрузку. Если СНЭЭ подключаются на шины ТП, то потребуется заключение отдельного договора с поставщиком ЭЭ, по которому мощности заряда и разряда СНЭЭ суммируются (алгебраически) с потребляемой мощностью самого объекта. Если СНЭЭ объекта подключаются после своих вводных электросчетчиков во ВРУ, которые имеют связь по информационным каналам с электроснабжающей организацией, то отслеживание условий выполнения договорных обязательств осуществляется автоматически, при этом необходимо предусмотреть установку двунаправленного прибора учета электроэнергии (ПУЭЭ) во ВРУ, где подключается накопитель. Количество ВРУ одного объекта может быть и больше 2-х, как видно из схемы (рис. 17).

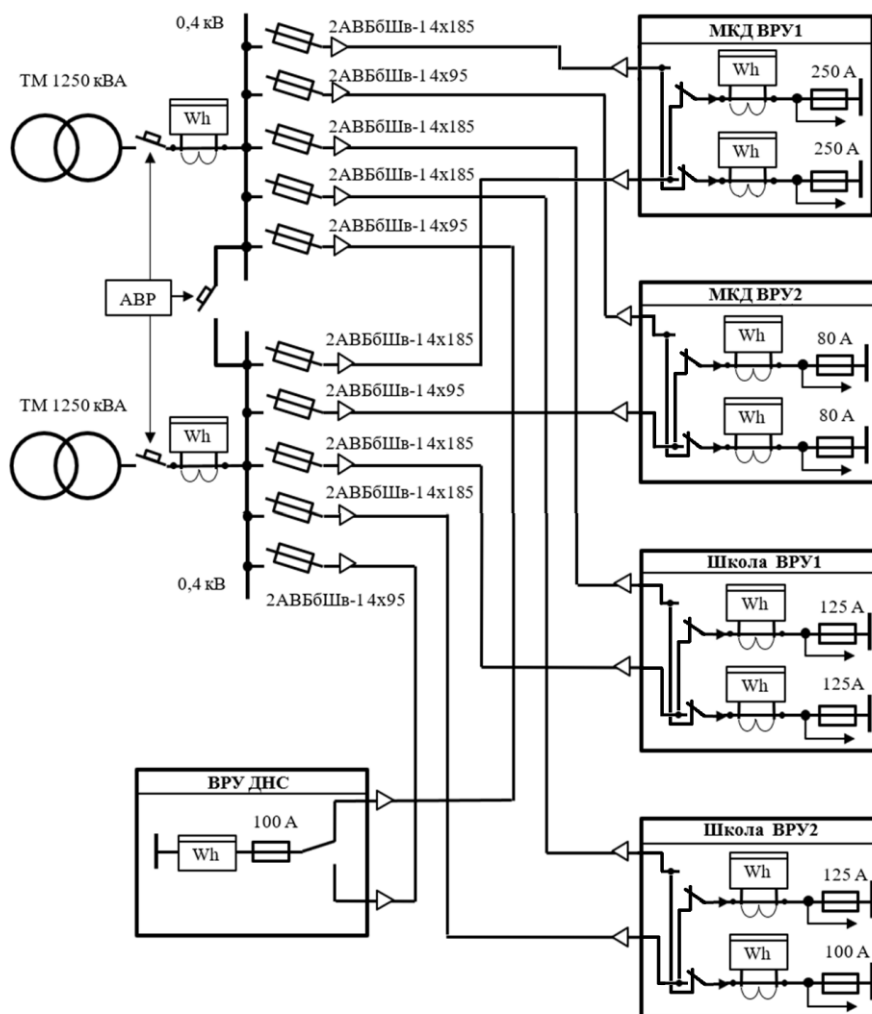


Рис. 16. Принципиальная схема электроснабжения МКД и СОШ

Fig. 16. Schematic diagram of the power supply of an apartment building and a school

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

Из представленных схем видно, что непосредственно к «вводу» МКД подключить СНЭЭ невозможно, т.к. вводов несколько (рис. 16 и 17). Аналогичная ситуация и для СОШ (рис. 16). Причем, если для МКД можно выделить ВРУ1, которые обеспечивают питание большей части нагрузки, и именно к нему целесообразно подключать СНЭЭ для среза потребляемой мощности МКД из сети, то применительно к СОШ оба ВРУ рассчитаны на одинаковую нагрузку. Индивидуальное подключение СНЭЭ к каждому ВРУ технически осуществимо, где точки подключения должны выбираться за ПУЭЭ ВРУ, но этот вариант требует столько же помещений для размещения СНЭЭ и является наиболее затратным. Ограничиться одной СНЭЭ на МКД нельзя, т.к. ВРУ распределены по питанию между разными секциями шин 0,4 кВ ТП, и тогда все ВРУ будут электрически связаны между собой через СНЭЭ. Тем самым исчезает главное преимущество радиальной схемы электроснабжения – независимое раздельное питание каждого ВРУ. Если же связать СНЭЭ с одной секцией шин 0,4 кВ ТП, то будет создаваться значительное неравномерное распределение мощности между СТ, что приводит к увеличению потерь ЭЭ. Таким образом, оптимальным решением является установка двух СНЭЭ, которые могут в интересах электроснабжающей компании работать в режиме поддержания одинаковой передаваемой мощности в каждом СТ и при этом в сумме обеспечивать договорной уровень потребляемой МКД (или другим объектом) из питающей сети мощности.

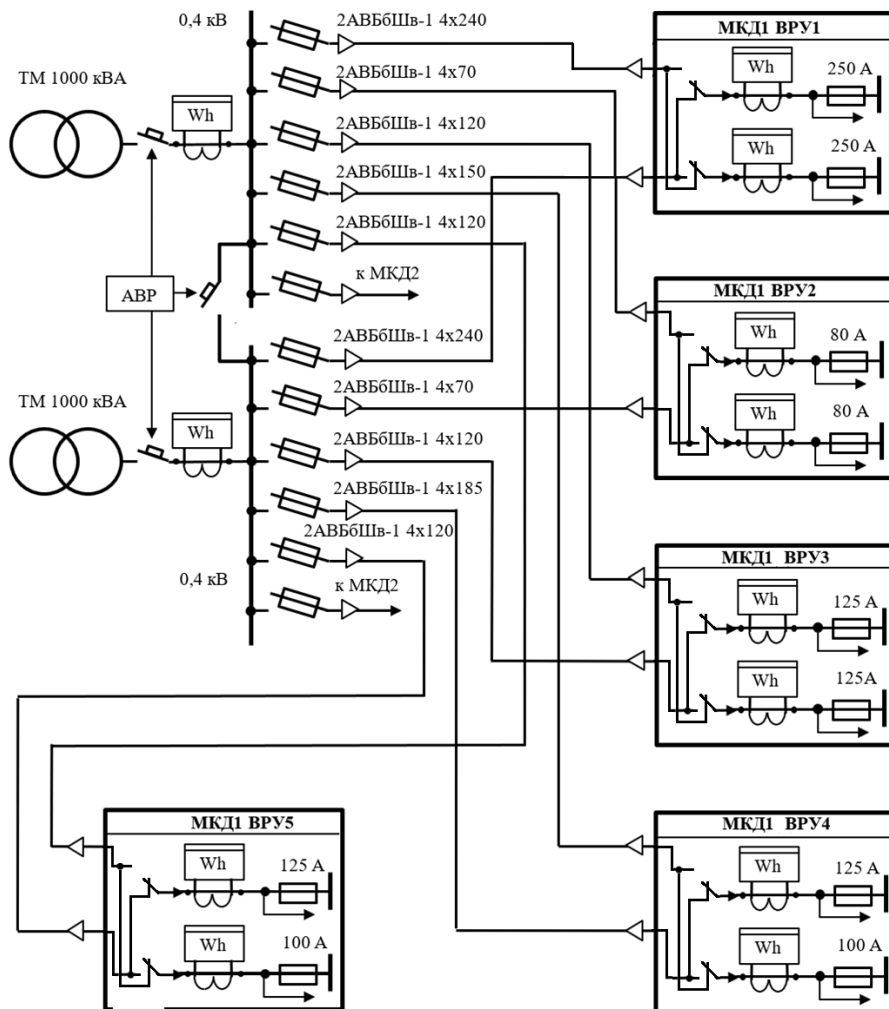


Рис. 17. Фрагмент принципиальной схемы электроснабжения двух МКД *Fig. 17. A fragment of the basic diagram of the power supply of two apartment buildings*

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

Если СНЭЭ подключить к наиболее мощному ВРУ, необходима дополнительная проверка сечения кабелей (рабочий и резервный), связывающих ВРУ с ТП, в режимах генерации мощности СНЭЭ и заряда АБ по допустимому максимальному току (рис. 18), где через P_{L1}, \dots, P_{LN} обозначены мощности нагрузки каждого ВРУ, $P_{\Sigma} = P_{L1} + \dots + P_{LN}$ – поступающая мощность из сети при отключенном накопителе, P_{st} – мощность накопителя

(генерируемая со знаком «плюс» или зарядная со знаком «минус»), P_T – поступающая из сети мощность. При этом во ВРУ1 должен устанавливаться двунаправленный ПУЭЭ. Обратная связь ПУЭЭ, устанавливаемых в ВРУ, с СНЭЭ необходима, т.к. система управления накопителем сравнивает фактическую мощность с заданной уставкой.

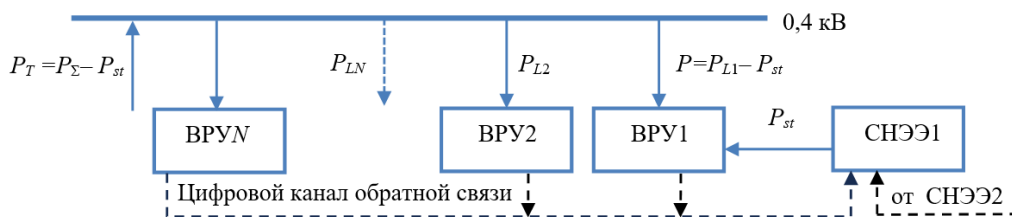


Рис. 18. Распределение активной мощности при подключении СНЭЭ к ВРУ Fig. 18. Distribution of active power when connecting power supply systems to the input distribution device

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

Как видно из рисунка 18, кабель к ВРУ1 требуется проверять в двух режимах: в режиме заряда АБ номинальным током и в режиме максимальной выдачи мощности от СНЭЭ1. В первом случае используется минимальная нагрузка объекта, во втором случае – его максимальная нагрузка, для чего необходима информация об изменении нагрузки во времени.

Поскольку литий-ионные АБ пожароопасны, то для размещения СНЭЭ требуются отдельные боксы. С учётом этого фактора предпочтительным представляется вариант их совмещения с ТП и, соответственно, подключение накопителей к её шинам 0,4 кВ. Для того, чтобы от ВРУ не прокладывать контрольные кабели до СНЭЭ, достаточно установить дополнительные ПУЭЭ на отходящих к нужному объекту силовых кабелях в ТП.

Выбор мощности и энергоёмкости СНЭЭ, используемых для «среза» пика мощности на ТП

При выборе параметров СНЭЭ при их использовании в целях ограничения потребляемой пиковой нагрузки на ТП объектами городской инфраструктуры ключевой является проблема расчёта требуемой энергоёмкости накопителя. В директивных документах^{1,2} приводятся нормативные значения максимальных расчётных электрических нагрузок жилых и общественных зданий, которые служат основой для выбора проводников и аппаратов в системах электроснабжения. Информация о закономерностях изменения нагрузки по времени суток отсутствует, т.к. она прежде была не востребована. Приведенные на рисунках 4-13 суточные ГЭН ряда городских объектов показывают, что не для всех из них может быть выделен явно выраженный максимум электрической нагрузки. Среди тех потребителей, у которых устойчиво наблюдаются пики мощности, тоже имеются свои особенности. Для МКД установлено, что в вечерние часы в рабочие и выходные дни наблюдается максимальная нагрузка, в ночные часы нагрузка минимальная, и правомерна постановка задачи о разработке типового суточного ГЭН [31]. Там же отмечается, что для ДОУ и СОШ, в отличие от МКД, повторяемость ГЭН не прослеживается. Таким образом, можно сформировать три группы объектов, для которых необходима индивидуальная методика выбора параметров СНЭЭ: группа МКД, для которых существует типовой ГЭН; группа объектов, таких как ДОУ и СОШ, для которых отсутствует типовой ГЭН, но доказано наличие выраженных максимумов нагрузки; группа объектов с относительно ровным ГЭН в рабочие часы.

Рассмотрим полные нагрузки МКД, включающие в себя мощность квартир, ОДН и нагрузки небольших коммерческих объектов, располагаемых на первых этажах зданий. На рисунках 16 и 17 видно, что от ТП кабели подходят непосредственно к ВРУ дома, от которых уже могут быть запитаны сторонние потребители в нежилых помещениях. На рисунке 19 приведены суточные ГЭН, полученные для удельных электрических нагрузок кластеров 11-18 этажей и 19-25 этажей [28-32], но перестроенные в относительных единицах, где за базисные значения приняты максимальные значения суточной нагрузки.

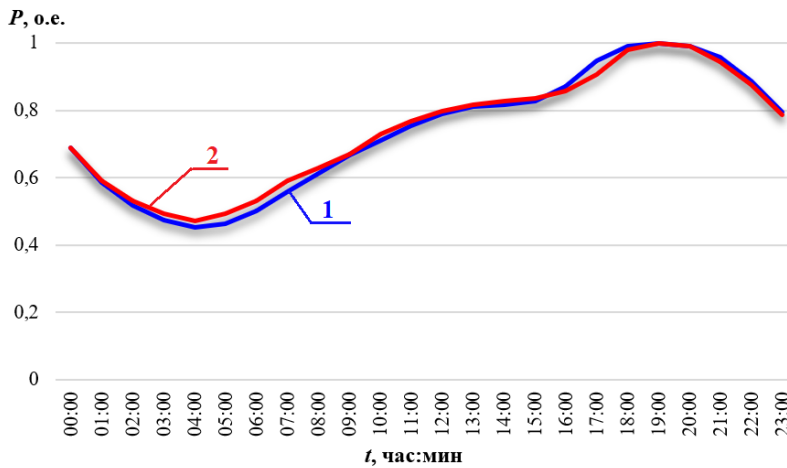


Рис. 19. Суточные ГЭН МКД для кластеров 11-18 этажей (1), 19-25 этажей (2) *Fig. 19. Daily power profiles of apartment buildings for clusters of 11-18 floors (1), 19-25 floors (2)*

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

В абсолютных значениях максимумы ГЭН 1 и 2 (рис. 19) отличаются, как показано в [31], на 0,016 кВт за счет увеличения ОДН в домах большей этажности. Но в относительных единицах расчет по норме (1), характеризующей среднеквадратическое отклонение по отношению к среднему значению, показывает их практическую идентичность.

$$\delta = 100 \sqrt{\frac{1}{48} \sum_{i=1}^{48} \left[\frac{P_{1i} - P_{2i}}{(P_{1i} + P_{2i}) / 2} \right]^2} < 2\%, \quad (1)$$

где P_{1i}, P_{2i} – получасовые отсчеты мощности МКД 1-го и 2-го кластеров.

Гармонический анализ ГЭН 1 и 2 (рис. 19), выполненный в соответствии с [31], также показывает их однотипность, поскольку и гармонический коэффициент, и первые четыре гармоники отличаются менее, чем на 2%.

В формуле (1) учтено, что исходная информация получена в дискретном виде посредством усреднения мощности на получасовых интервалах измерения ЭП. На рисунке 20 приведен итоговый усредненный ГЭН МКД в относительных единицах, и показаны интервалы заряда и разряда СНЭЭ, где заливные площади соответствуют энергии заряда W_{ch} и разряда W_{dc} аккумуляторных батарей СНЭЭ. Принят режим заряда АБ с поддержанием постоянной мощности потребления МКД, чему соответствует точки t_{ch} и t_{dc} .

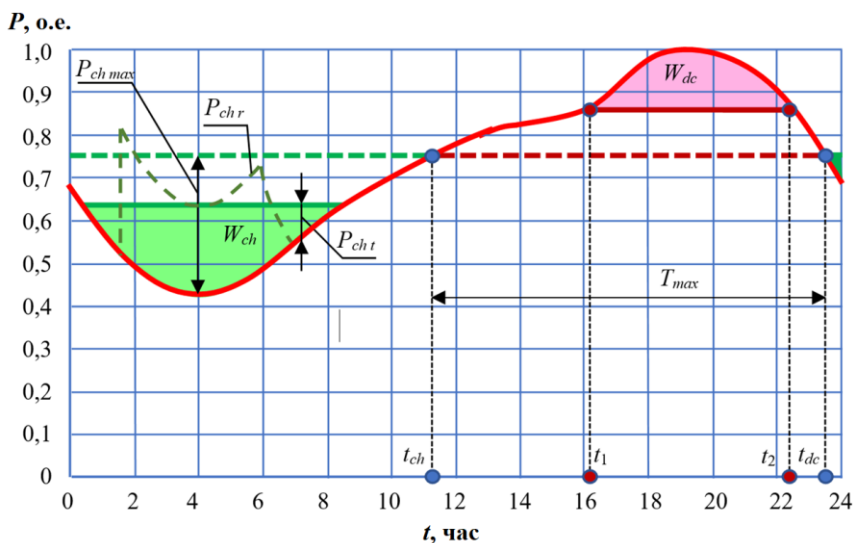


Рис. 20. Распределение во времени режимов заряда и разряда СНЭЭ *Fig. 20. Distribution of charge and discharge modes of energy storage systems over time*

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

Соотношение энергий описывается следующей формулой:

$$W_{dc} = \eta \cdot W_{ch}, \quad (2)$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД) СНЭЭ в цикле «заряд-разряд».

Из формулы (2) следует, что положение точки t_k зависит от коэффициента полезного действия СНЭЭ. Очевидно, что при этом мощность (соответственно, и ток) заряда и разряда изменяются во времени и применительно к данной форме графика должно быть выдержано следующее условие выбора паспортной мощности накопителя

$$P_r \geq P_{ch\max}, \quad (3)$$

где $P_{ch\max}$ – максимальное значение мощности заряда.

Неполный заряд литий-ионных АБ продлевает их ресурс, разряд АБ автоматика ограничивает примерно на уровне 10% от номинальной энергоёмкости, поэтому с учётом условий эксплуатации СНЭЭ минимальная энергоёмкость её АБ должна удовлетворять условию:

$$W_{r\min} = \eta \cdot k_w \cdot W_{ch}, \quad (4)$$

где коэффициент $k_w = 0,7 \div 0,9$ учитывает неполные заряд и разряд АБ. Наименьшее его значение отвечает наибольшему ресурсу АБ.

Паспортное значение W_r ёмкости СНЭЭ должно удовлетворять условию

$$W_r \geq W_{r\min} \quad (5)$$

Таким образом, алгоритм выбора номинальной энергоёмкости СНЭЭ, обеспечивающей наиболее продолжительный режим её работы, следующий. Зная КПД (η) СНЭЭ в режиме работы АБ с неполным зарядом и задавая желаемый коэффициент k_w , по формуле (4) получаем соотношение между энергией заряда и разряда. По оцифрованному типовому графику (рис. 20) находим значения t_{ch} и t_{dc} и определяем максимальную длительность разряда T_{\max} . Если предполагается работа СНЭЭ на более коротком интервале времени, то его начало t_1 и конец t_2 задаются на типовом графике (рис. 20) вычисляется площадь под графиком, соответствующая энергии разряда W_{dc} , и рассчитывается необходимая энергоёмкость по формулам (4) и (5). Интервал заряда может смещаться во времени, а сам заряд большую часть времени производится мощностью P_{chr} , соответствующей номинальному току СНЭЭ, причём потребляемая мощность из сети может быть выше оговоренной максимальной мощности в часы пиковых нагрузок в сети.

На рисунке 21 показаны в относительных единицах зависимости максимальной мощности и энергии разряда от продолжительности среза максимума нагрузки, полученные из графика (рис. 20). Переход к именованным единицам осуществляется путем умножения параметров рисунка 21 на расчетную мощность P_n МКД, которая определяется^{1,2} как

$$P_n = n \cdot p_0 + 0,9 \cdot P_c, \quad (6)$$

где n – количество квартир в МКД, p_0 – соответствующая удельная нагрузка, P_c – силовая нагрузка.

Поскольку типовой ГЭН (рис. 20) получен как средний график между ГЭН в о.е. кластеров МКД 11-18 и 19-25 этажей (рис. 19) целесообразно формулу (5) применять для МКД большей этажности, а для означенных кластеров использовать зависимости максимальной расчетной нагрузки от количества квартир в группе, приведенные в [28-32], которые, как это сделано применительно к нагрузкам квартир агломерации «Москва – Московская область», увеличить с целью создания запаса в 1,5-2 раза.

Для объектов вида ДОУ, СОШ, у которых отсутствуют типовые ГЭН, срез потребляемой максимальной мощности за счет использования СНЭЭ также возможен, как и для МКД, но выбор мощности и энергоёмкости следует жестко привязать к продолжительности разряда, тогда как для МКД задается величина предельной потребляемой из сети мощности (ограничение по пиковой нагрузке) и продолжительность разряда (работа СНЭЭ в интервале времени действия максимального тарифа на ЭЭ). Формулы (2) и (4) остаются в силе, а формула (3) принимает следующий вид:

$$P_r \geq P_{dc\max}. \quad (7)$$

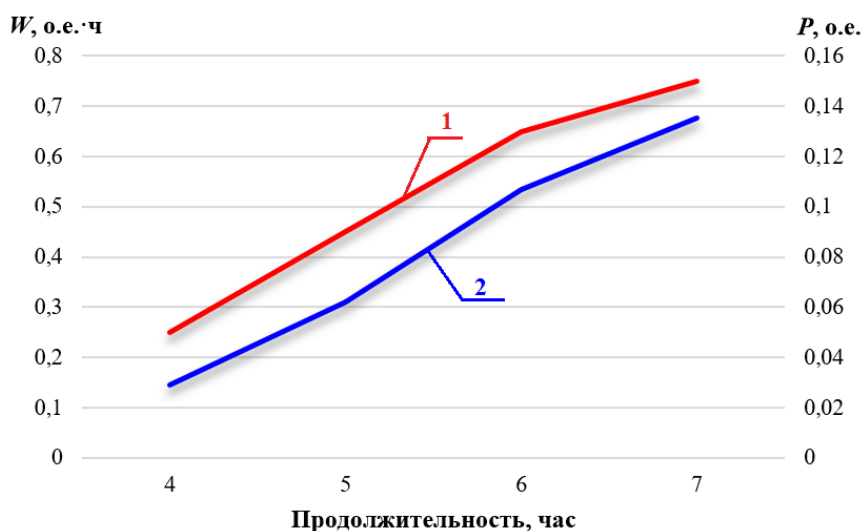


Рис. 21. Зависимость максимальной мощности (1) и энергии разряда (2) в зависимости от продолжительности среза потребляемой мощности

Fig. 21. Dependence of maximum power (1) and discharge energy (2) on the duration of the cutoff of consumed power

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

Для объектов, характеризующихся относительно ровным ГЭН в рабочие часы, применение СНЭЭ может быть привязано к тарифным зонам. Тогда заданной считается продолжительность зоны наибольшего тарифа на ЭЭ, а мощность СНЭЭ определяется на основе технико-экономических расчётов.

Обсуждение (Discussions)

Выбор параметров СНЭЭ в отрыве от суточных ГЭН возможен в таких редких случаях, когда они используются для среза кратковременных пиковых нагрузок, например, в локальных энергосистемах, где в качестве генераторов используются газопоршневые установки, чувствительные по стабилизации частоты к набросам и сбросам мощности потребителей. В ряде случаев они находят применение в системах резервного электроснабжения. На постоянной основе в городской инфраструктуре их использование сдерживается не столько стоимостными показателями, сколько отсутствием методики выбора их параметров (мощности и энергоёмкости), которая, в свою очередь, требует осознания закономерностей изменения во времени суток электрических нагрузок различных объектов, где могли бы быть установлены СНЭЭ. Как отмечено выше, для МКД с электроплитами такие закономерности установлены, и получен типовой ГЭН, который в относительных единицах не зависит от этажности дома. Необходимо пояснить, что получен усредненный ГЭН, который построен за сутки с максимальным ЭП на протяжении всего года. Если сравнить отношение его минимальной нагрузки к максимальной с аналогичными величинами по всем ГЭН МКД, вошедших в мониторинг, то будут значения как большие, так и меньшие. Последнее может сказаться на нехватке продолжительности времени заряда применительно к конкретному МКД уже в процессе его эксплуатации, но данный фактор компенсируется использованием формулы (5). Объясняется это тем, что нормативные значения удельной электрической нагрузки¹ в сравнении с фактическими максимальными значениями для агломерации «Москва – Московская область» завышены примерно в 1,5 раза и более, что видно из результатов мониторинга, опубликованных в [29], где отмечено, что предельные удельные мощности групп квартир получены для суток с максимальным ЭП за год. Для остальных регионов завышение ещё больше. Таким образом, приведённая методика обеспечивает запас для СНЭЭ по мощности и энергоёмкости. Максимальный ток двунаправленного преобразователя должен быть не ниже номинального зарядного тока АБ.

Использование максимальных возможностей по энергоёмкости СНЭЭ вступает в противоречие с желанием увеличения ресурса АБ, поскольку их заряд в этом случае происходит током, величина которого изменяется во времени совершенно не так, как показано на диаграммах (рис. 21), а в соответствии с формой ГЭН в зоне заряда АБ (рис. 20). Завышение номинальной энергоёмкости накопителя с целью снижения относительной величины зарядного тока в таком режиме экономически может быть оправдано только при наличии достоверной апробированной модели деградации АБ при

переменном токе заряда. Наиболее эффективное использование СНЭЭ происходит, если по договорным условиям выполняется ограничение потребляемой мощности не на протяжении суток (рис. 20), а только в часы пиковых нагрузок, тогда в другое время для заряда АБ доступная вся электроэнергия, ограниченная нагрузкой МКД и мощностью технологического присоединения.

Выводы (Conclusions)

Подключение СНЭЭ к какому-либо объекту городской инфраструктуры в действительности означает в большинстве случаев подключение либо к ТП, либо к одному из нескольких ВРУ. Последнее требует, пересмотр сечений питающих кабелей данного ВРУ. Охват каналами связи с СНЭЭ всех ПУЭЭ ВРУ объекта, подключенных общей секцией шин, либо ПУЭЭ на кабелях в ТП, необходим, поскольку накопитель должен получать информацию о полной нагрузке объекта. Информационная связь со второй СНЭЭ служит для согласованной работы обоих накопителей по ограничению потребляемой объектом из сети мощности и одновременно позволяет выравнивать электрические нагрузки СТ, что снижает в них потери ЭЭ. Предложенное выше размещение ПУЭЭ в ТП, обеспечивающих СНЭЭ информацией о текущей мощности объекта, позволяет сократить длину контрольных кабелей и исключить их прокладку в земле, но при этом собственник накопителей должен учитывать, что СНЭЭ будут работать в режиме разряда с некоторым перерегулированием, т.к. точками раздела балансовой принадлежности являются вводы в ВРУ, и потери мощности в питающих кабелях не будут учитываться системой управления накопителей.

Дискретность 1-5 минут съема информации серийными ПУЭЭ представляется вполне достаточной для регулирования мощности разряда накопителя на сеть. Однако этот вопрос на нормативном уровне пока не решен и требует отдельной проработки, т.к. он напрямую связан с выполнением договорных обязательств собственника СНЭЭ по выдерживанию уровня потребляемой объектом мощности в часы пиковых нагрузок.

Аварийная ситуация полного погашения подстанции 10/0,4 кВ приводит к выдаче энергии СНЭЭ всем потребителям независимо от того, куда они подключены. Их избирательное использование собственником возможно только при серьезном пересмотре схемы электроснабжения, что потребует технико-экономического обоснования.

Установка на придомовых территориях ЭЭС только начинается, но данный процесс неизбежен. В этой связи перед СНЭЭ открываются новые перспективы по их интеграции в системы городского электроснабжения, при этом необходима разработка соответствующей методики выбора параметров накопителя, которая учитывает как характеристики нагрузки городских объектов, так и специфику работы на этих территориях ЭЭС.

Литература

1. Федотов А. И. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок / А. И. Федотов, Е. А. Федотов, А. Ф. Абдуллазянов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 3-17. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. EDN BITFGX.
2. Бахтеев К. Р. Создание гибридного накопителя электроэнергии большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения промышленных потребителей / К. Р. Бахтеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 3-4. С. 36-44. EDN XWBLRR.
3. Mushid F. C. Khan M. F. Battery Energy Storage for Ancillary Services in Distribution Networks: Technologies Applications, and Deployment Challenges—A Comprehensive Review / F. C. Mushid, M. F. Khan // Energies. 2025. Vol. 18(20). Art. no 5443. DOI 10.3390/en18205443.
4. Шамарова Н. А. Анализ методов оценки уровня заряда аккумуляторных батарей / Н. А. Шамарова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 1(53). С. 24-33. EDN LOJLRC.
5. Hesse H. C. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids / H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, A. Jossen // Energies. 2017. Vol. 10. DOI 10.3390/en10122107.
6. Булатов Ю. Н. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Сулов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 5. С. 184-194. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194. EDN DUEYAC.

7. Dunn B. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices / B. Dunn, H. Kamath, J. M. Tarascon // *Science*. 2011. Vol. 334. P. 928–935.
8. Сайт журнала Energy [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.energymagazine.com.au> (дата обращения: 10.09.2025).
9. Илюшин П. В. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии / П. В. Илюшин // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2022. № 6(75). С. 64–74.
10. Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke // *Appl. Energy*. 2015. Vol. 137. P. 511–536.
11. Li J. Research on Optimal Configuration Strategy of Energy Storage Capacity in Grid-Connected Microgrid / J. Li, Y. Xue, L. Tian, X. Yuan // *Published in: Protection and Control of Modern Power Systems*. 2017. Vol. 2. Iss. 4. P. 1 7. DOI 10.1186/s41601-017-0067-8.
12. Суворов А. А. Модернизация алгоритма виртуального синхронного генератора для управления системой накопления электроэнергии в микросети / А. А. Суворов, П. В. Илюшин // *Электричество*. 2024. № 7. С. 14-29.
13. Boya M. Exploring The Methods and Future Directions of Direct Electrical Energy Storage Systems: A Systematic Review / M. Boya, K. Tekaya, U. Spaeth, B. Schmuelling // *2025 International Conference on Clean Electrical Power. ICCEP 2025*. 2025. DOI 10.1109/ICCEP65222.2025.11143769.
14. Непомнящий В. А. Новые подходы в обеспечении надежности электроснабжения потребителей электрической энергии / В. А. Непомнящий, П. В. Илюшин // *Надежность и безопасность энергетики*. 2013. № 4(23). С. 14-25. EDN PYRNRС.
15. Patsios C. An integrated approach for the analysis and control of grid connected energy storage systems / C. Patsios, B. Wu, E. Chatz Nikolaou, D. J. Rogers, N. Wade, N. P. Brandon, P. Taylor // *J. Energy Storage*. 2016. Vol. 5. P. 48–61.
16. Илюшин П. В. Анализ опыта применения систем накопления электроэнергии для повышения гибкости электроэнергетических систем / П. В. Илюшин, И. Д. Георгиевский // *Релейная защита и автоматизация*. 2024. № 3(56). С. 46-54. EDN ZCOCPI.
17. Бойко Е. Е. Роль накопителей электрической и тепловой энергии в системах энергоснабжения / Е. Е. Бойко, Ф. Л. Бык, П. В. Илюшин, Л. С. Мышкина // *Электрические станции*. 2024. № 5(1114). С. 50-57. DOI 10.34831/EP.2024.1114.5.006. EDN ANHAPD.
18. Папков Б. В. Smart grid: интеллектуальные сети - технология и применение. Часть 3 силовая электроника и хранение энергии / Б. В. Папков, П. В. Илюшин, А. Л. Куликов // *Библиотека электротехника*. 2025. № 7-8 (319-320). С. 1-151.
19. Булатов Ю. Н. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов, В. В. Кижин // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25, № 6. С. 3-13. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN HQLXTA.
20. Харитонов М. С. Оценка эффективности использования накопителя энергии для регулирования электропотребления промышленных предприятий / М. С. Харитонов, Р. В. Зубавичюс, И. Е. Кажекин // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2023. Т. 15, № 3(59). С. 70-81. EDN IXUZKW.
21. Мельников В. Д. Проблемы, перспективы применения и методика расчета нормированной стоимости накопления электрической энергии / В. Д. Мельников, Г. Б. Нестеренко, Д. Е. Лебедев [и др.] // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2019. Т. 11, № 4(44). С. 30-36. EDN CJGIUA.
22. Сердечный Д. В. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи / Д. В. Сердечный, Ю. Б. Томашевский // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19, № 9-10. С. 140-145. EDN YPSXXR.
23. Смоленцев Н. И. Результаты разработки и экспериментальных исследований накопительного комплекса с накопителем энергии СПЭНЭ-1 / Н. И. Смоленцев, В. Ю. Бондарева // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26, № 6. С. 121-131. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131. EDN EMOQFG.
24. Савина Н. В. Накопители электрической энергии как средство повышения надежности и экономичности функционирования электрической сети / Н. В. Савина, Л. Н. Лисогурская, И. А. Лисогурский // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 2-1(92). С. 63–70.
25. Токарев И. С. Определение зависимости параметров системы накопления электроэнергии от степени выравнивания графика электрических нагрузок / И. С. Токарев, Я. Э. Шклярский, Т. В. Пудкова, А. Н. Назарычев // *Электричество*. 2024. № 9. С. 45-51. DOI 10.24160/0013-5380-2024-9-45-51. EDN GCGXYH.

26. Гусев Ю. П. Влияние накопителей электроэнергии на пропускную способность распределительных сетей напряжением 6-10 кВ / Ю. П. Гусев, П. В. Субботин // Электричество. 2018. № 1. С. 13-18. DOI 10.24160/0013-5380-2018-1-13-18. EDN ZXUYUN.

27. Воронин В. А. О возможном пути развития ЭЭС России на базе широкого использования накопителей энергии / В. А. Воронин, Д. Р. Любарский, С. Н. Макаровский, В. Н. Подъячев // Электрические станции. 2012. № 5. С. 14-19. EDN OYOLHT.

28. Солюянов Ю. И., Федотов А. И., Галицкий Ю. Я., и др. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан / Ю. И. Солюянов, А. И. Федотов, Ю. Я. Галицкий и др. // Электричество. 2021. № 6. С. 62-71. DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71. EDN RRSRRX.

29. Солюянов Ю. И. Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области / Ю. И. Солюянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин и др. // Электричество. 2023. № 7. С. 52-65. DOI 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. EDN IQAFRE.

30. Солюянов Ю. И. Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков / Ю. И. Солюянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин и др. // Электричество. 2024. № 4. С. 36-50. DOI 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50.

31. Солюянов Ю. И. Выбор зарядных станций, согласованный с действующими системами электроснабжения многоквартирных домов и образовательных учреждений мегаполиса / Ю. И. Солюянов, А. И. Федотов, В. И. Солюянов и др. // Электричество. 2025. № 1. С. 32-44. DOI 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44. EDN HOCOCV.

32. Федотов А. И. Совершенствование расчета электрической нагрузки многоквартирных домов по их удельной мощности / А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин, Е. А. Федотов и др. // Электричество. 2025. № 5. С. 28-38. DOI 10.24160/0013-5380-2025-5-28-38. EDN XBSYUC.

Авторы публикации

Солюянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, заслуженный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент ООО Ассоциация «РЭМ», г. Москва, Россия, председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж». solyanov39@mail.ru

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. evfedotov2008@mail.ru

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, заслуженный профессор Казанского государственного энергетического университета, профессор кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>. fed.ai@mail.ru

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>. ahmetshin.ar@mail.ru

Солюянов Владимир Иванович – ст. науч. сотр. ООО Ассоциация «РЭМ», г. Москва, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>. vs@tatem.ru

References

1. Fedotov A. I. Use of electrochemical energy storage devices in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power plants / A. I. Fedotov, E. A. Fedotov, A. F. Abdullazyanov // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2021. Vol. 23, No. 1. pp. 3-17. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. EDN BITFGX.

2. Bakhteyev K. R. Creation of a high-power hybrid energy storage device to prevent short-term power supply outages for industrial consumers / K. R. Bakhteyev // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2018. Vol. 20, No. 3-4. pp. 36-44. EDN XWBLRR.

3. Mushid F. C. Khan, M. F. Battery Energy Storage for Ancillary Services in Distribution Networks: Technologies Applications, and Deployment Challenges—A Comprehensive Review / F. C. Mushid, M. F. Khan // Energies. 2025. Vol. 18(20). Art. no. 5443. DOI 10.3390/en18205443.

4. Shamarova N. A. Analysis of methods for assessing the charge level of batteries / N. A. Shamarova // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2022. Vol. 14, No. 1(53). Pp. 24-33. EDN LOJLRC.
5. Hesse H. C. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids / H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, A. Jossen // Energies. 2017. Vol. 10. DOI 10.3390/en10122107.
6. Bulatov Yu. N. Study of Operating Modes of an Isolated Power Supply System with Controlled Distributed Generation Units, Electric Power Storage Systems, and a Motor Load / Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov, K. V. Suslov // News of Higher Educational Institutions. Problems of Energy. 2021. Vol. 23, No. 5. pp. 184-194. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194. EDN DUEYAC.
7. Dunn B. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices / B. Dunn, H. Kamath, J. M. Tarascon // Science. 2011. Vol. 334. P. 928–935.
8. Energy magazine website [Electronic resource]. – URL: <http://www.energymagazine.com.au> (accessed: 10.09.2025).
9. Ilyushin P. V. Improving the reliability of distribution electric networks through the efficient use of electricity storage systems / P. V. Ilyushin // Electric Power. Transmission and Distribution. 2022. No. 6 (75). P. 64–74.
10. Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke // Appl. Energy. 2015. Vol. 137. P. 511–536.
11. Li J. Research on Optimal Configuration Strategy of Energy Storage Capacity in Grid-Connected Microgrid / J. Li, Y. Xue, L. Tian, X. Yuan // Published in: Protection and Control of Modern Power Systems. 2017. Vol. 2. Iss. 4. P. 1 7. DOI 10.1186/s41601-017-0067-8.
12. Suvorov A. A. Modernization of the virtual synchronous generator algorithm for controlling the electric power storage system in a microgrid / A. A. Suvorov, P. V. Ilyushin // Electricity. 2024. No. 7. Pp. 14-29.
13. Boya M. Exploring the Methods and Future Directions of Direct Electrical Energy Storage Systems: A Systematic Review / M. Boya, K. Tekaya, U. Spaeth, B. Schmuelling // 2025 International Conference on Clean Electrical Power. ICCEP 2025. 2025. DOI 10.1109/ICCEP65222.2025.11143769.
14. Nepomnyashchy V. A. New approaches to ensuring the reliability of power supply to consumers of electrical energy / V. A. Nepomnyashchy, P. V. Ilyushin // Reliability and safety of energy. 2013. No. 4(23). Pp. 14-25. EDN PYRNRC.
15. Patsios C. An integrated approach for the analysis and control of grid-connected energy storage systems / C. Patsios, B. Wu, E. Chatzinikolaou, D. J. Rogers, N. Wade, N. P. Brandon, P. Taylor // J. Energy Storage. 2016. Vol. 5. Pp. 48–61.
16. Ilyushin P. V. Analysis of the experience of using energy storage systems to increase the flexibility of electric power systems / P. V. Ilyushin, I. D. Georgievskiy // Relay protection and automation. 2024. No. 3(56). P. 46-54. EDN ZCOCPI.
17. Boyko E. E. The role of electric and thermal energy storage devices in power supply systems / E. E. Boyko, F. L. Byk, P. V. Ilyushin, L. S. Myshkina // Electric stations. 2024. No. 5(1114). P. 50-57. DOI 10.34831/EP.2024.1114.5.006. EDN ANHAPD.
18. Papkov B. V. Smart grid: intelligent networks - technology and application. Part 3. power electronics and energy storage / B. V. Papkov, P. V. Ilyushin, A. L. Kulikov // Library of electrical engineering. 2025. No. 7-8 (319-320). P. 1-151.
19. Bulatov Yu. N. Coordinated control of electricity storage units and a distributed generation unit with predictive controllers in a power supply system with reduced power quality / Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov, K. V. Suslov, V. V. Kizhin // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2023. Vol. 25, No. 6. P. 3-13. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN HQLXTA.
20. Kharitonov M. S. Evaluation of the efficiency of using energy storage to regulate electricity consumption of industrial enterprises / M. S. Kharitonov, R. V. Zubavichyus, I. E. Kazhekin // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2023. Vol. 15, No. 3(59). Pp. 70-81. EDN IXUZKW.
21. Melnikov V. D. Problems, prospects of application and methodology for calculating the standardized cost of electrical energy storage / V. D. Melnikov, G. B. Nesterenko, D. E. Lebedev [et al.] // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2019. Vol. 11, No. 4(44). Pp. 30-36. EDN CJGIUA.
22. Serdechny D. V. Features of Operation of an Energy Storage Unit Based on a Multi-Element Lithium-Ion Battery / D. V. Serdechny, Yu. B. Tomashevsky // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. 2017. Vol. 19, No. 9-10. Pp. 140-145. EDN YPSXXR.
23. Smolentsev N. I. Results of the Development and Experimental Studies of the Storage Complex with the SPENE-1 Energy Storage Unit / N. I. Smolentsev, V. Yu. Bondareva // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. 2024. Vol. 26, No. 6. Pp. 121-131. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131. EDN EMOQFG.

24. Savina N. V. Electric energy storage devices as a means of increasing the reliability and efficiency of electrical grid operation / N. V. Savina, L. N. Lisogurskaya, I. A. Lisogursky // International Research Journal. 2020. No. 2-1 (92). Pp. 63–70.

25. Tokarev I. S. Determining the dependence of the parameters of an electric energy storage system on the degree of alignment of the electrical load schedule / I. S. Tokarev, Ya. E. Shklyarsky, T. V. Pudkova, A. N. Nazarichev // Electricity. 2024. No. 9. Pp. 45–51. DOI 10.24160/0013-5380-2024-9-45-51. EDN GCGXYH.

26. Gusev Yu. P. The Impact of Electric Power Storage Devices on the Capacity of 6-10 kV Distribution Networks / Yu. P. Gusev, P. V. Subbotin // Electricity. 2018. No. 1. pp. 13-18. DOI 10.24160/0013-5380-2018-1-13-18. EDN ZXYUYN.

27. Voronin V. A. On a Possible Path of Development of the Unified Energy System of Russia Based on the Widespread Use of Energy Storage Devices / V. A. Voronin, D. R. Lyubarsky, S. N. Makarovskiy, V. N. Pod'yachev // Electric Power Stations. 2012. No. 5. pp. 14-19. EDN OYOLHT.

28. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Galitsky Yu. Ya., et al. Updating the standard values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, Yu. Ya. Galitsky, et al. // Electricity. 2021. No. 6. pp. 62-71. DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71. EDN RRSRRX.

29. Soluyanov Yu. I. Updating the specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, et al. // Electricity. 2023. No. 7. pp. 52-65. DOI 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. EDN IQAFRE.

30. Soluyanov Yu. I. Analysis of specific electrical loads of cottage villages / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, et al. // Electricity. 2024. No. 4. pp. 36-50. DOI 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50.

31. Soluyanov Yu. I. Selection of charging stations, coordinated with the existing power supply systems of apartment buildings and educational institutions of a megalopolis / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, V. I. Soluyanov, et al. // Electricity. 2025. No. 1. P. 32-44. DOI 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44. EDN HOCOCV.

32. Fedotov A. I. Improving the calculation of the electrical load of apartment buildings based on their specific power / A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, E. A. Fedotov, et al. // Electricity. 2025. No. 5. P. 28-38. DOI 10.24160/0013-5380-2025-5-28-38. EDN XBSYUC.

Authors of the publication

Yuri I. Soluyanov – LLC "Association REM", Moscow, Russia. soluyanov39@mail.ru

Eugenii A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. evfedotov2008@mail.ru

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>. fed.ai@mail.ru

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>. ahmetshin.ar@mail.ru

Vladimir I. Soluyanov – LLC "Association REM", Moscow, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>. vs@tatem.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 25.08.2025 г.

Отредактировано 24.09.2025 г.

Принято 15.10.2025 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 62-67

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД В КОТЛОАГРЕГАТЕ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ Е-75-3,9-440 ДФТ

Терехин А.П., Марьяндышев П.А.

Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия
Terehin.a@edu.narfu.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке рекомендаций для эффективного энергетического использования осадка сточных вод в котлоагрегатах с пузырьковым кипящим слоем. ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы энергетического использования осадка сточных вод. Провести энергообследование котлоагрегата с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ при сжигании осадка сточных вод совместно с древесными отходами целлюлозно-бумажного производства. Проведение теплотехнического анализа осадка сточных вод и древесных отходов. Проведение элементного анализа материала кипящего слоя. МЕТОДЫ. Образцы осадка сточных вод и древесных отходов были отобраны на тракте топливоподачи котла Е-75-3,9-440 ДФТ. Для подготовки проб использовались шаровая барабанная мельница РМ 200 фирмы Retzsch и ситовый анализатор Retzsch AS 200 Control. Элементный анализ осадка сточных вод был проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Метод идентифицирует металлы и элементы объекта путем детектирования их энергетических сигнатур. Содержание водорода, азота и углерода определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000. Теплотворная способность исследуемых образцов была определена с помощью калориметра ИКА С 2000 Basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25. Энергетические обследования проводились при установившемся тепловом режиме котлоагрегата. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты исследований показали, что в процессе сжигания осадка сточных вод в котле с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ условия его работы сильно отличаются от расчетных, что связано с проблемами шлакования, эрозии из-за высокой зольности осадка, а также проблем, связанных с эксплуатацией кипящего слоя из-за высокой влажности топлива. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Даны рекомендации по повышению энергетической эффективности сжигания осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ.

Ключевые слова: осадок сточных вод; кипящий слой; котлоагрегат; энергоэффективность; биомасса.

Благодарности: Исследование, приведшее к этим результатам, финансировалось за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007. Авторы выражают признательность АО «Архангельский ЦБК» за помощь в проведении энергетического обследования парового котла с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ.

Для цитирования: Терехин А.П., Марьяндышев П.А. Проблемы энергетического использования осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 106-117. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117.

PROBLEMS OF SEWAGE SLUDGE ENERGY UTILIZATION IN A FLUIDIZED BED BOILER E-75-3,9-440 DFT

Terekhin A.P., Maryandyshev P.A.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
Terehin.a@edu.narfu.ru

Abstract: *RELEVANCE* of the study means the recommendations development for the efficient energy utilization of sewage sludge in the fluidized bed boilers. *THE PURPOSE.* To consider problems of energy utilization of sewage sludge. Conduct an energy audit of the fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT during the combustion of sewage sludge together with wood waste from pulp and paper industry. Conducting a proximate analysis of sewage sludge and wood waste. Conducting an elemental analysis of the fluidized bed material. *METHODS.* Samples of sewage sludge and wood waste were taken from the fuel supply line of boiler E-75-3,9-440 DFT. Retzsch RM 200 ball drum mill and a Retzsch AS 200 Control sieve analyzer were used to prepare samples. Ultimate analysis of sewage sludge was performed by X-ray fluorescence spectroscopy on an EDX-8000 spectrometer. This method identifies metals and elements of the sample by detecting their energy signatures. Hydrogen, nitrogen and carbon content was determined using the EuroVector EA-3000 analyzer. Calorific value of the studied samples was determined using an IKA C 2000 Basic Version 2 calorimeter with a LOIP FT-216-25 liquid cryothermostat. Energy audits were carried out under the established thermal regime of the boiler. *RESULTS.* Research results have shown that during the combustion of sewage sludge in a fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT operating conditions are very different from the calculated ones, which is associated with the problems of slag formation, erosion due to the high ash content of the sludge, as well as problems associated with the operation of the fluidized bed due to the high humidity of the fuel. *CONCLUSION.* Recommendations are given on improving the energy efficiency of wastewater sludge combustion in a fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT.

Keywords: sewage sludge; fluidized bed; boiler; energy efficiency; biomass.

Acknowledgments: The Ministry of Science funded Research that led to these results and Higher Education of the Russian Federation, project № FSRU-2024-0007. Authors express their gratitude to Arkhangelsk Pulp and Paper Mill JSC for their assistance in conducting an energy survey of a fluidized bed steam boiler E-75-3,9-440 DFT.

For citation: Terekhin A.P., Maryandyshev P.A. Problems of sewage sludge energy utilization in a fluidized bed boiler E-75-3,9-440 DFT. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 106-117. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-106-117.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Традиционные виды топлива, такие как природный газ и уголь, обеспечивают значительную долю мировой выработки электроэнергии. Постепенное снижение запасов ископаемых топлив увеличивает интерес к получению энергии из вторичных энергоресурсов, таких как биомасса и различные отходы. Использование вторичных энергоресурсов имеет как ряд преимуществ, таких как снижение выбросов CO₂ при сжигании биомассы, снижение зависимости от ограниченных запасов ископаемого топлива, так и ряд недостатков – низкую теплотворную способность, высокую влажность и зольность [1, 12, 3, 4].

Часто, в качестве вторичных энергоресурсов, можно использовать для производства энергии отходы или побочные продукты производств [5]. В настоящее время в мире производится огромное количество осадка сточных вод, так, например, в Китае производство осадка составляет 12 миллионов тонн в год, в ЕС 10,3 миллиона тонн в год, а в Индии 2,3 миллиона тонн в год [6, 7]. Осадок сточных вод (ОСВ) – это основной вид отходов, образующихся в процессе очистки производственных и городских сточных вод, который содержит не только большое количество органических веществ, но и тяжелые металлы, органические загрязнители и патогенные микроорганизмы. В настоящее время осадок утилизируют несколькими способами. Наиболее распространёнными способами являются: сжигание, использование в сельском хозяйстве,

захоронение на полигонах и мелиорация [7-10]. Однако эти методы, за исключением метода сжигания, ограничены из-за большого спроса на земельные участки и высокой стоимости утилизации [6]. Основная проблема при сжигании осадка заключается в высоком содержании золы и довольно сложном её составе, который обычно включает большое количество фосфора, кремния, железа, кальция, алюминия и серы. Это может привести к серьёзным проблемам, связанным с выбросами вредных веществ, шлакованием и агломерацией [11].

Сжигание осадка изучалось во многих работах [11-18]. Так в [12] авторы моделировали установку для переработки 400 тонн осадка в день путем его сушки и сжигания и пришли к выводу, что энергетический баланс сушки и сжигания осадка достигается при 50-60% влажности. В [11] Ханнл и соавторы изучали совместное сжигание в псевдооживленном слое осадка сточных вод с сельскохозяйственными отходами, авторам удалось добиться стабильной работы установки по сжиганию при температуре около 950°C, однако это вызвало агломерацию материала слоя. Большинство исследований [11, 15-18] сосредоточены на эффективности сжигания осадка в кипящем слое.

Кипящий или псевдооживленный слой – это система, в которой твёрдые частицы находятся во взвешенном состоянии и ведут себя как жидкость при воздействии потока воздуха определённой скорости. Ключевыми преимуществами кипящих слоёв являются высокая интенсивность смешивания и высокая теплопередача. Эти уникальные свойства псевдооживленных слоёв определяют широкий спектр их применения, например, в газификации и сжигании. Сжигание в кипящем слое также признано экологически более эффективным способом сжигания твёрдого топлива, такого как уголь, биомасса и отходы. Добавление различных добавок в кипящий слой улучшает смешивание и интенсивность турбулентности, снижая выбросы загрязняющих веществ и повышая эффективность сжигания [19-22].

Целью данной работы является рассмотрение проблем, возникающих при сжигании осадка сточных вод в котлоагрегате с кипящим слоем, в котором осадок сжигается совместно с кородревесными отходами. Для этого изучены теплотехнические характеристики, элементный состав осадка сточных вод и проведена оценка эффективности его энергетического использования в котельном агрегате с пузырьковым кипящим слоем – Е-75-3,9-440 ДФТ, установленном на ТЭС-3 АО Архангельский ЦБК.

Материалы и методы (Materials and methods)

Получение осадка сточных вод на Архангельском ЦБК происходит на производстве биологической очистки в количестве около 11-13 тонн осадка в час. В состав этого производства входит оборудование для очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод целлюлозно-бумажного предприятия (~97% от общего объема сточных вод) и хозяйственно-бытовых сточных вод города населением около 35 тыс. человек (~3% от общего объема сточных вод). Получение осадка из сточных вод состоит из следующих стадий: механической очистки, насыщение кислородом, биологической очистки в три ступени на биореакторе и аэротенках. Избыточный активный ил и осадок от механической очистки сточных вод направляются для уплотнения на илоуплотнители и далее на обезвоживание на декантерные центрифуги. Далее осадок сточных вод грузовыми машинами вывозится на сжигание.

Образцы осадка сточных вод были отобраны из бункера подачи осадка на топливоподачу котла Е-75-3,9-440 ДФТ. Образцы кородревесных отходов были отобраны с конвейера, подающего кородревесные отходы в топливный бункер Е-75-3,9-440 ДФТ. Для определения зольности и низшей теплоты сгорания образцы были подвергнуты размолу в шаровой барабанной мельнице РМ 200 фирмы Retzsch, просеяны на ситовом анализаторе Retzsch AS 200 Control до гранулометрического состава от 63 до 125 мкм. Дополнительной сушке образцы не подвергались, так как происходила фактическая сушка при размолу и просеивании топлива. Отбор первичных проб топливной смеси, формирование объединенных проб, их сокращение, измельчение и деление выполнялись в полном соответствии с действующими ГОСТ 33563-2015, ГОСТ Р 54187-2010, ГОСТ 33255-2015, ГОСТ 33104-2014. Элементный анализ осадка сточных вод был проведен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на спектрометре EDX-8000. Метод идентифицирует металлы и элементы объекта путем детектирования их энергетических сигнатур. Содержание водорода, азота и углерода определено с помощью анализатора EuroVector EA-3000. Теплотворная способность исследуемых образцов была определена с помощью калориметра ИКА С 2000 Basic Version 2 с жидкостным криотермостатом LOIP FT-216-25. Результаты теплотехнического анализа представлены в таблице 1. Элементный

анализ осадка представлен в таблице 2.

Энергетические обследования проводились при установившемся тепловом режиме котлоагрегата. Нагрузка, давление пара, температура перегрева, коэффициент избытка воздуха, температура питательной воды и подача ее в котел выдерживались примерно постоянными. Кроме того, чтобы избежать потерь тепла на неустоявшийся режим работы, обследование котельных агрегатов проводили не ранее чем через 48 часов работы с нагрузкой, близкой к той, на которой предполагалось делать испытание. В течение последних трех часов перед началом опыта нагрузка отличалась не более, чем на 5%. Обдувка поверхностей нагрева была проведена за 3 часа до начала испытаний. Параметры пароводяного, газозвдушного трактов и температуру кипящего слоя котлов измеряли с помощью стационарных эксплуатационных расходомеров и термопар.

Таблица 1
Table 1

Результаты теплотехнического анализа древесных отходов и осадка сточных вод
Results of thermal analysis of wood waste and sewage sludge

Топливо	Влажность рабочей массы	Летучие вещества горючей массы	Зольность на сухую массу	Низшая теплота сгорания на рабочую массу
Лиственные отходы	53,95%	79,48%	1,72%	8426 кДж/кг
Осадок сточных вод	75,97%	77,94%	17,98%	1843 кДж/кг

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

Как видно из таблицы 1, сжигаемое топливо обладает крайне высокой влажностью, низкой теплотворной способностью и высоким выходом летучих веществ. Высокая зольность осадка говорит о том, что в сжигаемой топливной смеси зола осадка оказывает главное влияние на работу кипящего слоя.

Таблица 2
Table 2

Результаты элементного анализа осадка сточных вод, %
Results of elemental analysis of sewage sludge, %

C	H	N	O	S	Cl	Cu
35,600	6,100	2,400	50,500	0,830	0,200	0,004
Cr	Mn	Ti	Zn	Sr	Al	P
0,002	0,080	0,017	0,031	0,011	0,508	0,245
V	Mg	Si	K	Ca	Na	Fe
0,004	0,154	0,661	0,104	2,170	0,260	0,256

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

Как показано в таблице 2 проба осадка сточных вод содержала высокое количество кальция, кремния, алюминия и фосфора. Осадок также отличается повышенным содержанием щелочных элементов – натрия и калия.

Паровой котел с пузырьковым кипящим слоем Е-75-3,9-440 ДФТ (рис. 1) стационарный, водотрубный, с естественной циркуляцией, с уравновешенной тягой, газоплотный, трехходовой по дымовым газам предназначен для совместного сжигания кородеревесных отходов с осадком сточных вод. Топка, переходный горизонтальный газоход, опускающий газоход и отдельно стоящий конвективный газоход составляют основной блок котла. На фронтальной стене топки установлены две топливные точки. Размеры топки котла составляют: ширина – 6,35 м, глубина – 5,85 м, высота – 17,95 м. Поперечное сечение топки – 37,14 м². В нижней части котла расположена камера сжигания, которая состоит из воздухоподогревающей решетки "НУВЕХ", слоя инертного материала (кварцевый песок) в количестве 60 тонн и обмуровки. Решетка кипящего слоя состоит из водоохлаждаемых труб диаметром 60,3x7,1 мм, сваренных в форме балки с шагом 304,8 мм, а также из стальных листов толщиной 6 мм, соединяющих их. Первичный воздух вводится в конец воздушных балок со стороны заднего экрана и через дутьевые сопла, установленные на балках, в топку. Неподвижный песок, располагающийся ниже сопел первичного воздуха, защищает балки от эрозии. Для подачи вторичного воздуха на боковых стенах топки над уровнем футеровки расположена

система воздушных сопел с устройствами регулирования напора воздуха. Подача вторичного воздуха через воздушные сопла в топку котла производится вентилятором ВД – 15,5.

Пароперегреватель первой ступени ширмовый, трехзаходный, с коридорным расположением труб. Пароперегреватель второй ступени ширмовый с двухзаходным, коридорным расположением труб. Между первой и второй ступенью производится впрыск собственного конденсата для охлаждения перегретого пара. Водяной экономайзер состоит из двух ступеней, которые выполнены из гладкотрубных двухзаходных змеевиков с коридорным расположением труб. Воздухоподогреватель состоит из двух ступеней: первичного воздуха и вторичного воздуха.

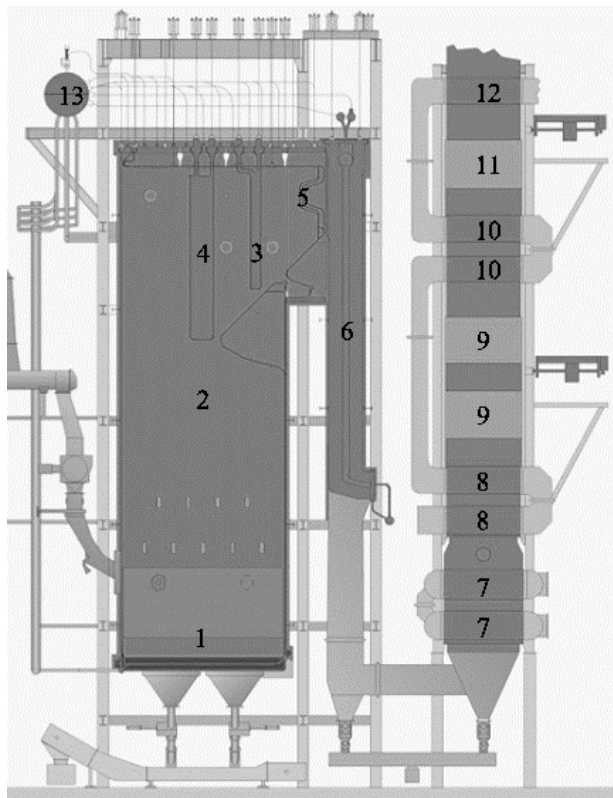


Рис. 1. E-75-3,9-440 ДФТ. 1 – Решетка кипящего слоя; 2 – Топка; 3 – Пароперегреватель 1 ступени; 4 – Пароперегреватель 2 ступени; 5 – Фестон; 6 – Испарительные ширмы; 7, 8, 10, 12 – Воздухоподогреватель; 9, 11 – Водяной экономайзер; 13 – Барабан

Fig. 1. E-75-3,9-440 DFT. 1 – Fluidized bed grate; 2 – Furnace; 3 – Superheater 1st stage; 4 – Superheater 2nd stage; 5 – Festoon; 6 – Evaporation screens; 7, 8, 10, 12 – Air heater; 9, 11 – Water economizer; 13 – Drum

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

Результаты (Results)

На котельном агрегате E-75-3,9-440 ДФТ проведено два испытания. Котел работал на смеси из листовенной коры и осадка сточных в режиме пузырькового кипящего слоя, производительностью 60-62 тонны перегретого пара в час при давлении 3,6 МПа и температуре перегретого пара 420°C. Доля осадка сточных вод в топливной смеси составляла 25%. КПД котла во время опытов составлял 83,5-84,0%.

В таблице 3 представлены результаты обследования пароводяного тракта котлоагрегата E-75-3,9-440 ДФТ. Температура питательной воды в обоих опытах была 105°C. Нагрев воды после экономайзера 1 ступени и конденсатора собственных нужд составлял 24°C и 21°C, после 2 ступени экономайзера 57°C и 55°C, парообразования в экономайзере не происходило.

Перегрев пара у котлоагрегата E-75-3,9-440 ДФТ после 1 ступени пароперегревателя составлял 168-173°C, после второй ступени 109-110°C, в впрыскивающем пароохладителе между 1 и 2 ступенями пароперегревателя охлаждение пара составило 87-95°C.

Таблица 3
Table 3Результаты обследования пароводяного тракта Е-75-3,9-440 ДФТ
Results of the steam-water tract inspection E-75-3,9-440 DFT

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Паропроизводительность	т/ч	60	62
Давление перегретого пара	МПа	3,6	3,6
Температура перегретого пара	°С	420	422
Расход питательной воды	т/ч	65	66
Температура питательной воды	°С	105	105
Температура питательной воды после конденсатора	°С	118	115
Температура питательной воды после 1 ст. ВЭ	°С	129	126
Температура питательной воды после 2 ст. ВЭ	°С	186	181
Температура насыщенного пара в барабане	°С	232	232
Температура перегретого пара после 1 ст. ПП	°С	405	400
Температура перегретого пара после пароохладителя	°С	310	313

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

В таблице 4 представлены результаты мониторинга параметров газозвдушного тракта котла.

Доля воздуха, идущего на ожижение слоя составляла 41-45%. Кипящий слой работал в режиме газификации топлива. Данный режим работы с недостатком кислорода в слое снижает образование оксидов азота, образующихся из азотистых соединений топлива. Полное окисление вредных выбросов и эффективное дожигание горючих компонентов топлива происходило с помощью вторичного и третичного воздуха в надслоевом пространстве.

Температуры первичного и вторичного воздуха на котлоагрегате Е-75-3,9-440 ДФТ во время проведения испытаний была намного ниже режимных параметров (по режимной карте температура первичного воздуха составляет 250-350°С, вторичного воздуха 270-330°С). Нагрев вторичного воздуха во 2 блоке воздухоподогревателя второй ступени составляет всего 10°С (проектный нагрев 40°С). Температура вторичного воздуха на 40°С ниже режимного показателя. Также в конвективных газоходах наблюдались большие температурные разверки.

Таблица 4
Table 4Результаты обследования газозвдушного тракта Е-75-3,9-440 ДФТ
Results of the gas-air tract inspection E-75-3,9-440 DFT

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Расход первичного воздуха	м ³ /с	15,77	13,39
Температура первичного воздуха	°С	205	213
Расход вторичного воздуха	м ³ /с	18,89	18,89
Температура вторичного воздуха после калорифера	°С	84	83
Температура вторичного воздуха после 1 секции ВЗП 1 ступени	°С	152	152
Температура вторичного воздуха после 2 секции ВЗП 1 ступени	°С	162	164
Температура вторичного воздуха после ВЗП 2 ступени	°С	261	265
Температура воздуха на всас вентилятора первичного воздуха	°С	23	49
Температура воздуха на всас вентилятора вторичного воздуха	°С	18	18
Расход дымовых газов рециркуляции	м ³ /с	0	2,67
Доля воздуха на ожижение кипящего слоя	%	0,45	0,41
Содержание кислорода на выходе из топки	%	8,0	7,8
Разряжение в топке (слева/справа)	Па	-0,4	-0,5
Разряжение до испарительных ширм (слева/справа)	Па	-0,2	-0,6
Разряжение до ВЗП первичного воздуха (слева/справа)	Па	-10,0	-10,0

Разряжение до 2 ст. ВЭ (слева/справа)	кПа	-2,50/-2,50	-2,50/-2,50
Разряжение до ВЗП ВВ (слева/справа)	кПа	-2,06/-2,50	-2,0,0/-2,50
Разряжение до 1 ст. ВЭ (слева/справа)	кПа	-2,50/-2,50	-2,5,0/-2,50
Разряжение до ЭФ	кПа	-2,50	-2,50
Разряжение после ЭФ	кПа	-3,73	-3,76
Температура дымовых газов:			
До ПП 2 ст. (слева/справа)	°С	650/697	687/719
До ПП 1 ст. (слева/справа)	°С	451/676	461/695
До испарительных ширм (слева/справа)	°С	651/565	649/579
До ВЗП ВП (слева/справа)	°С	453/451	460/457
До 2 ст. ВЗП ВВ (слева/справа)	°С	356/289	361/300
До 2 ст. ВЭ (слева/справа)	°С	316/259	320/270
До 1 ст. ВЗП ВВ (слева/справа)	°С	240/219	243/223
До 1 ст. ВЭ (слева/справа)	°С	210/189	218/194
До 1 ст. ВЗП ВВ (слева/справа)	°С	182/126	185/127
До ЭФ	°С	171	173
После ЭФ	°С	141	143

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

В таблице 5 представлены результаты мониторинга параметров кипящего слоя. При обследовании обнаружили, что в задней части котла дренируемые агломераты достигали размеров 200х300 мм (рис. 2).

Таблица 5
Table 5

Результаты обследования кипящего слоя Е-75-3,9-440 ДФТ
Fluidized bed survey results E-75-3,9-440 DFT

Параметр	Ед. изм.	Номер обследования	
		№1	№2
Температура кипящего слоя в точках (верхняя/нижняя термопара):			
Передняя левая воронка	°С	829/825	887/883
Задняя левая воронка	°С	806/810	873/877
Задняя правая воронка	°С	761/789	817/857
Передняя правая воронка	°С	804/824	881/884

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

Так как донная зола с котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ содержала большое количество агломератов, с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии выполнили элементный анализ образца донной золы отобранного в процессе обследования. Результаты элементного анализа представлены в таблице 6.

Таблица 6
Table 6

Результаты элементного анализа донной золы котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ
Results of elemental analysis of boiler bottom ash E-75-3,9-440 DFT

SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	NiO	ZnO	MgO	Rb ₂ O
0,109	0,267	13,7	0,003	0,057	0,734	0,003
Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	SrO	N	C	H
0,019	0,23	0,013	0,059	0,1	0,254	0,1
K ₂ O	TiO ₂	BaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
2,08	0,123	0,243	81,1	1,05		

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



Рис. 2. Агломераты, обнаруженные в донной золе котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ *Fig. 2. Agglomerates found in the bottom ash of boiler unit E-75-3,9-440 DFT*

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

Обсуждение (Discussions)

Сжигание осадка сточных вод в котле Е-75-3,9-440 ДФТ приводит к изменениям условий его работы от номинальных параметров. Это связано как с изменением нагрузок котлов, работающих совместно с исследуемым в одну паровую магистраль, так и с колебаниями температуры питательной воды, изменением качества топлива и параметров газоздушного режима котлоагрегата. Однако основное влияние на отклонение параметров работы котла от номинальных являются сложности, возникающие из-за высокой влажности и зольности осадка.

Результаты энергообследования показали, что при энергетической утилизации осадка сточных вод возникают проблемы, связанные со шлакованием конвективных поверхностей нагрева. Это приводило к низкому тепловосприятию водяного экономайзера, где питательная вода не нагревалась до минимального режимного значения (190°C). Воздухоподогреватель также не обеспечивал необходимый нагрев первичного и вторичного воздуха до режимных параметров, что приводило к снижению температуры кипящего слоя и температуры в надслоевом пространстве.

В процессе обследования котла было обнаружено, что температура дымовых газов по правой стороне была значительно ниже, вместе с тем дымосос котлоагрегата был нагружен на 100%, а нагрузка котла была ниже номинальной на 20%. При останове котлоагрегата в ремонт было обнаружено, что правая сторона переходного газохода (между 2 и 3 газоходами) и правая воронка под испарительными ширмами были сильно зашлакованы вследствие цементирования золы. Явление цементации золы возникло из-за повышенной влажности дымовых газов, ввиду высокой влажности сжигаемой смеси и появления свища на испарительных ширмах, причиной образования которого послужил эрозийный износ золой осадка сточных вод.

Дымосос котлоагрегата Е-75-3,9-440 ДФТ во время опытов был нагружен на 100 процентов, при этом котел работал с задымлением и выбиванием дымовых газов в помещение котельной, тяги не хватало. Причиной является как сильное шлакование и загрязнение поверхностей нагрева летучей золой, так и повышенный расход топлива из-за сжигания низкокалорийного влажного топлива.

При мониторинге температуры кипящего слоя и визуальном осмотре донной золы котлоагрегата отметили, что температура в передней левой части котла значительно выше, чем в остальных точках. Температура кипящего слоя в правой задней части котла была на 40-56°C ниже, чем в левой задней точке. Визуально донная зола с передних точек котла содержала мало агломератов. Согласно [22] на скорость укрупнения донной золы, образование агломератов и дефлюидизацию слоя влияет содержание калия и натрия в золе топлива, а именно превышение их суммарного содержания в слое свыше 1% [22]. В исследуемой донной золе содержание натрия и калия составило более 2 процентов. При высоком содержании калия рекомендуется увеличить количество дренируемого материала слоя и количество засыпаемого свежего кварцевого песка.

Выводы (Conclusions)

Исследован процесс сжигания осадка сточных вод в котлоагрегате Е-75-3,9-440 ДФТ. Результаты показали, что котлоагрегат с кипящим слоем обеспечивает эффективное энергетическое использование осадка сточных вод (КПД котлоагрегата во время обоих опытов был свыше 80%). При этом продолжительное сжигание осадка привело к следующим трудностям в работе котла:

1. Высокая зольность осадка сточных вод приводит к сильному шлакованию и загрязнению конвективных поверхностей нагрева летучей золой.

2. Высокая влажность осадка сточных вод приводит к увеличению расхода топлива, что в совокупности со шлакованием испарительных ширм приводит к максимальной нагрузке дымососа даже при 80% нагрузке котла по пару.

3. Использование кипящего слоя для сжигания осадка сточных вод приводит к агломерации частиц золы с кварцевым песком.

Для улучшения энергетической эффективности котлоагрегата необходимо:

1. Расшлаковать конвективные поверхности нагрева Е-75-3,9-440 ДФТ для увеличения тепловосприятости воздухоподогревателей вторичного и первичного воздуха. Это позволит стабилизировать режим горения, снизить расход топлива и уменьшить эрозионный износ труб испарительных ширм.

2. Увеличить интенсивность смешивания вторичного и третичного воздуха с продуктами сгорания. Данное мероприятие даст возможность снизить расход вторичного воздуха, повысить КПД котельного агрегата.

3. Увеличить дренаж материала слоя и добавку свежего кварцевого песка на Е-75-3,9-440 ДФТ для устранения агломерации материала слоя.

Литература

1. Макеева Е.Н., Зверева Э.Р., Морозова О.Ю. Перевод котельных на альтернативное топливо // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117.

2. Singh, V., Nimalipuri, P., Das, H. C., & Vitankar, V. (2025). An Eulerian-Eulerian multifluid simulation for co-combustion of coal and sawdust in industrial scale circulating fluidized bed boiler. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100169>

3. Patro, B. (2016). Efficiency studies of combination tube boilers. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 193–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.007>

4. Sekyere, C. K. K., Opoku, R., Asaaga, B., Baah, B., Andoh, P. Y., Obeng, G. Y., & Agbogla, J. (2025). Techno-environmental assessment of the fuel properties of a variety of briquettes for biomass boiler applications. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100185>

5. Petrovič, A., Cenčič Predikaka, T., Parlov Vuković, J., Jednačak, T., Hribernik, S., Vohl, S., Urbanel, D., Tišma, M., & Čuček, L. (2024). Sustainable hydrothermal co-carbonization of residues from the vegetable oil industry and sewage sludge: Hydrochar production and liquid fraction valorisation. *Energy*, 307, 132760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132760>

6. Shen, X., Yan, H., Shi, J., Tan, Y., Yang, H., Hu, H., & Li, S. (2025). Experimental investigation on smoldering combustion for sewage sludge treatment: Influence of key parameters and self-sustaining limit. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105673>

7. Jobodwana, L., & Sithole, N. T. (2025). From waste to resource: Cleaner production of geopolymers from sewage sludge via production parameter optimization. *Construction and Building Materials*, 489, 142341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142341>

8. Wilk, M., Śliz, M., & Lubieniecki, B. (2021). Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and fuel additives: Combustion performance of hydrochar. *Renewable Energy*, 178, 1046–1056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.101>

9. Corre, S., Gorete Ribeiro Domingos, M. E., Florez-Orrego, D., Magnaval, G., Margni, M., & Maréchal, F. (2025). Life cycle assessment and techno-economic comparison of methane production routes from sewage sludge: Incineration vs. Hydrothermal Gasification and Anaerobic Digestion. *Energy Conversion and Management*, 341, 120015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120015>

10. Hoang, Q. N., Vanierschot, M., Blondeau, J., Croymans, T., Pittoors, R., & van Caneghem, J. (2021). Review of numerical studies on thermal treatment of municipal solid waste in packed bed combustion. *Fuel Communications*, 7, 100013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fueco.2021.100013>

11. Hannl, T. K., Skoglund, N., Prišćák, J., Öhman, M., & Kuba, M. (2024). Bubbling fluidized bed co-combustion and co-gasification of sewage sludge with agricultural residues with a focus on the fate of phosphorus. *Fuel*, 357, 129822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129822>

12. Ben Ali, M., el Hazzat, M., Flayou, M., Moussadik, A., Belekbir, S., Sifou, A., Dahhou, M., Kacimi, M., Benzaouak, A., & el Hamidi, A. (2025). Advanced kinetic and thermodynamic analysis of sewage sludge combustion: A study of non-isothermal reaction mechanisms and energy recovery. *FirePhysChem*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpc.2025.04.002>

13. Ortner, B., Schmidberger, C., Gerhardt, H., Prieler, R., Schröttner, H., & Hochenauer, C.

(2023). Application of computationally inexpensive CFD model in steady-state and transient simulations of pulverized sewage sludge combustion. *Advanced Powder Technology*, 34(12), 104260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.104260>

14. Ortner, B., Peham, L., Schmidberger, C., Prieler, R., & Hochenauer, C. (2025). CFD modeling of sewage sludge combustion in an experimental entrained flow reactor with integrated slag flow dynamics. *Applied Thermal Engineering*, 267, 125779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125779>

15. Dubinin, Yu. V., Yazykov, N. A., Lyulyukin, A. P., & Yakovlev, V. A. (2025). Combustion of sewage sludge in a fluidized bed of catalyst: from laboratory to the pilot plant. *Waste Management*, 204, 114944. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114944>

16. Peltola, P., Ruottu, L., Larkimo, M., Laasonen, A., & Myöhänen, K. (2023). A novel dual circulating fluidized bed technology for thermal treatment of municipal sewage sludge with recovery of nutrients and energy. *Waste Management*, 155, 329–337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.017>

17. Alobaid, F., Kuhn, A., Vakkilainen, E., & Epple, B. (2024). Recent progress in the operational flexibility of 1 MW circulating fluidized bed combustion. *Energy*, 306, 132287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132287>

18. Brachi, P., di Fraia, S., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2022). Combined heat and power production based on sewage sludge gasification: An energy-efficient solution for wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management: X*, 13, 100171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100171>

19. Jena, S., Singh, V., Nemalipuri, P., Das, H. C., Pradhan, M. K., Vitankar, V., & Hotta, T. K. (2025). Hydrodynamics and Mixing analysis of different bed materials with coal in an industrial scale bubbling fluidized bed boiler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 105989. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105989>

20. Stenberg, V., Rydén, M., & Lind, F. (2023). Evaluation of bed-to-tube heat transfer in a fluidized bed heat exchanger in a 75 MWth CFB boiler for municipal solid waste fuels. *Fuel*, 339, 127375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127375>

21. Рябов, Г. А. Обзор результатов зарубежных и отечественных исследований в области использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое / Г. А. Рябов // Теплоэнергетика. – 2021. – № 2. – С. 41-60. – DOI 10.1134/S0040363621020053. – EDN AFKXUZ.

22. Г. А. Рябов. Исследование влияния различных факторов на изменение концентрации щелочных элементов, вызывающих агломерацию слоя / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, О. А. Смирнова, Д. С. Литун // Теплоэнергетика. – 2021. – № 1. – С. 85-94. – DOI 10.1134/S0040363621010173. – EDN XVYYEA.

Авторы публикации

Терехин Алексей Павлович – мл. науч. сотр. Северного (Арктического) Федерального Университета им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0009-0005-1737-1881>. terehin.a@edu.narfu.ru

Марьяндышев Павел Андреевич – д-р техн. наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и науке Северного (Арктического) Федерального Университета им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-3880-8289>. p.marjandyshv@narfu.ru

References

1. Makeeva E.N., Zvereva E.R., Morozova O.Yu. Conversion of boiler houses to alternative fuel. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(1):107-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117>

2. Singh, V., Nemalipuri, P., Das, H. C., & Vitankar, V. (2025). An Eulerian-Eulerian multifluid simulation for co-combustion of coal and sawdust in industrial scale circulating fluidized bed boiler. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100169>

3. Patro, B. (2016). Efficiency studies of combination tube boilers. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 193–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.007>

4. Sekyere, C. K. K., Opoku, R., Asaaga, B., Baah, B., Andoh, P. Y., Obeng, G. Y., & Agbogla, J. (2025). Techno-environmental assessment of the fuel properties of a variety of briquettes for biomass boiler applications. *Cleaner Energy Systems*, 10, 100185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100185>

5. Petrović, A., Cenčić Predikaka, T., Parlov Vuković, J., Jednačak, T., Hribernik, S., Vohl, S.,

Urbanc, D., Tišma, M., & Čuček, L. (2024). Sustainable hydrothermal co-carbonization of residues from the vegetable oil industry and sewage sludge: Hydrochar production and liquid fraction valorisation. *Energy*, 307, 132760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132760>

6. Shen, X., Yan, H., Shi, J., Tan, Y., Yang, H., Hu, H., & Li, S. (2025). Experimental investigation on smoldering combustion for sewage sludge treatment: Influence of key parameters and self-sustaining limit. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105673. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105673>

7. Jobodwana, L., & Sithole, N. T. (2025). From waste to resource: Cleaner production of geopolymer bricks from sewage sludge via production parameter optimization. *Construction and Building Materials*, 489, 142341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142341>

8. Wilk, M., Śliz, M., & Lubieniecki, B. (2021). Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and fuel additives: Combustion performance of hydrochar. *Renewable Energy*, 178, 1046–1056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.101>

9. Corre, S., Gorete Ribeiro Domingos, M. E., Florez-Orrego, D., Magnaval, G., Margni, M., & Maréchal, F. (2025). Life cycle assessment and techno-economic comparison of methane production routes from sewage sludge: Incineration vs. Hydrothermal Gasification and Anaerobic Digestion. *Energy Conversion and Management*, 341, 120015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120015>

10. Hoang, Q. N., Vanierschot, M., Blondeau, J., Croymans, T., Pittoors, R., & van Caneghem, J. (2021). Review of numerical studies on thermal treatment of municipal solid waste in packed bed combustion. *Fuel Communications*, 7, 100013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100013>

11. Hannl, T. K., Skoglund, N., Prišćák, J., Öhman, M., & Kuba, M. (2024). Bubbling fluidized bed co-combustion and co-gasification of sewage sludge with agricultural residues with a focus on the fate of phosphorus. *Fuel*, 357, 129822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129822>

12. Ben Ali, M., el Hazzat, M., Flayou, M., Moussadik, A., Belekbir, S., Sifou, A., Dahhou, M., Kacimi, M., Benzaouak, A., & el Hamidi, A. (2025). Advanced kinetic and thermodynamic analysis of sewage sludge combustion: A study of non-isothermal reaction mechanisms and energy recovery. *FirePhysChem*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpc.2025.04.002>

13. Ortner, B., Schmidberger, C., Gerhardtter, H., Prieler, R., Schröttner, H., & Hochenauer, C. (2023). Application of computationally inexpensive CFD model in steady-state and transient simulations of pulverized sewage sludge combustion. *Advanced Powder Technology*, 34(12), 104260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104260>

14. Ortner, B., Peham, L., Schmidberger, C., Prieler, R., & Hochenauer, C. (2025). CFD modeling of sewage sludge combustion in an experimental entrained flow reactor with integrated slag flow dynamics. *Applied Thermal Engineering*, 267, 125779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125779>

15. Dubinin, Yu. V., Yazykov, N. A., Lyulyukin, A. P., & Yakovlev, V. A. (2025). Combustion of sewage sludge in a fluidized bed of catalyst: from laboratory to the pilot plant. *Waste Management*, 204, 114944. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114944>

16. Peltola, P., Ruottu, L., Larkimo, M., Laasonen, A., & Myöhänen, K. (2023). A novel dual circulating fluidized bed technology for thermal treatment of municipal sewage sludge with recovery of nutrients and energy. *Waste Management*, 155, 329–337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.017>

17. Alobaid, F., Kuhn, A., Vakkilainen, E., & Epple, B. (2024). Recent progress in the operational flexibility of 1 MW circulating fluidized bed combustion. *Energy*, 306, 132287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132287>

18. Brachi, P., di Fraia, S., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2022). Combined heat and power production based on sewage sludge gasification: An energy-efficient solution for wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*: X, 13, 100171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100171>

19. Jena, S., Singh, V., Nimalipuri, P., Das, H. C., Pradhan, M. K., Vitankar, V., & Hotta, T. K. (2025). Hydrodynamics and Mixing analysis of different bed materials with coal in an industrial scale bubbling fluidized bed boiler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 105989. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105989>

20. Stenberg, V., Rydén, M., & Lind, F. (2023). Evaluation of bed-to-tube heat transfer in a fluidized bed heat exchanger in a 75 MWth CFB boiler for municipal solid waste fuels. *Fuel*, 339, 127375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127375>

21. Ryabov, G. A. A Review of the Research Results into the Technologies of Solid-Fuel Combustion in a Circulating Fluidized Bed Conducted Abroad and in Russia / G. A. Ryabov // *Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 68, No. 2. – P. 117-135. – DOI 10.1134/S0040601521020051. – EDN XTYBYH.

22. A Study into the Influence of Different Factors on the Behavior of Alkaline Element Concentrations that Cause Bed Agglomeration / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, O. A. Smirnova, D. S. Litun // Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 68, No. 1. – P. 72-81. – DOI 10.1134/S0040601521010171. – EDN TPYJKF.

Authors of the publication

Alexey P. Terekhin – Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0009-0005-1737-1881>. terehin.a@edu.narfu.ru

Pavel A. Maryandyshev – Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-3880-8289>. p.maryandyshev@narfu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **24.08.2025 г.**

Отредактировано **15.09.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**



ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ДЛЯ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПОЛНОЙ МАССОЙ 18 ТОНН ГОРОДСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Корнилов С.В.^{1,2}, Фардеев Л.И.¹, Кудинов Д.В.^{1,3}, Анисимов В.Р.^{1,4}, Зверева Э.Р.²

¹ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

⁴Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

Kornilov.SV@kamaz.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ работы состоит в определении оптимальных характеристик комбинированной энергоустановки (КЭУ) на водородных топливных элементах (ТЭ) для электрического пассажирского транспортного средства (ТС) КАМАЗ-6290 городского исполнения полной массой 18 тонн длиной 12 метров. ЦЕЛЬ. Определить оптимальные характеристики КЭУ для ТС путем создания математической модели, которая позволяет оптимизировать характеристики. МЕТОДЫ. Создание имитационной математической модели ТС с КЭУ в программном обеспечении Simcenter Amesim, в которой имитируются компоненты системы. По результатам производится оптимизация параметров и характеристик КЭУ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты данной работы используются при подборе оптимальных характеристик КЭУ в условиях эксплуатации в составе ТС.

Ключевые слова: транспортное средство; водородный транспорт; комбинированная энергоустановка; оптимизация параметров; энергобаланс; математическое моделирование; топливные элементы; водородная энергетика.

Для цитирования: Корнилов С.В., Фардеев Л.И., Кудинов Д.В., Анисимов В.Р., Зверева Э.Р. Оптимизация параметров комбинированной энергоустановки на водородных топливных элементах для пассажирского транспортного средства полной массой 18 тонн городского исполнения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 118-129. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-118-129.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A COMBINED HYDROGEN FUEL CELL POWER PLANT FOR A PASSENGER VEHICLE WITH A GROSS WEIGHT OF 18 TONS OF URBAN USE

Kornilov S.V.^{1,2}, Fardeev L.I.¹, Kudinov D.V.^{1,3}, Anisimov V.R.^{1,4}, Zvereva E.R.²

¹PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Kazan Federal University, Kazan, Russia

⁴Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Kornilov.SV@kamaz.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the work is to determine the optimal characteristics of a combined power plant (CPP) based on hydrogen fuel cells for the urban electric passenger vehicle KAMAZ-6290 with a gross weight of 18 tons and a length of 12 meters. THE PURPOSE. Determine the optimal characteristics of the power plant for the vehicle by creating a mathematical model that allows you to optimize the characteristics. METHODS. Creation of a simulation mathematical model of the vehicle with a power plant in the software Simcenter Amesim, in which the system components are simulated. Based on the results, the parameters and characteristics of the CPP are optimized. CONCLUSION. The results of this work are used in selecting the optimal characteristics of the CPP under operating conditions as part of the vehicle.

Keywords: *vehicle; hydrogen transport; combined power plant; parameter optimization; energy balance; mathematical modeling; fuel cells; hydrogen energy.*

For citation: Kornilov S.V., Fardeev L.I., Kudinov D.V., Anisimov V.R., Zvereva E.R. Optimization of the parameters of a combined hydrogen fuel cell power plant for a passenger vehicle with a gross weight of 18 tons of urban use. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 118-129. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-118-129.

Введение (Introduction)

В современном мире уделяется особое внимание снижению углеродного следа в различных секторах экономики и промышленности. Во всем мире прослеживается тенденция перехода на углеродно-нейтральные, возобновляемые источники энергии. Евросоюз, США и многие другие страны, в том числе РФ, выбрали водородную энергетику и технологии топливных элементов [1, 2] как одно из перспективных направлений развития в рамках ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление) повестки, так как водород является перспективным источником экологически чистой, возобновляемой энергии [3].

Применение ТЭ один из основных способов для преобразования химической энергии, запасенной в водороде, в электрическую энергию посредством электрохимической реакции. По ряду требований (например динамика работы, виброустойчивость) для транспортного применения лучшие результаты показывает тип ТЭ, использующий в качестве электролита протонообменную мембрану [4]. Применение водорода, возобновляемого источника энергии, в качестве топлива для энергоустановок на основе ТЭ один из перспективных путей декарбонизации транспортного сектора [5]. Существующие ТС с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) негативно влияют на окружающую среду из-за наличия выхлопных газов в состав которых входит большое количество вредных веществ, в том числе NO_x [6]. ТС с энергоустановками на водородных ТЭ лишены этого недостатка и не вредят экологии, так как результатом электрохимических реакций (окисления водорода – восстановления кислорода) является вода, или водяной пар, без вредных химических соединений [7]. Это главное их преимущество, также в сравнении с ДВС, у водородных ТЭ выше КПД [8]. По этой причине активно ведутся исследования и разработки ТС с энергоустановкой на водородных ТЭ. К недостаткам ТС с ТЭ относят отсутствие серийного производства и отсутствие заправочной инфраструктуры, что ведет к высокой стоимости образцов ТС с ТЭ и трудностям в эксплуатации. Для массового производства и эксплуатации таких ТС на рынке должна быть полноценная сеть водородных заправочных станций [9-10]. Стоит отметить, что сектор водородной энергетики еще только формируется, и требуется большое количество исследований [11, 12].

Энергоустановка на водородных ТЭ (ТЭУ) в составе ТС выступает в качестве источника электроэнергии для тягового электрического двигателя (ТЭД) и тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ). ТЭУ состоит из: электрохимического генератора (ЭХГ) на основе батареи топливных элементов (БТЭ), вспомогательного оборудования и системы хранения сжатого водорода (СХКВ) [13]. В процессе электрохимических реакций окисления водорода и восстановления кислорода в ТЭ генерируется электрическая энергия передаваемая в электрическую шину [14]. ТЭД преобразовывает электрическую энергию в механическую и передает крутящий момент на колеса, в случае пиковых нагрузок недостаток электроэнергии от ТЭУ дополняется энергией из ТАБ [15-16]. В состав КЭУ входит ТЭУ и перезаряжаемая система хранения электроэнергии (ПСХЭЭ) на основе ТАБ.

Цель исследования заключается в определении оптимальных характеристик КЭУ для применения в транспортном секторе. Научная значимость исследования состоит в применении функции оптимизации параметров КЭУ и нескольких методов функционирования ЭХГ, что позволяет определить оптимальные параметры ЭХГ, СХКВ и ПСХЭЭ. Практическая значимость исследования состоит в определении энергетического баланса электрического пассажирского ТС КАМАЗ-6290 городского исполнения и нахождении конкретных параметров ЭХГ, СХКВ и ПСХЭЭ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Необходимо определить оптимальные характеристики ТЭД, энергоустановки на ТЭ и ТАБ ТС КАМАЗ-6290 городского исполнения для этого будет применен метод

математического моделирования. Разработанная математическая модель была реализована в программном обеспечении Simcenter Amesim (рис. 1).

Для реализации функционала математической модели применялись физико-математические блоки, имитирующие реальные компоненты системы. Для расчетов использовались следующие блоки: ТС, водитель, блок управления ТС, трансмиссия, ТЭД, ПСХЭЭ и ЭХГ.

В блоке «ТС» задаются параметры ТС и рассчитывается сила сопротивления движению по формуле:

$$F_c = F_{\text{кач}} + F_{\text{возд}} + F_{\text{разг}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{кач}}$ – сила сопротивления качению, Н; $F_{\text{возд}}$ – сила сопротивления воздуха, Н; $F_{\text{разг}}$ – сила сопротивления разгону (сила инерции), Н.

Сила сопротивления дороги состоит из силы сопротивления подъему ($F_{\text{п}}$) и силы сопротивления качению (F_f).

$$F_d = F_{\text{п}} + F_f = G_a \cdot \sin(\alpha) + G_a \cdot \cos(\alpha) \cdot f, \quad (2)$$

где α – угол продольного уклона дороги, %; G_a – полный вес ТС, Н ($G_a = m \cdot g$); f – коэффициент сопротивления качению.

$$f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{2000}\right), \quad (3)$$

где f_0 – коэффициент сопротивления качению при малой скорости ТС; v – скорость ТС, м/с.

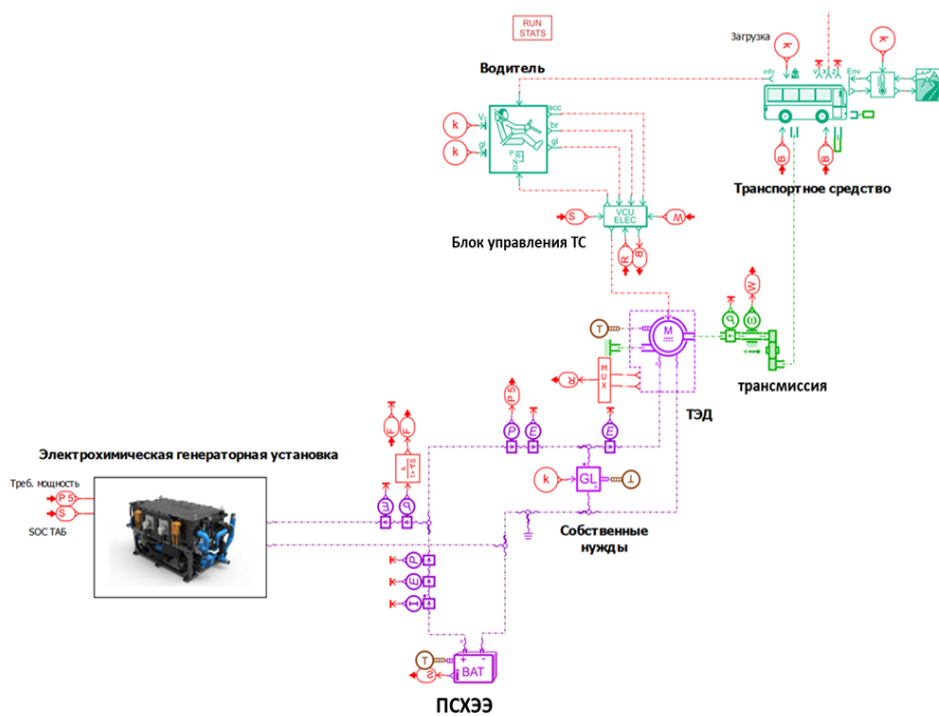


Рис. 1. ММ ТС с КЭУ

Fig.1. MM of a vehicle with a CPP

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

Сила сопротивления воздуха определяется по формуле:

$$F_{\text{возд}} = 0,5c_x \cdot \rho \cdot F \cdot v^2, \quad (4)$$

где c_x – коэффициент сопротивления воздуха; F – площадь Миделя, м²; ρ – плотность воздуха, для нормальных условий эксплуатации принимаем 1,225 кг/м³.

Сила сопротивления разгону (сила инерции) определяется по формуле:

$$F_{\text{разг}} = \delta \cdot a \cdot M_n, \quad (5)$$

где δ – коэффициент инерции вращающихся масс, приведенных к валу ТЭД; a – ускорение ТС, м/с².

Структурный элемент «Водитель» отвечает за назначение цикла движения ТС в функции скорости от времени. В структурный элемент «Блок управления ТС» поступает сигнал, сообщающий какие-либо изменения скорости. Это может быть ускорение, торможение и управление поворотом рулевого колеса для моделирования реального маршрута [17]. Также в этом блоке рассчитывается момент ТЭД, который нужен для движения по заданному циклу. Полученный сигнал затем передается на ТЭД.

Структурный элемент «ТЭД» задает тяговую характеристику и карту эффективности ТЭД – зависимость КПД от частоты вращения и момента. От структурного элемента «Блок управления ТС» поступает сигнал, который сравнивается с тяговой характеристикой ТЭД и далее происходит расчет требуемой электрической мощности необходимой для работы, принимая во внимание карту эффективности ТЭД.

Характеристики химических аккумуляторных ячеек задаются в структурном элементе «ПСХЭЭ».

Будем рассматривать ЭХГ как основной источник электроэнергии, т.е. ПСХЭЭ имеет меньший запас электроэнергии чем ЭХГ с СХКВ.

В блоке «ЭХГ» задаются параметры ЭХГ, DC/DC преобразователя, БТЭ, СХКВ, а также алгоритмы работы системы управления ЭХГ. Данные алгоритмы позволяют эффективно эксплуатировать ТС с КЭУ на различных маршрутах движения, поддерживая уровень заряда ПСХЭЭ в заданном диапазоне. Алгоритм работы ЭХГ опишем далее (рис. 2).

В системе управления ЭХГ включены алгоритмы распределения мощности, экстренного отключения, ограничения динамики нарастания и снижения мощности ЭХГ.

Для расчета оптимальных параметров КЭУ для КАМАЗ-6290 городского исполнения использовались следующие входные данные (табл. 1 и 2).

Таблица 1
Table 1

Параметры ТС КАМАЗ-6290 городского исполнения
Parameters of the KAMAZ-6290 urban vehicle

Параметры	Значения
Полная масса, кг	18000
Снаряжённая масса, кг	12200
Ширина, мм	2550
Высота, мм	3220
Коэффициент заполнения лобовой площади	0,99
Коэффициент обтекаемости	0,66
Шины	275/70R22,5

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

Значения энергопотребления собственных нужд для среднестатистического режима эксплуатации, а также для оптимизационных расчётов составляет 8,24 кВт (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Собственные нужды для КАМАЗ-6290 городского исполнения
Own needs for KAMAZ-6290 urban version

Потребитель	Мощность потребителя, кВт	Средняя мощность потребителей при движении по циклу (статистические данные), кВт
Климатическая система (кондиционер)	11	3,54
Насос гидроусилителя руля	4	0,42
Компрессор	4	0,53
Система термоменеджмента ПСХЭЭ на подогрев	7	0
Система термоменеджмента ПСХЭЭ на охлаждение	2,8	0,56
DC/DC преобразователи	12	3,19
ИТОГО:		8,24

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

В модель закладывались следующие характеристики ТЭД – передаточное число 22.66, максимальная мощность 250 кВт. Для анализа по энергопотреблению ТС в условиях города применялся автобусный городской цикл движения «Orange County Bus», со средней загрузкой ТС по массе равной 35%.

Результаты (Results)

Для определения оптимальной мощности ЭХГ, а также энергоёмкости ПСХЭЭ, проведено несколько вариантов оптимизационных расчетов, в каждом из которых отличалось функционирование ЭХГ:

1. ЭХГ как основной источник энергии. Мощность ЭХГ регулируется исходя из требуемой разрядной мощности (но не менее минимального значения) и уровня заряда (SoC) ПСХЭЭ. Для сохранения ресурса ЭХГ предпочтительно сократить количество отключений ЭХГ, в модель добавлено ограничение - не более 10 отключений за день;

2. ЭХГ как основной источник энергии с учётом наличия в системе тормозного резистора (для сброса избыточной мощности). Мощность ЭХГ регулируется в зависимости от требуемой разрядной мощности (но не менее минимального значения) и SoC ПСХЭЭ, вся лишняя энергия рассеивается на резисторе. Ограничение на отключение ЭХГ – не более 10 за день;

3. ЭХГ без ограничения минимальной мощности. Мощность ЭХГ регулируется по текущим потребностям ТС, при этом нет нижней границы мощности ЭХГ и нет ограничений на количество включений/отключений.

В основе каждого алгоритма работы заложено регулирование выходной мощности ЭХГ по требуемой мощности ГЭД и поддержание уровня заряда ПСХЭЭ (рис. 2).

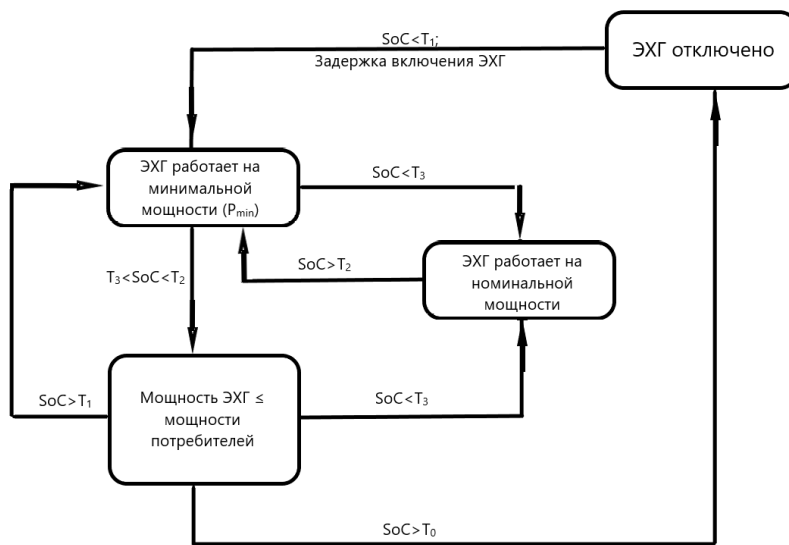


Рис. 2. Алгоритм работы ЭХГ

Fig. 2. Algorithm for the operation of an electrochemical generator

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

Когда возрастает потребление энергии – ЭХГ увеличивает выходную мощность с динамикой нарастания в 10% от номинальной мощности ЭХГ. При снижении энергопотребления – выходная мощность ЭХГ уменьшается с динамикой снижения 20% от номинальной мощности ЭХГ. Минимальная мощность, до которой ЭХГ может снизить свою выходную мощность, составляет P_{min} .

Если уровень заряда ПСХЭЭ снижается ниже T_1 , происходит включение ЭХГ, при этом ЭХГ работает на минимальной мощности (P_{min}). Если SoC опуститься ниже T_2 , мощность ЭХГ будет поддерживаться на уровне мощности потребителей, но не менее минимальной мощности ЭХГ. В случае снижения SoC ниже T_3 , ЭХГ работает в режиме номинальной мощности. При уровне заряда более T_0 происходит отключение ЭХГ.

Рассмотрим первый оптимизационный расчет для алгоритма функционирования «ЭХГ» как основной источник энергии». Процесс оптимизации можно представить в виде функции направленной на минимизацию массы ПСХЭЭ, массы ЭХГ и СХКВ вместе с водородным топливом:

$$J = \frac{E_{расх.ПСХЭЭ} \cdot 345 \cdot 7,5}{\gamma \cdot 0,9 \cdot \rho_{ПСХЭЭ}} + \frac{P_{fc}}{\rho_{fc}} + E_{расх.ЭХГ} \cdot cons_{h2} + E_{расх.ЭХГ} \cdot \frac{cons_{h2}}{\rho_{h2}}, \quad (6)$$

где $E_{расх.ПСХЭЭ}$ – энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день, Вт*ч; $\rho_{ПСХЭЭ}$ – удельная энергоёмкость ПСХЭЭ, Вт*ч/кг; P_{fc} – мощность ЭХГ, Вт; ρ_{fc} – удельная мощность ЭХГ, Вт/кг; $E_{расх.ЭХГ}$ – энергия, пропускаемая ЭХГ за день, Вт*ч; $cons_{h2}$ – удельный расход

водородного топлива, кг/Вт*ч; ρ_{h2} – удельный показатель массы для топливного бака, кг_{H2}/кг; γ – количество циклов разряда/заряда ПСХЭЭ за срок службы.

Данная функция учитывает энергию, которую необходимо получить транспортному средству, и с помощью удельных показателей для ЭХГ, ПСХЭЭ, СХКВ получаем весовой показатель для КЭУ. Экстремум данной функции достигается при минимальном показателе массы КЭУ. При этом вариант КЭУ с минимальной массой, который преодолевает маршрут имеет оптимальное соотношение мощности ЭХГ и энергоемкости ПСХЭЭ.

Для первого варианта оптимизации, найденный экстремум должен удовлетворять следующим ограничениям по количеству включений ЭХГ (не более 10 отключений за день):

$$SoC \in [SoC_L, SoC_H] n_{off} \leq 10, \quad (7)$$

где SoC_L – минимальная степень заряженности ПСХЭЭ; SoC_H – максимальная степень заряженности ПСХЭЭ; n_{off} – количество отключений БТЭ за день.

На рисунке 3 показан график изменения функции оптимизации. Минимум функции оптимизации обеспечивается при ЭХГ мощностью 41 кВт.

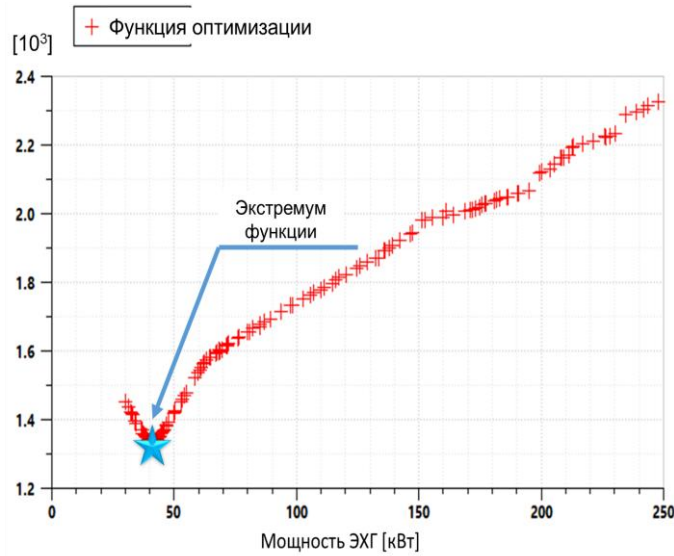


Рис. 3. График изменения функции оптимизации в зависимости от мощности ЭХГ *Fig. 3. Graph of changes in the optimization function depending on the ECG power*
*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Далее определялся энергетический баланс для конфигурации КЭУ соответствующей точке экстремума. На рисунке 4 представлен график мощностей КЭУ. Максимальная разрядная мощность составляет 140 кВт, а максимальная зарядная мощность 250 кВт. Энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день, составляет 204 кВт*ч.

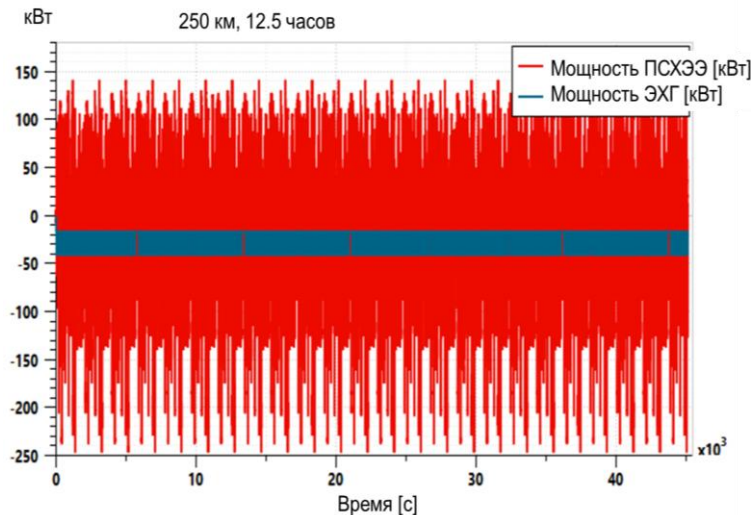


Рис. 4. График мощностей КЭУ за день *Fig. 4. Graph of CPP power per day*
*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Далее рассмотрим оптимизационный расчёт для алгоритма функционирования «ЭХГ» как основной источник энергии с учётом наличия в системе тормозного резистора». В модель добавляется тормозной резистор, основное назначение которого рассеивать избыточную энергию от ЭХГ для обеспечения непрерывной работы ЭХГ без отключений. Энергия, рассеиваемая на резисторе, определяется по формуле:

$$E_{\text{рез.}} = \int_{t_0}^{t_1} (P_{\text{min,ЭХГ}} - P_{\text{сн}}), \quad (8)$$

где $P_{\text{min,ЭХГ}} = 0,4 \cdot P_{\text{ЭХГ}}$ – минимальная мощность ЭХГ, кВт; $P_{\text{ЭХГ}}$ – максимальная мощность ЭХГ, кВт; $P_{\text{сн}}$ – мощность собственных нужд, кВт.

Процесс оптимизации выражается в виде функции, указанной ранее (6), где точка минимума показывает минимальную массу КЭУ. В данном варианте присутствует тормозной резистор, на котором часть энергии при рекуперации ТС и часть энергии ЭХГ которую не может аккумулировать ПСХЭЭ, будет расходоваться на тормозном резисторе. При этом будет происходить увеличение удельного расхода водорода на километр пробега ТС.

При этом найденный экстремум должен удовлетворять ограничениям по отключениям ЭХГ, аналогично первому варианту оптимизации КЭУ:

$$SoC \in [SoC_L, SoC_H] n_{\text{off}} \leq 10, \quad (9)$$

где SoC_L – минимальная степень заряженности ПСХЭЭ; SoC_H – максимальная степень заряженности ПСХЭЭ; n_{off} – количество отключений БТЭ за день.

Затем составляется график изменения функции оптимизации, минимум функции оптимизации обеспечивается при 64 кВт мощности ЭХГ (рис. 5).

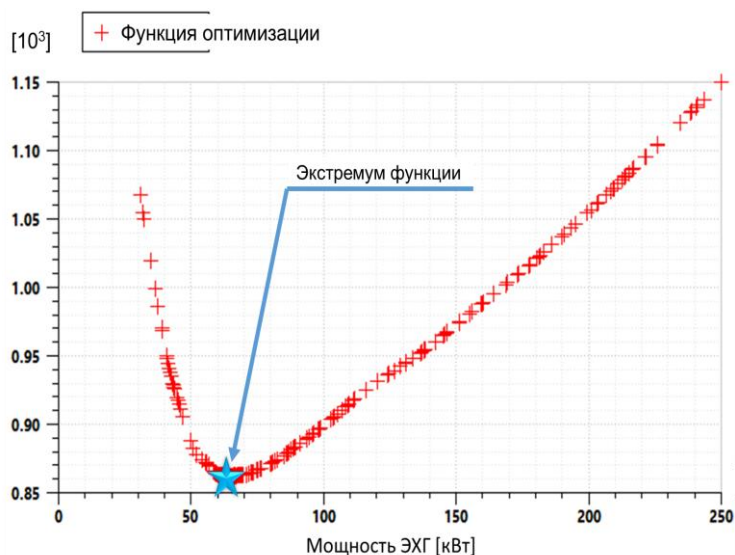


Рис. 5. График изменения массы КЭУ в зависимости от мощности ЭХГ

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

Далее рассчитывался энергетический баланс в точке экстремума, по результатам которого составлен график мощностей КЭУ, а также график рассеиваемой мощности на тормозном резисторе (рис. 6). Максимальная разрядная мощность составляет 120 кВт, а максимальная зарядная мощность 260 кВт. Энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день при таком сценарии, составляет 171 кВт*ч.

Последний оптимизационный расчет проводился для алгоритма функционирования «ЭХГ без ограничения минимальной мощности». С целью нахождения оптимума была произведена оптимизация параметров без ограничения минимальной мощности ЭХГ. Данный процесс также описывается функцией (6). При этом нет ограничений на количество отключений ЭХГ формула (10).

Найденный экстремум должен удовлетворять следующему ограничению:

$$SoC \in [SoC_L, SoC_H]. \quad (10)$$

На рисунке 7 показан график изменения функции оптимизации. Минимум функции оптимизации обеспечивается при ЭХГ мощностью 72 кВт мощности ЭХГ.

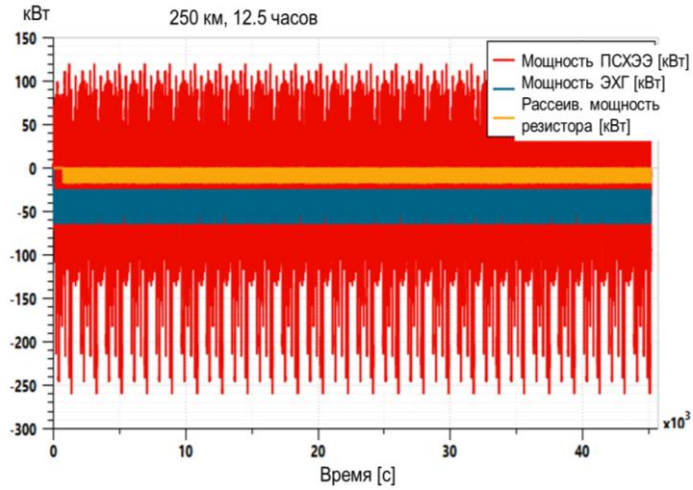


Рис. 6. График мощностей КЭУ и тормозного резистора за день *Fig. 6. Power graph of the CEU and braking resistor per day*
 *Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

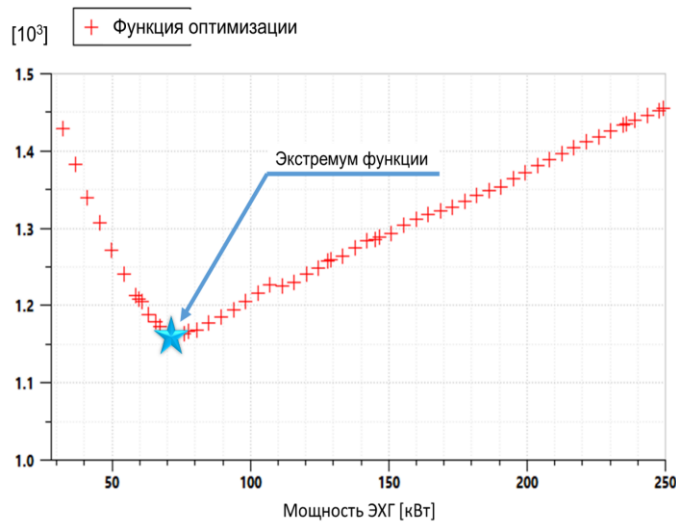


Рис. 7. График изменения функции оптимизации в зависимости от мощности ЭХГ *Fig. 7. Graph of changes in the optimization function depending on the ECG power*
 *Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Далее был проведен расчет энергетического баланса в точке экстремума, на рисунке 8 представлен график мощностей КЭУ. Максимальная разрядная мощность составляет 125 кВт, а максимальная зарядная мощность 250 кВт. Энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день, составляет 140 кВт*ч.

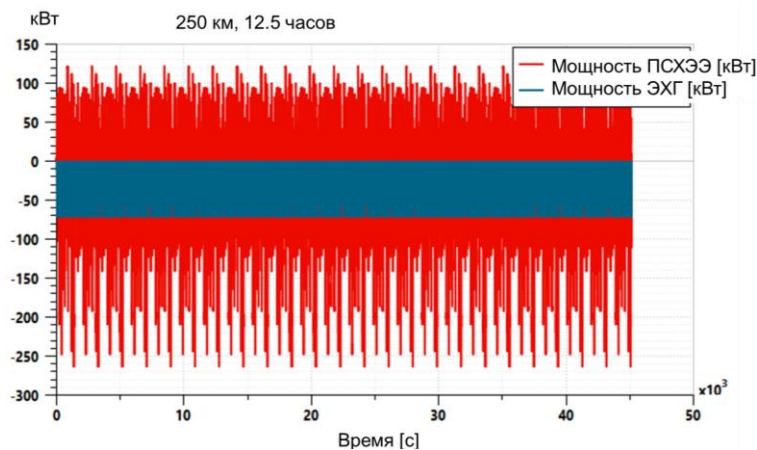


Рис. 8. График мощностей КЭУ за день *Fig. 8. Graph of CPP power per day*
 *Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчетов
Calculation results

Параметры	Без ограничения минимальной мощности ЭХГ	ЭХГ основной источник энергии (без тормозного резистора)	ЭХГ основной источник энергии с резистором
Мощность ЭХГ, кВт	72	41	64
Энергоемкость ПСХЭЭ, кВт*ч	36	52,3	44,2
Масса ЭХГ, кг	144	81	127
Масса СХКВ, кг	377	379	535
Масса ТАБ, кг	600	872	735
Масса КЭУ, кг	1121	1332	1397
Расход водородного топлива на маршрут (250 км), кг	18,9	18,8	25,5
Влияние частоты отключений на ресурс ЭХГ	Значительное	Не значительное	Не значительное

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

Для каждого из экстремумов функций полученных при проведении расчетов составлена сводная таблица параметров КЭУ (табл. 3). Согласно представленным данным, вариант КЭУ с ЭХГ без ограничения минимальной мощности, имеет наименьшую массу КЭУ, что достигается путем минимизации энергоемкости ПСХЭЭ. В данном варианте ЭХГ имеет наибольшую мощность (72 кВт), что в совокупности с отсутствием ограничений на количество включений ЭХГ, позволяет минимизировать энергоемкость ПСХЭЭ. Однако, исходя из оценки ресурса ЭХГ, данный вариант является худшим, так как из-за частых включений и отключений увеличивается скорость деградации топливных элементов [18].

Вариант ЭХГ как основной источник энергии с используемым тормозным резистором демонстрирует наибольший расход водорода, чем аналогичный вариант без резистора, т.к. энергия при рекуперации потребляется тормозным резистором, а не аккумулируется в ПСХЭЭ. В свою очередь, большой расход водородного топлива ведет к росту массы СХКВ.

Наиболее оптимальным с точки зрения расхода топлива, пропускаемой электроэнергии через ПСХЭЭ и ресурса ЭХГ, является вариант «ЭХГ как основной источник энергии (без тормозного резистора)». Данный вариант обеспечивает наименьшее количество отключений ЭХГ (соответственно более продолжительный ресурс эксплуатации) и расход водородного топлива в данном варианте минимальный.

Заключение (Conclusion)

В данной работе были рассмотрены три метода функционирования электрохимического генератора в составе пассажирского транспортного средства полной массой 18 тонн, эксплуатирующийся в городских условиях.

В результате оптимизационных расчётов определено оптимальное соотношение параметров мощности ЭХГ (41 кВт) и энергоёмкости ПСХЭЭ (52,3 кВт*ч). А также получена требуемая масса хранимого водорода в СХКВ (18,8 кг). При этом ЭХГ является основным источником электроэнергии с ограничением количества отключений за день и ограничением по минимальной мощности на которой ЭХГ может работать.

В процессе расчётов учитывались следующие параметры оптимизации: оптимальная конфигурация КЭУ, исходя из минимизации общей массы (ПСХЭЭ, ЭХГ, СХКВ), обеспечение наименьшего количества отключений ЭХГ, а также обеспечение ресурса ПСХЭЭ. Также условием выбора конфигураций КЭУ было соответствие необходимым тягово-динамическим характеристикам ТС.

Проведенные расчеты позволили выявить оптимальные параметры КЭУ для ТС КАМАЗ-6290 в городских условиях эксплуатации. Результаты оптимизационных расчетов были внедрены в процесс проектирования и модернизации ТС КАМАЗ-6290. Оптимизация параметров ЭХГ, ПСХЭЭ позволила значительно сократить количество отключений электрохимического генератора. Это обеспечило более стабильную работу системы, повысив уровень надежности и увеличило потенциальный срок эксплуатации.

Литература

1. Han J. et al. A review of key components of hydrogen recirculation subsystem for fuel cell vehicles //Energy Conversion and Management: X. – 2022. – Vol. 15. – pp. 100265.
2. Корнилов С.В., Зверева Э.Р., Симонов И.В. Исследование энергетических систем на водородных топливных элементах для транспортных средств //Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе». – 2023. - Часть II. – С. 189-198.
3. Линник Ю. Н., Фаляхова Е. Д. Водородная энергетика и перспективы ее развития //Вестник университета. – 2023. – № 4. – С. 33-39.
4. Cheng S. et al. Investigation and analysis of proton exchange membrane fuel cell dynamic response characteristics on hydrogen consumption of fuel cell vehicle //International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47. – Vol. 35. – pp. 15845-15864.
5. Rout C. et al. A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel //Heliyon. – 2022. – Vol. 8. – pp. 12.
6. Холиков М.М., Сафаров М.М., Джуряев Д.С. Состав выхлопных газов и способы снижения вредного воздействия отработанные газы двигателей внутреннего сгорания // Вопросы физической и коллоидной химии. – 2019. – стр. 202-208.
7. Peter Reithuber, Christian Frühwirth, Simon Buchberger, Helmut Eichlseder. Investigation of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Cathode Exhaust Gas Composition Based on Test Bed Measurements // Energies. – 2023. – p. 1-20.
8. Antonio N.M., Carla M., Francesco V., Manlio P., Roberto B. PEM Fuel Cell Applications in Road Transport /// Energies. – 2023. – p. 20-27.
9. Рагимов Э. А. Водородные транспортные средства в городских транспортных системах //Транспорт на альтернативном топливе. – 2020. – № 4 (76). – С. 62-68.
10. Isaac N., Saha A. K. Analysis of refueling behavior of hydrogen fuel vehicles through a stochastic model using Markov Chain Process //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 141. – pp. 110761.
11. Trapp C. T. C., Kanbach D. K., Kraus S. Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry //Sustainable Technology and Entrepreneurship. – 2022. – Vol. 1. – № 2. – pp. 100014.
12. Беляев С. В. и др. Возможности использования водорода на автотранспорте //Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 21. – С. 76-79.
13. Илимбетов Р. Ю., Астапенко А. М. Разработка компоновочной схемы комбинированной энергетической установки для грузового автомобиля с улучшенными экологическими показателями //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 72-79.
14. Клюев В. В., Евсевич И. С. Особенности устройства водородного двигателя //Актуальные проблемы энергетики. – 2020. – № 13. – С. 330-332.
15. Тютрина А. Ю., Бурманов С. А. Анализ применения водородных элементов и аккумуляторных батарей на электротранспортных средствах //Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. – 2021. – С. 410-412.
16. Сейвальд С., Пузанов Д. А., Чебоксаров А. Н. Применение водородной силовой установки на автомобильном транспорте //Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. – 2022. – С. 159-164.
17. Чичекин И. В., Левенков Я. Ю., Зуенков П. И. Формирование закона управления углом поворота рулевого колеса для поддержания заданной траектории движения автомобиля // Труды НАМИ. – 2019. – № 3(278). – С. 53-61
18. Kocha S.S., Chapter 3 - Electrochemical Degradation: Electrocatalyst and Support Durability // Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation – 2012. – P. 89-214.

Авторы публикации

Корнилов Семён Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия, гл. конструктор энергетических систем, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. Kornilov.SV@kamaz.ru

Фардеев Ленар Ильдарович – директор центра электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. Lenar.Fardeev@kamaz.ru

Кудинов Даниил Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский федеральный университет», г. Казань, Россия, ведущий инженер-конструктор, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *KudinovDV@kamaz.ru*

Анисимов Виктор Романович – аспирант ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия, инженер-конструктор 1 категории ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *AnisimovVR@kamaz.ru*

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. *belvira6@list.ru*

References

1. Han J. et al. A review of key components of hydrogen recirculation subsystem for fuel cell vehicles // *Energy Conversion and Management: X.* – 2022. – Vol. 15. – pp. 100265.
2. Kornilov S.V., Zvereva E.R., Simonov I.V. Research of energy systems based on hydrogen fuel cells for vehicles // *Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Teachers “Energy and Automation in Modern Society”.* – 2023. - Part II. – pp. 189-198.
3. Linnik Yu. N., Falyakhova E. D. Hydrogen energy and prospects for its development // *Bulletin of the University.* – 2023. – No. 4. – pp. 33-39.
4. Cheng S. et al. Investigation and analysis of proton exchange membrane fuel cell dynamic response characteristics on hydrogen consumption of fuel cell vehicle // *International Journal of Hydrogen Energy.* – 2022. – Т. 47. – Vol. 35. – pp. 15845-15864.
5. Rout C. et al. A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel // *Heliyon.* – 2022. – Vol. 8. – pp. 12.
6. Holikov M.M., Safarov M.M., Jhuraev D.S. Composition of exhaust gases and methods for reducing the harmful effects of exhaust gases from internal combustion engines // *Questions of physical and colloidal chemistry.* – 2019. – p. 202-208.
7. Peter Reithuber, Christian Frühwirth, Simon Buchberger, Helmut Eichlseder. Investigation of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Cathode Exhaust Gas Composition Based on Test Bed Measurements // *Energies.* – 2023. – p. 1-20.
8. Antonio N.M., Carla M., Francesco V., Manlio P., Roberto B. PEM Fuel Cell Applications in Road Transport // *Energies.* – 2023. – P. 20-27.
9. Ragimov E. A. Hydrogen vehicles in urban transport systems // *Alternative fuel transport.* – 2020. – No. 4 (76). – P. 62-68.
10. Isaac N., Saha A. K. Analysis of refueling behavior of hydrogen fuel vehicles through a stochastic model using Markov Chain Process // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2021. – Vol. 141. – pp. 110761.
11. Trapp C. T. C., Kanbach D. K., Kraus S. Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry // *Sustainable Technology and Entrepreneurship.* – 2022. – Vol. 1. – No. 2. – pp. 100014.
12. Belyaev S.V. et al. Possibilities of using hydrogen in vehicles // *New materials and technologies in mechanical engineering.* – 2015. – No. 21. – pp. 76-79.
13. Ilimbetov R. Yu., Astapenko A. M. Development of a layout diagram of a combined power plant for a truck with improved environmental performance // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering.* – 2013. – Т. 13. – No. 1. – pp. 72-79.
14. Klyuev V.V., Evsievich I.S. Features of the design of a hydrogen engine // *Current problems of energy.* – 2020. – No. 13. – pp. 330-332.
15. Tyutrina A. Yu., Burmanov S. A. Analysis of the use of hydrogen cells and batteries in electric vehicles // *Innovations in information technologies, mechanical engineering and motor transport.* – 2021. – P. 410-412.
16. Seyvald S., Puzanov D. A., Cheboksarov A. N. Application of a hydrogen power plant in automobile transport // *Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations.* – 2022. – P. 159-164.
17. Chickekin I.V., Lovenkov Ya. Yu., Zuenkov P.I. Formation of the law of control of the angle of rotation of the steering wheel to maintain a given trajectory of the car // *Proceedings by us.* - 2019. - No. 3 (278). -S. 53-61
18. Kocha S.S., Chapter 3 - Electrochemical Degradation: Electrocatalyst and Support Durability // *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation* – 2012. – P. 89-214.

Authors of the publication

Semyon V. Kornilov – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *Kornilov.SV@kamaz.ru*

Lenar I. Fardeev – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia. *Lenar.Fardeev@kamaz.ru*

Daniil V. Kudinov – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia, Kazan Federal University, Kazan, Russia. *KudinovDV@kamaz.ru*

Viktor R. Anisimov – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. *AnisimovVR@kamaz.ru*

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *belvira6@list.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено ***23.06.2025 г.***

Отредактировано ***11.09.2025 г.***

Принято ***01.10.2025 г.***



ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МИКРОСЕТЕЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Чэнь С., Ду Я., Цинь Л., Велькин В.И.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
v.i.velkin@urfu.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В данной статье представлен обзор современных подходов к оптимизации планирования микросетей, включая методы многоцелевой оптимизации, учет неопределенностей и применение интеллектуальных алгоритмов. Микросети, как ключевой элемент современных энергетических систем, объединяют распределенные источники энергии, устройства накопления и нагрузки, что позволяет повысить эффективность, надежность и экологичность энергоснабжения. *МЕТОДЫ.* В работе рассмотрены основные модели оптимизации, такие как минимизация эксплуатационных затрат, снижение выбросов и повышение надежности электроснабжения. Особое внимание уделено методам учета неопределенностей, связанных с возобновляемыми источниками энергии и нагрузкой, а также роли систем накопления энергии и управления спросом. В статье также анализируются традиционные и интеллектуальные алгоритмы оптимизации, включая генетические алгоритмы, методы роя частиц и глубокое обучение. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Применение современных моделей, таких как SRSM-SOCR, модифицированный алгоритм Vet (MVA), глубокое обучение с подкреплением (DRL) и глубокая рекуррентная нейронная сеть (DRNN), позволило достичь сокращения эксплуатационных издержек микросетей на 18-25%, увеличения доли генерации из возобновляемых источников до 70-75% и снижения выбросов CO₂ до 60%. Также представлены реальные примеры внедрения микросетей в Германии и Греции, подтверждающие эффективность указанных подходов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* На основе анализа литературы выделены ключевые направления для будущих исследований, такие как интеграция миграционного обучения и глубокого обучения с подкреплением для повышения адаптивности моделей. Результаты исследования могут быть полезны для разработки эффективных стратегий управления микросетями в условиях растущей доли возобновляемых источников энергии и изменяющихся требований к энергосистемам.

Ключевые слова: микросети; оптимизация планирования; многоцелевая оптимизация; неопределенность; интеллектуальные алгоритмы; возобновляемые источники энергии; системы накопления энергии.

Для цитирования: Чэнь С., Ду Я., Цинь Л., Велькин В.И. Оптимизация планирования микросетей: современные подходы и перспективы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 130-152. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-130-152.

OPTIMIZATION OF MICROGRID SCHEDULING: CURRENT APPROACHES AND PROSPECTS

Chen X., Du Y., Qin L., Velkin V.I.

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia
v.i.velkin@urfu.ru

Abstract: *THE RELEVANCE.* This article provides a review of modern approaches to the optimization of microgrid planning, including multi-objective optimization methods, uncertainty considerations, and the application of intelligent algorithms. Microgrids, as a key component of modern energy systems, integrate distributed energy resources, storage devices, and loads, thereby

enhancing the efficiency, reliability, and environmental sustainability of energy supply. **METHODS.** The paper examines key optimization models, such as minimizing operational costs, reducing emissions, and improving power supply reliability. Special attention is given to methods for addressing uncertainties related to renewable energy sources and load variability, as well as the role of energy storage systems and demand response. The article also analyzes traditional and intelligent optimization algorithms, including genetic algorithms, particle swarm optimization, and deep learning. **RESULTS.** The application of modern models such as SRSM-SOCR, modified Bat algorithm (MBA), deep reinforcement learning (DRL) and deep recurrent neural network (DRNN) made it possible to reduce the operating costs of microgrids by 18-25%, increase the share of generation from renewable sources to 70-75% and reduce CO₂ emissions by up to 60%. Real-life examples of microgrids in Germany and Greece are also presented, confirming the effectiveness of these approaches. **CONCLUSION.** Based on a literature review, key directions for future research are identified, such as the integration of transfer learning and reinforcement learning to enhance model adaptability. The findings of this study can be useful for developing effective microgrid management strategies in the context of increasing renewable energy penetration and evolving energy system requirements.

Keywords: microgrids; planning optimization; multi-objective optimization; uncertainty; intelligent algorithms; renewable energy sources; energy storage systems.

For citation: Chen X., Du Y., Qin L., Velkin V.I. Optimization of microgrid scheduling: current approaches and prospects. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 130-152. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-130-152.

Введение (Introduction)

В последние годы наблюдается стремительный рост использования распределенных источников энергии в микросетях, что привело к активному изучению их различных аспектов в научной литературе. Микросети представляют собой новый тип сетевой структуры управления энергопотреблением, объединяя распределённые источники питания, устройства накопления энергии, преобразователи энергии, нагрузки и другие компоненты. Они формируют автономную систему производства и распределения электроэнергии, способную работать как в параллельном режиме с внешней сетью, так и в автономном режиме 1, структура микросетки показана на рисунке 1. Оптимальное планирование микросетей является важной задачей, направленной на рациональное распределение источников энергии, эффективное взаимодействие с основной сетью и учёт системных ограничений для достижения таких целей, как минимизация эксплуатационных затрат, снижение выбросов и повышение надёжности энергоснабжения 2.

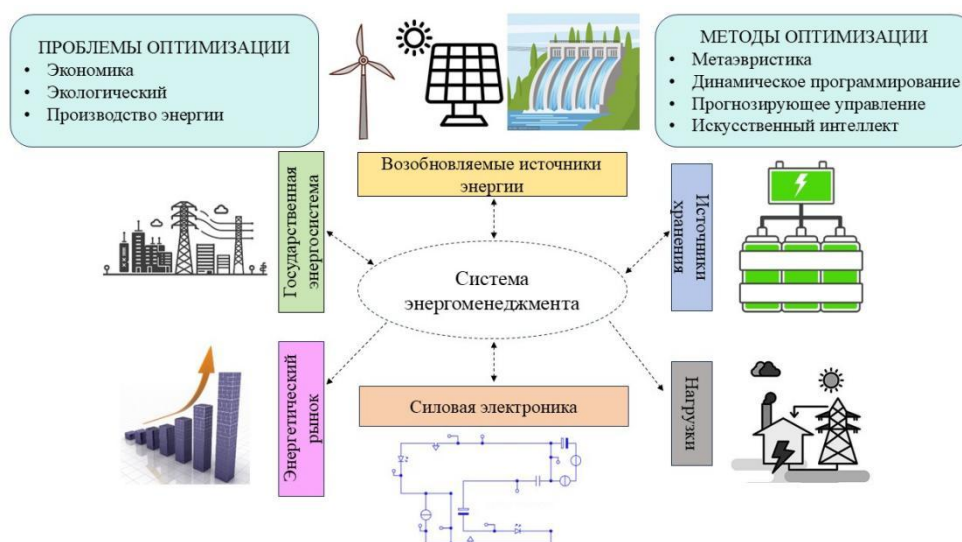


Рис. 1. Структурная схема микросети, иллюстрирующая взаимодействие распределенных источников энергии, накопителей и нагрузок

*Источник: [1] Source: [1].

Текущие исследования в области оптимизации микросетей охватывают широкий спектр тем. К настоящему времени проведено много исследований по оптимизации расписания в микросетях, например [3-10].

В литературе 3 предложен усовершенствованный алгоритм многоцелевого оптимизатора многомерной вселенной (MOMVO) для стохастической оптимизации мощности генерации в рамках автономно микросетей на основе возобновляемых источников энергии с целью снижения стоимости генерации и потерь электроэнергии. Результаты показывают, что предложенный алгоритм превосходит другие метаэвристические алгоритмы в многоцелевой оптимизации. В литературе 6 предлагается основанная на сценариях модель многоцелевой оптимизации для подключенных к сети микросетей, учитывающая затраты и выбросы углекислого газа, которая позволяет оптимизировать комбинированные экономические и экологические выгоды с помощью нового адаптивного многоцелевого генетического алгоритма (SAMOGA). Аналогичным образом, в литературе 9 достигается экономика-экологическая двузначная оптимизация с помощью оптимизатора grey wolf на основе противоположного градиента (OGGWO). В дополнение к этому, в литературе 10 рассматривается задача обеспечения надежности микросетей и достигается повышение надежности системы с наименьшими затратами за счет использования последовательного генетического алгоритма без доминирования (NSGA-II).

Анализ научной литературы показывает, что за последние пять лет было проведено множество исследований по многоцелевой оптимизации, которые обычно включают минимизацию эксплуатационных расходов 11, сокращение выбросов загрязняющих веществ 12, повышение надежности электроснабжения 13 и удовлетворение потребностей пользователей 14 и т.д. Эти цели часто противоречат друг другу, поэтому основной задачей оптимального планирования для микросетей становится достижение баланса между несколькими целями. Традиционные методы оптимизации часто обнаруживают ограничения при решении нелинейных, многоцелевых задач и задач с неопределенностью. По этой причине все больше и больше исследований начинают фокусироваться на интеллектуальных алгоритмах оптимизации, таких как генетический алгоритм 15, оптимизация роя частиц 16 и глубокое обучение 17. Эти алгоритмы способны не только эффективно решать сложные задачи оптимизации, но и обеспечивать адаптивное планирование в динамичных средах.

Несмотря на то, что большое количество исследований было посвящено оптимальному планированию микросетей, все еще остается много нерешенных вопросов. Во-первых, неопределенности в микросетях (например, нестабильность производства возобновляемой энергии 18, изменения спроса на нагрузку и колебания рыночных цен 19) создают серьезные проблемы для оптимального планирования. Во-вторых, с расширением масштабов микросетей и повышением спроса на совместную работу нескольких микросетей важным направлением исследований стало изучение того, как добиться обмена энергией и совместной оптимизации между несколькими микросетями. Кроме того, миграция и адаптивность интеллектуальных алгоритмов в практических приложениях по-прежнему требуют дальнейших исследований, чтобы обеспечить их универсальность и эффективность в различных системах с микросетями.

Цель исследования заключается в анализе современных подходов к оптимизации планирования микросетей, включая методы многоцелевой оптимизации, учет неопределенностей и применение интеллектуальных алгоритмов. В работе рассматриваются ключевые модели оптимизации, такие как минимизация эксплуатационных затрат, снижение выбросов и повышение надежности электроснабжения. Особое внимание уделяется методам учета неопределенностей, связанных с возобновляемыми источниками энергии и нагрузкой, а также роли систем накопления энергии и управления спросом.

Научная значимость исследования состоит в систематизации современных подходов к оптимизации микросетей, а также в выявлении ключевых направлений для будущих исследований, таких как интеграция миграционного обучения и глубокого обучения с подкреплением для повышения адаптивности моделей.

Практическая значимость исследования заключается в разработке эффективных стратегий управления микросетями в условиях растущей доли возобновляемых источников энергии и изменяющихся требований к энергосистемам. Результаты исследования могут быть использованы для повышения экономической эффективности, экологичности и надежности работы микросетей.

Материалы и методы (Materials and methods)

Многоцелевые модели оптимизации (Multi-objective optimization models)

Микросети обладают значительной экономической, технологической и экологической ценностью. Оптимизация их работы может включать одноцелевые или многоцелевые функции, направленные на максимизацию экономических выгод, экологических преимуществ и надёжности электроснабжения. К числу других целевых функций можно отнести удовлетворённость потребителей 20, способность к сглаживанию пиков и впадин нагрузки 21, а также минимизацию отклонений контактной линии 22. Общая форма многоцелевой оптимизационной модели может быть представлена следующим образом 23:

$$\begin{aligned} \min F(X) &= \min([f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)]^T) \\ \text{s. t. } X &\in \Omega \\ G(X) &= 0 \\ H(X) &\leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где X – переменные оптимизации; f_i – i -я целевая функция; Ω – пространство допустимых решений, удовлетворяющих ограничениям задачи; $G(X)$ и $H(X)$ – ограничения в форме уравнений и неравенств.

Оптимизация с учётом экономических выгод

Основная экономическая цель – минимизация совокупных эксплуатационных расходов системы микросетей. Эти расходы включают стоимость топлива, амортизацию оборудования, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также расходы на взаимодействие с внешней сетью.

$$F_1(t) = C_f(t) + C_{DP}(t) + C_{OM}(t) + C_{grid}(t) \quad (2)$$

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^n f_i P_i(t) \quad (3)$$

$$C_{DP}(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{az,i}}{8760 k_i} * \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} * P_i(t) \right] \quad (4)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^n K_{OM,i} P_i(t) \quad (5)$$

$$C_{grid}(t) = CP(t) * P_{grid}(t) \quad (6)$$

где $C_f(t)$, $C_{DP}(t)$ и $C_{OM}(t)$ – стоимость топлива, инвестиционные амортизационные отчисления, а также затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание каждого микроисточника питания в момент времени t ; $C_{grid}(t)$ – стоимость приобретения электроэнергии из внешней сети микросети в момент времени t ; f_i – функция стоимости топлива для i -го источника микроэнергии; $P_i(t)$ – активная мощность i -го источника микроэнергии в момент времени t ; n – количество источников микроэнергии; $C_{az,i}$ – стоимость установки i -го источника микроэлектроэнергии; k_i – коэффициент мощности i -го источника микроэлектроэнергии, который представляет собой годовую выработку электроэнергии i -м источником микроэлектроэнергии / (8760 * номинальная мощность этого источника микроэлектроэнергии); r – годовая процентная ставка; n_i – срок окупаемости инвестиций в i -й микроисточник электроэнергии; $K_{OM,i}$ – коэффициент затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание на единицу электроэнергии i -го микроисточника электроэнергии; $CP(t)$ – это цена электроэнергии, приобретаемой микросетью из внешней сети в момент t ; $P_{grid}(t)$ – это количество электроэнергии, приобретаемой микросетью из внешней сети в момент t .

Экологическая оптимизация

Минимизация воздействия на окружающую среду включает сокращение выбросов загрязняющих веществ (CO_2 , SO_2 , NO_x). Экологические затраты могут быть выражены следующим уравнением:

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^W \mu_j \left(\sum_{i=1}^N K_{ij} P_{i,t} + K_{Grid,j} P_{Grid,t} \right) \right) \quad (7)$$

где F_2 – стоимость очистки от загрязняющих веществ; μ_j – стоимость очистки от j -го загрязняющего вещества (CO , SO_2 , NO_x); $K_{Grid,j}$ – коэффициент выбросов загрязняющих веществ типа j для внешней сети; $P_{i,t}$, $P_{Grid,t}$ – мощность взаимодействия между i -м источником микромощности и сетью.

Надёжность электроснабжения

Для повышения эксплуатационной надёжности микросетей необходимо учитывать такие показатели, как отклонение напряжения 24, сетевые потери 25, ожидаемые потери при отключении электроэнергии у потребителей 26, вероятность потери нагрузки (LOLP) 26 и вероятность потери электроснабжения (LPSP) 28.

Примеры практического внедрения оптимизации микросеток

Чтобы убедиться в эффективности метода многоцелевой оптимизации при реальном управлении микросетями, можно обратиться к проекту микросети в городе Вильдполдсрид в Баварии, Германия 29. В 2012 году в городе Вильдполдсрид была внедрена интеллектуальная система microgrid, основанная на многоцелевой оптимизации. Проект объединяет фотоэлектрические системы, ветряные турбины, энергетические системы на биомассе и хранилища энергии. Алгоритмы оптимизации для рационального распределения распределенных энергетических ресурсов и объектов хранения энергии привели к повышению уровня самообеспеченности электроэнергией более чем на 300%, снижению стоимости электроэнергии на 25% и сокращению выбросов CO₂ более чем на 60%. Кроме того, в результате значительного повышения надежности среднегодовое время отключения электроэнергии в городе сократилось до менее чем 15 минут, что значительно ниже среднего показателя по Германии 30.

Еще одним примером, на который стоит обратить внимание, является проект Smart Microgrid (TILOS), расположенный на острове Тилос, Греция 31. В рамках проекта были установлены ветряные турбины мощностью 800 кВт, фотоэлектрические установки мощностью около 160 кВт и система хранения аккумуляторных батарей общей мощностью 2,8 МВтч 32. Благодаря интеллектуальному планированию и технологии многоцелевой оптимизации проект достиг максимального уровня охвата возобновляемыми источниками энергии в 75% и годового уровня энергетической самообеспеченности в 60-70%. Проект сокращает выработку дизельной электроэнергии на 1200 МВтч в год, экономит топлива около 220 тонн и сокращает выбросы углекислого газа CO₂ на 750 тонн. Кроме того, система значительно снизила затраты на электроэнергию и повысила надежность и стабильность электроснабжения острова, и во время пикового летнего потребления электроэнергии больше не возникает нехватки электроэнергии 33.

Методы решения многоцелевых задач (Methods for solving multi-objective problems)

Задача решения многоцелевой функции для оптимального планирования микросетей может быть решена путем преобразования многоцелевой функции в одноцелевую функцию с использованием метода линейного взвешенного суммирования, а затем с использованием традиционных методов или алгоритмов искусственного интеллекта для нахождения оптимального решения целевой функции; или с использованием искусственного интеллекта алгоритмы для получения набора решений по Pareto, а затем с использованием методов принятия решений для определения оптимального решения из набора решений по Pareto.

Традиционный алгоритм

Традиционные алгоритмы имеют строгую теоретическую основу и достаточно просты, чтобы найти глобальное оптимальное решение, определяемое оптимизационной моделью. Для одноцелевых моделей микросетей или моделей оптимизации с одной целью, полученных в результате многоцелевых преобразований, задача оптимизации преобразуется в задачу линейного программирования со смешанными целыми числами (MILP) с помощью линеаризации уравнений. В литературе 34 была разработана модель динамического планирования, основанная на определенных ограничениях, в которой учитывалось влияние некоторых неопределенностей на оптимальную работу микросеток. В литературе 35 для получения глобального оптимального решения использовался инструмент нелинейного планирования (Lingo). В литературе 36 задача оптимального планирования была преобразована в модель смешанного целочисленного линейного программирования с целью минимизации общих затрат энергии на микросеть. В литературе 37 была проведена линеаризация модели срока службы аккумуляторной батареи с использованием сегментированной линеаризации и методов large-M для реализации оценки потери срока службы аккумуляторной батареи в микросетях. В литературе 38 использовалось многоцелевое смешанное целочисленное линейное программирование (MO-MILP) с учетом как топологических, так и операционных ограничений для достижения цели оптимизации, заключающейся в эффективном выборе подключенных узлов микросетей и их генерирующей способности с наименьшими отклонениями. В литературе 39 для проведения исследования по оптимальному планированию микросетей для долгосрочного и краткосрочного совместного накопления энергии была построена модель планирования микросетей с целью экономической оптимизации для гибридной ветро-фотоэлектрическо-водородной системы микросетей, которая была преобразована в линейную систему со смешанным целым числом. Проблема программирования была решена с помощью решателя Yalmip/Gurobi.

Интеллектуальный алгоритм

Поскольку распределенная периодически возобновляемая энергия в микросетях обычно состоит из фотоэлектрической энергии, энергии ветра и т.д., на проблему

оптимальной работы микросетей влияют многие нелинейно коррелированные переменные и множество ограничений, и проблему оптимизации традиционными методами решить сложно. По сравнению с традиционными алгоритмами, интеллектуальные алгоритмы широко используются в области оптимизации микросеток благодаря своим чрезвычайно быстрым и точным поисковым характеристикам, а их диапазон решений не ограничивается только локальными. В последние годы появляются интеллектуальные алгоритмы оптимизации, такие как многоцелевые генетические алгоритмы, алгоритмы роя частиц, улучшенные многоцелевые эволюционные алгоритмы и т.д., которые имеют широкий диапазон поиска и позволяют точно и быстро выполнять поиск по нескольким целям одновременно.

Чтобы проанализировать текущее применение интеллектуальных алгоритмов при решении многоцелевых задач микросетей, приведем следующую сводную таблицу литературы (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Сводный анализ литературы, включенной в обзор
Summary analysis of the literature included in the review

Алгоритм	Цели оптимизации	Сценарий применения	Метрики
Новая надежная многоцелевая оптимизационная модель, основанная на аффинной настраиваемой политике 40	Минимизация эксплуатационных расходов	Микросеть дата-центра в автономном режиме	Эксплуатационные расходы снизились примерно на 10%
Улучшенный многоцелевой алгоритм серого волка 41	Минимизация эксплуатационных расходов и уменьшенные колебания чистой нагрузки	Автономная микросеть с опреснительной установкой и электромобилем	При совместной работе EV+DES кривая нагрузки значительно сглаживается и повышается коэффициент использования новой энергии (конкретные значения в этой статье не приводятся).
Метод сочетания смешанного целочисленного линейного программирования и алгоритма искусственной пчелиной семьи 44	Повышение экономической эффективности; Снижение операционных рисков в микросетях	Координация и планирование работы кластера микросетей	По сравнению со стандартными ABC и GA стоимость ниже, а стабильность планирования микросетей выше (конкретное значение не указано).
Алгоритм многоцелевой поисковой оптимизации и метод нечеткой функции принадлежности 46	Комплексные эксплуатационные расходы, средняя полезная нагрузка и колебания мощности микросети	Подключенная к сети фотоэлектрическая микросеточная система	Вариант 1 (упорядоченная зарядка и разрядка EV + реагирование на участие TL) дает наилучшие результаты: общие эксплуатационные расходы составляют 12 800 евро, средняя полезная нагрузка - 665,7 кВт, а колебания - 4884 кВт.
Метод линейного взвешивания, основанный на игре с нулевой суммой для двух человек 47	Эксплуатационные и экологические затраты	Микросеточная система в автономном режиме	Эксплуатационные расходы снизились на 10,7%; доля генерирующих мощностей фотоэлектрических

			электростанций, которая не поступает в сеть и поглощается нагрузкой, снизилась на 21,3%; LPSP \leq 3%
Усовершенствованный алгоритм оптимизации поиска пищи бактериями 48	Эксплуатационные расходы	Режим подключения	По сравнению с PSO затраты снижаются на 3,79%; по сравнению с традиционным BFO затраты снижаются на 5,23%
Генетический алгоритм 49	Общие инвестиционные затраты, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также выбросы углекислого газа в системе	Автономная гибридная энергетическая микросеть	Срок службы дизель-генераторов увеличился на 42,9% ; Общая стоимость снижена на 3,5% ; Выбросы углекислого газа сократились на 0,7%
Алгоритм поиска sparrow, основанный на случайном блуждании(RSSA) 50	Эксплуатационные и экологические затраты	Микросеточная система с ССНР, включающая пиролиз и газификацию биомассы	По сравнению с алгоритмами PSO, SSA и CSSA эксплуатационные расходы, рассчитанные с помощью алгоритма RSSA, были снижены на 3,2%, 2,9% и 0,09% соответственно, а затраты на охрану окружающей среды были снижены на 6,2%, 3,4% и 6,2% соответственно.
Усовершенствованный алгоритм создания искусственной пчелиной семьи, основанный на алгоритме поиска усиков жука (BAS-ABC) 51	Ежедневные затраты на диспетчеризацию выработки электроэнергии и ежедневные затраты на очистку окружающей среды от загрязняющих веществ	Подключенная к сети микросеть с ССНР	Скорость сходимости алгоритма BAS-ABC выше, чем у традиционного алгоритма ABC ; Минимальная стоимость микросетки, решаемой с помощью BAS-ABC, ниже, чем у традиционного алгоритма ABC (конкретное значение не указано).
Улучшенный алгоритм поиска sparrow (ISSA) 52	Эксплуатационные расходы микросети и удовлетворение потребностей в электроэнергии на стороне потребителя	Подключенная к сети микросеть с СНР	План, который всесторонне учитывает эксплуатационные расходы и удовлетворенность пользователей, является более экономичным: затраты увеличились всего на 0,67%, но неудовлетворенность пользователей снизилась на 72,97%.
Алгоритм оптимизации содержания рыбы в илистом грунте (MSFOA) 53	Общая стоимость производства	Режим подключения автономный режим	Предлагаемый метод MSFOA минимизирует общую стоимость производства по

			сравнению с методом прогнозирования на основе эвристической модели, предиктором-корректором-проксимальным множителем и улучшенным алгоритмом дифференциального поиска на 3,76%, 8,32% и 19,3% соответственно.
Улучшенный алгоритм Mayfly 54	Эксплуатационные расходы микросети и затраты на очистку от загрязняющих веществ	Автономная микросеть, включающая термоэлектрическую (дизельную), фотоэлектрическую и ветровую энергию	По сравнению с базовым алгоритмом MA, общие эксплуатационные расходы и выбросы снижаются при четырех режимах нагрузки (конкретное значение не указано).
Многостратегический алгоритм плавления шламовых плесеней (MFSMA) 55	Эксплуатационные расходы микросети и затраты на очистку от загрязняющих веществ	Двухрежимная микросеть (подключенная к сети/автономная)	По сравнению со стандартными SMA, SSA, GWO, PSO и т.д., MFSMA работает быстрее, имеет самую низкую среднюю стоимость и затраты на загрязнение окружающей среды, а качество оптимального решения на 7,08-28,5% выше.
Усовершенствованный алгоритм оптимизации бабочки (BOA), основанный на кривой хаотической карты, мутации Коши и симплексном методе 56	Эксплуатационные расходы микросети и экологические затраты	Кластерная система микросети	В микросети, подключенной к сети, стоимость PSO составляет 4338,14 ю, стоимость WOA - 4165,94 ю, стоимость SSA - 4046,61 ю, стоимость BOA - 4105,38 ю, а стоимость IBOA - 3957,49 ю.
Сверточная нейронная сеть, основанная на физике 79	Быстро подбирайте оптимальное решение для планирования, снижайте эксплуатационные расходы.	Автономная микросеть с несколькими источниками энергии	По сравнению со стандартными CNN и ANN ошибка прогнозирования снижена на 21%, а затраты на планирование снижены на 9,4%; модель обладает большей стабильностью.
Алгоритм DRL "Актер-критик" (AC), основанный на знаниях и опирающийся на данные 80	Максимизация преимуществ использования возобновляемых источников энергии и реагирования на нагрузку	Подключенная к сети микросеть с нагрузкой на базовую станцию 5G	Алгоритм "knowledge-assist AC" дополнительно сокращает общие затраты на 3,87% и выбросы углекислого газа на 3,43%.
Двухступенчатый алгоритм DRL (GAN-DDPG) 81	Максимизируйте коэффициент использования возобновляемых	Экологичная микросеть, включающая энергию ветра,	Предлагаемая схема GAN-DDPG позволяет снизить совокупные затраты до 35% при

	источников энергии и минимизируйте затраты на планирование	фотоэлектричество и накопители энергии	снижении выбросов углекислого газа на 23% по сравнению с традиционным алгоритмом DRL.
Персонализированное федеративное мультиагентное обучение с подкреплением на основе кластеризации (C-PFMARL) 82	Достижение экономических и низкоуглеродных выгод	Взаимосвязанные системы с несколькими микросетями (MMG)	Общая комплексная стоимость системы MMG была снижена на 5,78 %, а выбросы углекислого газа сократились на 8,43 %.
Алгоритм DRL с расширенной информацией (IE-DRL) 83	Максимально эффективное использование возобновляемых источников энергии и снижение затрат на планирование	Гибридная микросеть с подключением к сети/автономным, которая учитывает контрольные периоды	Расширенные версии четырех базовых алгоритмов DRL (IE-DDPG, IE-SAC, IE-TD3 и IE-PPO) позволили снизить эксплуатационные расходы на 5,63%, 12,85%, 7,87% и 6,52% соответственно.

*Источник: составлено авторами на основе источников литературы, указанных в таблице

*Source: compiled by the authors based on the references listed in the table

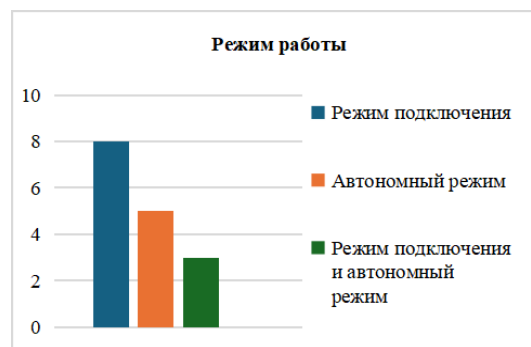


Рис. 2. Результаты анализа характеристик, выделенных в этом обзоре, и частота их использования

Fig. 2. Plot of results for the characteristics identified in this review and the frequency of use

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

Из рисунка 2 видно, что экономическая эффективность является приоритетной задачей при изучении оптимального планирования микросетей. В случае микросетей экономическая цель требует рационального распределения различных распределенных источников энергии и требований к нагрузке для снижения затрат на производство и улучшения использования энергии при условии удовлетворения требований к нагрузке. Для автономных микросетей, которые не зависят от внешних источников энергии или электросетей и обеспечивают системную самодостаточность за счет диверсификации энергопотребления и оптимизации диспетчеризации, их экономические цели часто напрямую связаны с эффективным использованием энергии 40, 41 и контролем затрат 49, 54, чтобы обеспечить экономичное энергоснабжение и экономическую безопасность для потребителей долгосрочное развитие. Для подключенных к сети микросетей, режимы работы которых необходимо гибко переключать между автономной работой и взаимодействием с основной сетью, их экономически оптимальное планирование направлено на снижение эксплуатационных расходов и повышение эффективности использования энергии при одновременном максимизации доходов за счет разумного распределения производства, накопления и потребления энергии. В условиях подключения к электросети микросеть взаимодействует с основной сетью и может гибко достигать экономической оптимизации в зависимости от рыночных тарифов, спроса на нагрузку и условий энергоснабжения. Реализация технологии экономичного планирования для микросетей, подключенных к сети, основана на различных передовых технологиях и инструментах для оптимизации планирования энергопотребления с помощью точного

прогнозирования, динамического управления и интеллектуальных алгоритмов, например, систем управления энергопотреблением (EMS) 43, 53, алгоритмов прогнозирования 42, 47, 52, алгоритмов оптимизации 48, 50, 51 и т.д.

Важность экологически чистого оптимального планирования в микросетях возрастает в связи с глобальным переходом к энергетике и повышением осведомленности о защите окружающей среды. Цель обеспечения экологичности микросетей заключается в минимизации воздействия использования энергии на окружающую среду, особенно с точки зрения сокращения выбросов углекислого газа 54, 55 и улучшения использования энергии 40.

Кроме того, решающее значение также имеет влияние задач по обеспечению надежности на оптимальное планирование работы микросетей, что связано со способностью микросетей стабильно и непрерывно предоставлять высококачественные услуги электроснабжения потребителям в различных условиях эксплуатации. Планирование оптимизации надежности включает в себя: обеспечение непрерывности энергоснабжения 53, снижение показателя эксплуатационного риска 44, диагностику неисправности 46, удовлетворение потребностей клиентов 52 и т.д.

Методы оптимизации с учетом неопределенности (Optimization methods taking into account uncertainty)

Микросети могут интегрировать распределенные энергоблоки и возобновляемые источники энергии с помощью передовых информационных технологий управления, обеспечивая надежное энергоснабжение потребителей электроэнергии в микромасштабных масштабах и в то же время максимизируя экономические выгоды и защиту окружающей среды. Однако, учитывая разнообразие энергетических нагрузок и растущее распространение возобновляемых источников энергии, природные условия влияют на распределенные возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и фотоэлектрические установки, а также их большую непостоянность 57, и эти неопределенности создают новые проблемы для оптимизации работы микросетей. Например, возобновляемые источники энергии для выработки электроэнергии зависят от природных условий, в то время как погода непредсказуема и ее трудно точно предсказать, что усложняет оптимизацию микросетей; Оптимальное планирование требует минимизации экономических и экологических затрат при одновременном обеспечении эффективности планирования, а энергетическая неопределенность усложняет модели планирования. В дополнение к неопределенности, связанной с возобновляемыми источниками энергии, нестабильность нагрузки на стороне потребителя может привести к возможному дисбалансу спроса и предложения при разработке графиков диспетчеризации на сутки вперед и в режиме реального времени, что требует всестороннего учета предложения на стороне нагрузки и спроса 58.

Неопределенность в области возобновляемых источников энергии и нагрузки

Чтобы обеспечить эффективную и стабильную работу микросетей, они обычно интеллектуально управляются и автоматически планируются для принятия решений системами энергоменеджмента. Целью долгосрочной оптимизации энергоменеджмента микросетей является минимизация эксплуатационных расходов и потерь в микросети при максимальном использовании распределенных источников энергии, а также оснащение сети устройствами накопления энергии и обеспечение управления на уровне спроса для обеспечения удовлетворения потребностей в надежности электроснабжения.

В литературе 59 предложена стохастическая стратегия оптимизации планирования микросетей со стохастическими колебаниями в поставках возобновляемой энергии и спросе на нагрузку с использованием моделирования методом поверхности стохастического отклика (SRSM) и оптимальных решений на основе конусной релаксации второго порядка (SOCR). В частности, на основе теории SRSM стохастическое распределение неопределенности преобразуется в независимое стандартное нормальное распределение с помощью преобразования Nataf, а хаотические полиномы Эрмита формулируются для описания процесса стохастического реагирования при регулировании микросетей. На этой основе они также построили модель стохастической оптимизации (SO) с многоцелевой функцией на основе SRAM для достижения наиболее экономичной работы, контроля колебаний затрат и снижения выбросов углекислого газа. Хотя методы SRSM и SOCR могут эффективно справляться с моделированием случайности, они предъявляют высокие требования к качеству данных и высокой вычислительной сложности для распределения вероятностей и хаотического полиномиального моделирования. В литературе 60 предложена система управления энергопотреблением для подключенной к сети микросети с возобновляемыми источниками энергии, включающей фотоэлектрическую энергию (PV), энергию ветра, топливные элементы, микрогазовую турбину и систему хранения

аккумуляторных батарей. Для работы фотоэлектрических систем в микросетях они предложили новую математическую модель для оценки влияния различной интенсивности излучения на планирование работы микросетей на день вперед в разные даты и в разное время года. Неопределенность в выходной мощности фотоэлектрической энергосистемы, ошибки прогнозирования спроса на нагрузку и вариации предложения в сети моделируются с помощью сценарного анализа, а затем решаются с помощью модифицированного алгоритма Bet (Modified Bet Algorithm, MBA), который эффективно повышает точность системы управления энергопотреблением и способен снизить общие эксплуатационные расходы. Этот метод имеет преимущества в повышении точности оптимизации, но в задачах оптимизации большой размерности могут возникнуть проблемы с медленной сходимостью и локальной оптимизацией. В литературе 61 была разработана многоцелевая модель оптимального планирования для островных микросетей, учитывающая неопределенность производства возобновляемой энергии, с учетом экономической эффективности и частоты колебаний микросетей в качестве целей оптимизации, и предложен двухэтапный метод оптимального планирования, основанный на классификации мощности. Во-первых, метод Монте-Карло используется для оценки математического ожидания и дисперсии целевой функции, и в результате выборки получается определенное количество выборок; во-вторых, алгоритм оптимизации роя частиц используется для определения графиков установки источника питания FM и источника питания базовой нагрузки с целью минимизации среднего значения стоимости выборки; и, наконец, нейронная сеть обратного распространения используется для построения политики FM для источника питания FM. Результаты показывают, что модель и предложенный метод двухэтапного планирования являются разумными и эффективными в контексте большого количества выборок. Этот метод хорошо справлялся с неопределенностью, но общая вычислительная сложность высока и существуют определенные ограничения в режиме реального времени. В то же время результаты моделирования зависят от сходимости и установки начального значения при обучении нейронной сети. В литературе 62 для решения задачи предварительного суточного планирования аккумуляторных систем применен алгоритм медоеда (Honey Badger Algorithm, HBA). Результаты показывают, что основанная на HBA двухуровневая стратегия управления энергопотреблением обеспечивает оптимальную экономичную работу подключенной к сети микросети в режиме реального времени в условиях неопределенности погоды, тарифов на коммунальные услуги и нагрузки прогнозирования. Алгоритм HBA обладал определенной способностью к глобальному поиску, но он чувствителен к настройкам параметров и подходит для небольших и среднemasштабных систем. В литературе 63 предложена стратегия оптимального планирования на нескольких временных масштабах для микросетей, учитывающая неопределенность нагрузки источника. На этапе планирования на сутки вперед разрабатывается двухэтапная модель надежного оптимального планирования распределения с целью минимизации затрат на интегрированное планирование на сутки вперед для микросети, и оптимальная схема планирования на сутки вперед определяется в соответствии с распределением вероятности наихудшего сценария. На этапе внутрисуточного планирования, основанный на высокоточных прогнозах источника и нагрузки, метод прогнозирующего управления распределенной моделью используется для построения оптимальной модели внутрисуточной скользящей оптимизации и корректировки в режиме реального времени, которая обеспечивает эффективное выполнение плана на день вперед и эффективно подавляет колебания мощности в контактной линии. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод оптимальной диспетчеризации с несколькими временными рамками позволяет не только поддерживать бесперебойную подачу электроэнергии на контактную линию, но и обеспечить надежную и экономичную работу микросети. Этот метод учитывал надежность и экономичность, но структура модели сложна и требует больших вычислительных ресурсов.

Неопределенность в области накопления энергии и реагирования на спрос

Система накопления энергии также является важной частью микросети, которая может смягчить колебания мощности, вызванные перебоями в работе возобновляемых источников энергии, и ее конфигурация мощности также окажет влияние на работу микросети. Оптимизированная работа системы накопления энергии важна для снижения эксплуатационных расходов микросети. Литература 64 В связи с оптимизированным планированием микросетей с учетом батарей и систем аккумуляции энергии был разработан новый метод расчета, основанный на временных интервалах. Для достижения этой цели в данной статье сначала моделируется оптимизированное планирование микросетей для хранения энергии с насосом и аккумуляторных батарей, которые учитывают

реакцию на спрос. Затем для устранения неопределенности используется новая формула, основанная на интервалах. Наконец, предложенная модель была проверена с помощью моделирования при различных обстоятельствах, и результаты подтвердили эффективность новой формулы, основанной на интервалах, для оптимизации планирования микросетей с накопителями энергии с накачкой и аккумуляторами в неопределенных условиях. Этот метод повышает точность планирования, но модель интервалов сложна в настройке, и при настройке параметров необходимо соблюдать осторожность. В литературе 65 сначала предложен усовершенствованный метод глубокого обучения на основе активационной функции *swish* для прогнозирования фотоэлектрической генерации и спроса на нагрузку. Затем, основываясь на результатах прогнозирования, был использован не требующий моделирования, легкий, управляемый данными адаптивный алгоритм обучения с подкреплением для решения оптимального планирования работы накопителей энергии, которое позволило разработать онлайн-стратегию хранения энергии в режиме реального времени. Хотя этот метод легко адаптируется, он в значительной степени зависит от данных и обладает ограниченной надежностью модели.

При реальной эксплуатации микросети также существуют разные пользователи с разным спросом на электроэнергию, реагирование на спрос является средством потребления возобновляемой энергии, включая два разных типа реагирования – стимулирующее и тарифное, и их неопределенность также вызывает озабоченность ученых. В литературе 66 предложен многоэтапный метод оптимизации управления энергией микросети с учётом неопределённостей, связанных с рынком торговли выбросами углерода и откликом со стороны потребителей (DSR). Во-первых, метод сценарного анализа используется для устранения неопределенностей, связанных с возобновляемыми источниками энергии в микросети, и генерируются четыре типичных сценария использования возобновляемых источников энергии. Затем, исходя из предпосылки рассмотрения рынка торговли выбросами углерода, рассматриваются гибкая конфигурация и эксплуатационные ограничения каждого источника питания в микросети. Третий этап включает в себя объединение характеристик различных типов нагрузки и использование методов DSR, основанных на цене и переносе нагрузки, для анализа влияния различных процентных соотношений жилой и промышленной нагрузки соответственно. Наконец, для получения оптимального решения используется алгоритм оптимизации роя квантовых частиц (QPSO). Полученные результаты доказывают эффективность предложенной многоэтапной системы оптимизации энергопотребления. Многоступенчатая модель оптимизации улучшал систематизацию стратегии планирования, но ее вычислительная сложность высока, а время решения может оказаться слишком большим. В литературе 67 рассмотрено влияние фотоэлектрической энергии и неопределенности нагрузки потребителей в долгосрочных масштабах и предлагается стратегия системы накопления энергии, учитывающая рекомендации по реагированию на спрос. Этот метод учитывает долгосрочную гибкость, однако в значительной степени зависит от точности прогноза. В литературе 68 разработана основанная на риске стохастическая модель оптимального управления энергопотреблением для микросетей с возобновляемыми источниками энергии, хранилищами энергии и управлением нагрузкой с помощью процедур реагирования на спрос, основанных на времени. Теория принятия решений о нехватке информации (IGDT) была использована для решения проблемы неопределенности нагрузки и разработки стратегии управления энергопотреблением, управляемой микросетями. Они исследовали три различные стратегии управления рисками, такие как модель неприятия риска, модель нейтрализации риска и модель поиска риска. Результаты показывают, что неприятие риска лицом, принимающим решения, или стремление к риску влияют на работу системы. Кроме того, использование планов реагирования на спрос в методах неприятия рисков и поиска рисков влияет на потребление и общие затраты. Лица, принимающие решения, могут снизить риски за счет увеличения потребления энергии или снизить затраты, используя планы реагирования на спрос для сокращения потребления. Предложенная модель хорошо описывает предпочтения в отношении риска, однако требует предварительного задания доверительного интервала и зависит от субъективных параметров, что ограничивает её обобщающую способность.

Прогнозирование нагрузки

В процессе планирования электросетевого хозяйства важную роль играет прогнозирование электрической нагрузки на основе возобновляемых источников энергии, и повышение уровня прогнозирования электрической нагрузки имеет большое значение для планирования потребления электроэнергии, плана технического обслуживания энергоблоков, рациональной организации режима работы сети и улучшения социальных

льгот. Прогнозирование нагрузки на микросети отличается от традиционного прогнозирования нагрузки на электроэнергию. Возобновляемые источники энергии, такие как фотоэлектрическая энергия и энергия ветра, будут подвержены влиянию погодных условий и других факторов окружающей среды при выработке электроэнергии, а выходная мощность будет нестабильной с перебоями и случайностью [69]; в то же время, в микросети происходят колебания контролируемых нагрузок, что увеличивает сложность оптимального планирования. Чтобы обеспечить эффективную и стабильную работу микросетей и добиться регулирования микроисточников питания, накопителей энергии и нагрузок в микросетях, необходимо учитывать баланс нагрузок и мощности. В литературе [70] разработана модель глубокой рекуррентной нейронной сети (DRNN-LSTM) с блоками долговременной и кратковременной памяти для прогнозирования общей электрической нагрузки и фотоэлектрической генерации (PV) в микросети сообщества. Между тем, были разработаны оптимальные модели диспетчеризации нагрузки для подключенных к сетям общественных микросетей, включая электрические нагрузки в жилых домах, фотоэлектрические системы, электромобили (EVS) и системы накопления энергии (ESSS), в рамках трех различных сценариев диспетчеризации. Чтобы обеспечить баланс между спросом и предложением, в модели учитывается неопределенность в потреблении электроэнергии в домашних хозяйствах и производстве фотоэлектрической энергии. Наконец, для оптимизации распределения нагрузки подключенной к сети микроэлектростанции сообщества был использован алгоритм оптимизации роя частиц (PSO). Несмотря на высокую способность модели DRNN-LSTM к обработке временных рядов, её обучение требует значительных затрат времени и чувствительно к качеству долгосрочных исторических данных. Кроме того, алгоритм PSO подвержен риску преждевременной сходимости в условиях высокоразмерного пространства поиска, что может повлиять на достижение глобального оптимума в задачах диспетчеризации. В литературе [71] разработан одноступенчатый метод многопериодного прогнозирования, основанный на принципе "PER-AutoR", для выполнения многопериодного прогнозирования выработки и нагрузки на возобновляемые источники энергии; во-вторых, для минимизации общих эксплуатационных расходов строится модель диспетчеризации, учитывающая реакцию спроса; наконец, исходная модель диспетчеризации преобразуется в простое в решении линейное программирование со смешанными целыми числами для решения этой задачи. Результаты показывают, что предложенный метод значительно снижает эксплуатационные расходы системы за счет повышения точности прогнозирования по сравнению с традиционной моделью планирования без прогнозирования. Несмотря на значительное улучшение прогноза, метод обладает высокой степенью интеграции, что снижает интерпретируемость модели. Сложная нейронная сеть, которая сочетает в себе сверточную нейронную сеть (CNN) с Gated Recurrent Unit (GRU) для прогнозирования производства возобновляемой энергии, тарифов и нагрузок, была предложена в работе [72]. Однако традиционное обучение под наблюдением требует высококачественных наборов данных для обучения, чтобы получить идеальную производительность прогнозирования, что в некоторой степени ограничивает применение таких методов в реальных системах. В работе [73] предложена новая модель прогнозирования GA-AWPSO-LSTM-GAM, основанная на глубоком обучении, для решения проблемы неопределенности в отношении выработки энергии из возобновляемых источников, нагрузки и цены на сутки вперед (DAP).

Как справиться с неопределенностью производства возобновляемой энергии и нагрузки на нее, является ключевым вопросом для изолированной микросети, которая имеет относительно небольшую мощность и не может получать поддержку от основной сети [74]. В самом начале работы [75] была предложена экономичная модель эксплуатации микросетей, которая учитывает такие ограничения, как когенерация микросетей и резервная мощность, и основана на использовании различных форм распределенных источников энергии. В литературе [76] применён метод робастной оптимизации, в рамках которого диапазоны изменений выработки энергии ветрогенераторами и потребительской нагрузки выражены с учётом неопределённости. В литературе [77] разработана сквозная моделируемая двунаправленная, долгосрочная и краткосрочная сверточная нейронная сеть (E2E BiLSTM-CNN) для прогнозирования изменения мощности ветра и нагрузки в течение 24-часового периода. Данная модель обладает высокой способностью к извлечению временных признаков и распознаванию локальных шаблонов, обеспечивая высокую точность прогноза. Однако сложность архитектуры модели приводит к увеличенному времени обучения, а её эффективность снижается в условиях ограниченного объёма данных или при высоких требованиях к обобщающей способности. В литературе [78] авторы установили оптимальное распределение вероятностей, основанное на исторических данных о выходе и нагрузке

WTG, а затем использовали подход программирования с ограниченными возможностями для планирования микросетей. Такой подход обеспечивает баланс экономичности и надежности работы микросети, но при этом в качестве входных данных для планирования используются выходные данные WTG и данные о нагрузке в виде усредненных значений, что не может служить надежной основой для модели планирования.

Заключение (Conclusion)

В статье выполнен систематический анализ современных исследований в области оптимизации планирования микросетей, предложена модель многоцелевой оптимизации, рассмотрены методы решения соответствующих задач. Особое внимание уделено неопределённым, связанным с генерацией возобновляемой энергии, прогнозированием нагрузки, системами накопления энергии и управлением спросом. Несмотря на богатство результатов исследований и их практическую значимость, анализ научной литературы выявил ряд существенных препятствий для широкого внедрения представленных методов на практике:

(I) Основные барьеры для внедрения существующих методов

1) Высокая вычислительная сложность и ресурсоёмкость алгоритмов

Широко используемые интеллектуальные методы оптимизации, такие как глубокое обучение и эволюционные алгоритмы, характеризуются высокой вычислительной сложностью и значительными требованиями к ресурсам. Это существенно затрудняет применение таких методов в микросетях малой и средней мощности, ограничивая их практическое использование.

2) Низкая адаптивность и ограниченная переносимость моделей

Существующие модели оптимизации обладают низкой способностью к переносу решений, полученных в одних условиях, на микросети с иными характеристиками и параметрами. В силу значительного различия между реальными микросетями это сильно ограничивает широкое внедрение разработанных методов.

3) Недостаток качественных данных

Эффективность интеллектуальных методов напрямую зависит от качества и доступности исторических и оперативных данных. Однако во многих практических случаях инфраструктура сбора и обработки данных не развита, что негативно сказывается на качестве работы оптимизационных алгоритмов.

4) Ограниченные возможности применения алгоритмов в реальном времени

Многие существующие алгоритмы требуют продолжительного времени расчёта и не способны быстро реагировать на изменения условий эксплуатации в режиме реального времени. Это затрудняет их применение для планирования работы микросетей в реальном времени.

5) Нормативные и экономические ограничения

Отсутствие четких нормативно-правовых механизмов и экономических стимулов снижает интерес инвесторов и компаний к применению новых технологий, что усложняет внедрение инновационных решений.

С учётом указанных проблем и вызовов дальнейшие исследования должны быть направлены на решение следующих задач:

(II) Перспективные направления дальнейших исследований

1) Снижение вычислительной сложности алгоритмов и повышение их оперативности

Разработка оптимизационных алгоритмов с пониженной вычислительной сложностью, обеспечивающих высокую скорость расчётов, позволит эффективно использовать их в микросетях любого масштаба в условиях реального времени.

2) Повышение адаптивности и переносимости моделей

Исследование и разработка методов интеграции миграционного обучения (transfer learning) и глубокого обучения с подкреплением (deep reinforcement learning) обеспечит повышение универсальности и адаптивности моделей, позволяя переносить решения между микросетями с разными характеристиками и условиями эксплуатации.

3) Совершенствование систем сбора и обработки данных

Необходимо развивать инфраструктуру сбора и предварительной обработки данных, повышать качество формируемых баз данных, чтобы обеспечить надежную информационную основу для эффективного функционирования интеллектуальных алгоритмов.

4) Моделирование и совместная оптимизация с учетом различных неопределённостей

Разработка новых моделей оптимизации, одновременно учитывающих различные неопределённости (например, связанные с ветровой и солнечной энергией, нагрузками, системами накопления), позволит повысить точность и надёжность решений, принимаемых

в реальных условиях эксплуатации микросетей.

5) Разработка методов оптимального планирования и координации работы группы микросетей

Исследования должны быть направлены на создание эффективных методов совместного планирования нескольких микросетей как в автономном, так и в сетевом режиме, что позволит обеспечить стабильность и экономическую эффективность всей энергосистемы.

6) Исследование нормативной базы и экономических механизмов

Необходимо активизировать междисциплинарные исследования в области экономики и права с целью разработки и внедрения эффективных нормативных и экономических механизмов, стимулирующих инвестиции и внедрение интеллектуальных оптимизационных решений.

Таким образом, целенаправленное преодоление перечисленных барьеров и реализация предложенных перспективных направлений позволят существенно повысить эффективность и практическую востребованность современных методов оптимизации планирования микросетей.

Литература

1 Гуломзода А.Х., Сафаралиев М.Х., Люханов Е.А. Модифицированный способ синхронизации Microgrid с внешней изолированной энергосистемой // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3(52). С. 72-80. Doi:10.18503/2311-8318-2021-3(52)-72-80

2 Gu W., Wu Z., Bo R., et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014. Vol. 54. pp. 26-37. Doi: 10.1016/j.ijepes.2013.06.028

3 Upasana L., Nasreen B., Irraivan E., et al. An Enhanced Multi-Objective Optimizer for Stochastic Generation Optimization in Islanded Renewable Energy Microgrids // Mathematics. 2023. Vol. 11, N9. 2079. Doi: 10.3390/math11092079

4 Seddaoui N., Boulouma S., Rahmani L. A hybrid Improved Salp Swarm Algorithm and Harris Hawk Optimizer for energy planning in microgrids with minimum operating cost // International Journal of Green Energy. 2024. Vol. 22, N1. pp. 72–89. Doi: 10.1080/15435075.2024.2406844

5 Wu X., Shan Y., Fan K. A Modified Particle Swarm Algorithm for the Multi-Objective Optimization of Wind/Photovoltaic/Diesel/Storage Microgrids // Sustainability. 2024. Vol. 16, N03. 1065. Doi: 10.3390/su16031065

6 Zhu X., Peng C., Geng H. Multi-Objective Sizing Optimization Method of Microgrid Considering Cost and Carbon Emissions // 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Beijing, China. 2022. pp. 2278-2283. Doi:10.1109/SPIES55999.2022.10082041.

7 Wang X., Wang S., Ren J., et al. Optimizing Economic Dispatch for Microgrid Clusters Using Improved Grey Wolf Optimization // Electronics. 2024. Vol. 13, N16. 3139. Doi: 10.3390/electronics13163139

8 Dong A., Lee S-K. The Study of an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Economic Dispatch in Microgrids // Electronics. 2024. Vol. 13, N20. 4086. Doi: 10.3390/electronics13204086

9 Rajagopalan A., Nagarajan K., Montoya O. D., et al. Multi-Objective Optimal Scheduling of a Microgrid Using Oppositional Gradient-Based Grey Wolf Optimizer // Energies. 2022. Vol. 15, N23. 9024. Doi:10.3390/en15239024

10 Maël R., Florian D., Dominique G., et al. Multi-Objective Optimization of Autonomous Microgrids with Reliability Consideration // Energies. 2021. Vol. 14, N15. 4466. Doi: 10.3390/en14154466

11 Younes Z., Alhamrouni I., Mekhilef S., et al. A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid // Ain Shams Engineering Journal. 2021. Vol. 12, N2. pp. 1985–1994. Doi: 10.1016/j.asej.2020.10.021

12 Karthik N., Rajagopalan A., Bajaj M. et al. Chaotic self-adaptive sine cosine multi-objective optimization algorithm to solve microgrid optimal energy scheduling problems // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. 18997. Doi: 10.1038/s41598-024-69734-4

13 Yang X., Leng Z., Xu S., et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ϵ -constraint method // Renewable Energy. 2021. Vol.172. pp. 408-423. Doi: 10.1016/j.renene.2021.02.165

14 Zhao G., Luo J., Song N., et al. Multi-objective optimal dispatch of island microgrid considering a novel scheduling resource // Electric Power Systems Research. 2025. Vol.241:111378. Doi:10.1016/j.epsr.2024.111378

15 Ren Z., Qu X., Wang M., et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method // IEEE Journal on Emerging and Selected

- Topics in Circuits and Systems. 2023. Vol. 13, N3. pp. 789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.
- 16 Huang Y., He G., Pu Z., et al. Multi-objective particle swarm optimization for optimal scheduling of household microgrids // *Front. Energy Res.* 2024. Vol. 11. 1354869. Doi:10.3389/fenrg.2023.1354869
- 17 Alabdullah M.H., Abido M. A. Microgrid energy management using deep Q-network reinforcement learning // *Alexandria Engineering Journal.* 2022. Vol. 61, N11. pp. 9069-9078. Doi: 10.1016/j.aej.2022.02.042
- 18 Nguyen Q. M., Nguyen D. L., Nguyen T. K. A mixed-integer linear programming model for microgrid optimal scheduling considering BESS degradation and RES uncertainty // *Journal of Energy Storage.* 2024. Vol. 104. Pt. B. 114663. Doi: 10.1016/j.est.2024.114663
- 19 Amirhossein B., Hamidreza A., Somayeh M. Day-ahead optimal scheduling of microgrid with considering demand side management under uncertainty // *Electric Power Systems Research.* 2022. Vol. 209. 107965. Doi: 10.1016/j.epr.2022.107965
- 20 Tang W., Gao F. Optimal operation of household microgrid day-ahead energy considering user satisfaction // *High Voltage Engineering.* 2017. Vol. 43, N1. pp. 140-148. Doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20161227019
- 21 He L. Research on optimal scheduling of multi-microgrid economics considering peak shaving and valley filling strategies // *Proceedings of Excellent Papers of Zhejiang Electric Power Society of China 2022 (Power Grid Technology).* 2023. pp. 175-187.
- 22 Zhu L., Zhou X., Tang L., et al. Multi-objective optimal dispatch of microgrid using particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm // *Power System Technology.* 2017. Vol. 41, N6. pp. 1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504
- 23 Xing Y., Liu L., Wang Y. An application model of multi-objective optimization algorithm // *Success (Education Edition).* 2011. N5. pp. 242. Doi: CNKI:SUN:CJY.0.2011-05-211
- 24 Cao Z., Zhou L., Zhang Y., et al. Microgrid planning based on power supply reliability // *Power System Protection and Control.* 2015. Vol. 43, N14. pp. 6. Doi: JournalArticle/5b3bd98ec095d70f00940949
- 25 Xu Y., Ai Q. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids // *Electric Power Automation Equipment.* 2016. Vol. 36, N11. pp. 18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003
- 26 Xu T., Ai Q. Coordinated optimal scheduling method for active distribution networks containing microgrids // *Electric Power Automation Equipment.* 2016. Vol. 36, N11. pp.18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003
- 27 Yu Z., Guo L., Liu W., et al. Stochastic optimal planning software for stand-alone microgrids and its implementation // *Power System Automation.* 2015. Vol. 39, N6. pp. 18-23. Doi: 10.7500/AEPS20140207002
- 28 Tong N., Li Y., Shen H., et al. Optimal scheduling of microgrids based on improved black hole algorithm // *Journal of Power Science and Technology.* 2021. Vol. 36, N05. pp.113-119. Doi: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.014
- 29 Li J., Yuan M. Green Energy Town Construction in Germany: Ideas, Strategies and Experiences // *Journal of Shandong University of Science and Technology: Social Sciences.* 2015. Vol. 17, N6. Doi: 10.16452/j.cnki.sdkj.20151225.010
- 30 Christie A. German Village Achieves Energy Independence... And Then Some // *BioCycle August 2011.* 2011. Vol. 52, N8. pp.37.
- 31 Kaldellis J., Zafirakis D. Prospects and challenges for clean energy in European Islands.The TILOS paradigm // *Renewable Energy.* 2020. Vol. 145. pp.2489-2502. Doi: 10.1016/j.renene.2019.08.014
- 32 Notton G., Nivet M. -L., Zafirakis D., et al. Tilos, the first autonomous renewable green island in Mediterranean: A Horizon 2020 project // *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria.* 2017. pp.102-105. Doi:10.1109/ELMA.2017.7955410.
- 33 Boulogiorgou D., Ktenidis P. TILOS local scale Technology Innovation enabling low carbon energy transition // *Renewable Energy.* 2020. Vol. 146. pp.397-403. Doi: 10.1016/j.renene.2019.06.130
- 34 Li W., Li E., Wang P. The Technical Status and Development Tendency of Microgrid // *Telecom Power Technology.* 2015. N05. pp: 202-207. Doi: CNKI:SUN:TXDY.0.2015-05-065
- 35 Zhu L., Zhou X., Tang L., et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads // *Power System Technology.* 2017. Vol. 41, N6. pp. 1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504
- 36 Nikolaos E., Myronas G., Michael C. Optimal energy planning and scheduling of microgrids // *Chemical Engineering Research and Design.* 2018. Vol. 131, N03. pp. 318-332. Doi:10.1016/j.cherd.2017.07.030
- 37 Xue X., Ai X., Fang J., et al. Real-Time Schedule of Microgrid for Maximizing Battery Energy Storage Utilization // *IEEE Transactions on Sustainable Energy.* 2022. Vol. 13, N3. pp. 1356-1369. Doi:10.1109/TSTE.2022.3153609.
- 38 Moein B., Mona G. A Multi-Objective Optimization Scheme for Resilient, Cost-Effective

Planning of Microgrids // IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2020. Vol. 8. pp. 206325-206341. Doi:10.1109/ACCESS.2020.3038133

39 Qiu Y., Li Q., Ai Y., et al. Optimal scheduling for microgrids considering long-term and short-term energy storage // Journal of Energy Storage. 2024. Vol 93. pp. 112-137. Doi: 10.1016/j.est.2024.112137

40 Lian Y., Li Y., Zhao Y., et al. Robust multi-objective optimization for islanded data center microgrid operations // Applied Energy. 2023. Vol. 330. 120344. Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120344

41 Zhu W., Guo J., Zhao G. Multi-Objective Dispatching Optimization of an Island Microgrid Integrated with Desalination Units and Electric Vehicles // Processes. 2021. Vol. 9, N5. 798. Doi: 10.3390/pr9050798

42 Huang Z., Xu L., Wang B., et al. Optimizing power systems and microgrids: A novel multi-objective model for energy hubs with innovative algorithmic optimization // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 69, N5. pp. 927-943. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.341

43 Jhon M., Juan G., Oscar G., et al. Techno-economic approach for energy management system: Multi-objective optimization algorithms for energy storage in standalone and grid-connected DC microgrids // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 102. Pt. 1. 114069. Doi: 10.1016/j.est.2024.114069

44 Zhang Z., Wang Z., Wang H., et al. Research on Bi-Level Optimized Operation Strategy of Microgrid Cluster Based on IABC Algorithm // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol.9. pp. 15520-15529. Doi: 10.1109/access.2021.3053122

45 Ren Z., Qu X., Wang M., et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2023. Vol. 13, N3. pp. 789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.

46 Hou H., Xue M., Xu Y., et al. Multi-objective economic dispatch of a microgrid considering electric vehicle and transferable load // Applied Energy. 2020. Vol. 262. 114489.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114489

47 Mei Y., Li B., Wang H., et al. Multi-objective optimal scheduling of microgrid with electric vehicles // Energy Reports. 2022. Vol.8. pp. 4512-4524. Doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.131

48 Zhang Y., Lv Y., Zhou Y. Research on Economic Optimal Dispatching of Microgrid Based on an Improved Bacteria Foraging Optimization // Biomimetics. 2023. Vol. 8, N2. 150. Doi: 10.3390/biomimetics8020150

49 Premadasa P. N. D., Silva C. M. M. R. S., Chandima D. P., et al. A multi-objective optimization model for sizing an off-grid hybrid energy microgrid with optimal dispatching of a diesel generator // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 68. 107621. Doi: 10.1016/j.est.2023.107621

50 Qiao M., Yu Z., Dou Z., et al. Study on Economic Dispatch of the Combined Cooling Heating and Power Microgrid Based on Improved Sparrow Search Algorithm // Energies. 2022. Vol. 15, N14. 5174. Doi: 10.3390/en15145174

51 Shan J., Lu R. Multi-objective economic optimization scheduling of CCHP micro-grid based on improved bee colony algorithm considering the selection of hybrid energy storage system // Energy Reports. 2021. Vol.7. pp. 326-341. Doi: 10.1016/j.egyr.2021.10.026

52 Jia S., Kang X. Multi-Objective Optimal Scheduling of CHP Microgrid Considering Conditional Value-at-Risk // Energies. 2022. Vol. 15, N9. 3394. doi:10.3390/en15093394

53 Veluchamy K., Veluchamy M. A new energy management technique for microgrid system using muddy soil fish optimization algorithm // International Journal of Energy Research. 2021. Vol. 45. 14824–14844. Doi:10.1002/er.6758

54 Nagarajan K., Rajagopalan A., Angalaeswari S. et al. Combined Economic Emission Dispatch of Microgrid with the Incorporation of Renewable Energy Sources Using Improved Mayfly Optimization Algorithm // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022, N01. 6461690. Doi: 10.1155/2022/6461690

55 Zhang Y., Zhou Y. Research on Microgrid Optimal Dispatching Based on a Multi-Strategy Optimization of Slime Mould Algorithm // Biomimetics. 2024. Vol. 9, N3. 138. Doi: 10.3390/biomimetics9030138

56 Zhang Y., Zhou H., Xiao L., et al. Research on economic optimal dispatching of microgrid cluster based on improved butterfly optimization algorithm // International Transactions Electrical Energy Systems. 2022. Vol. 2022, N01. 7041778. Doi: 10.1155/2022/7041778

57 Wang F., Xuan Z., Zhen Z., et al. A day-ahead PV power forecasting method based on LSTM-RNN model and time correlation modification under partial daily pattern prediction framework // Energy Convers Manage. 2020. Vol.212. 112766. Doi: 10.1016/j.enconman.2020.112766

58 Liu L., Yang G. Distributed Optimal Energy Management for Integrated Energy Systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2022. Vol. 18. N10. pp. 6569-6580. Doi:10.1109/TII.2022.3146165.

59 Liang Y., Xu Z., Li H., et al. A random optimization strategy of microgrid dispatching based on stochastic response surface method considering uncertainty of renewable energy supplies and load demands // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol.154. 109408. Doi:

10.1016/j.ijepes.2023.109408

60 Luo L., Abdulkareem S-S., Rezvani A., et al. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol.28. 101306. Doi: 10.1016/j.est.2020.101306

61 Yang M., Cui Y., Wang J. Multi-Objective optimal scheduling of island microgrids considering the uncertainty of renewable energy output // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023. Vol.144. 108619. Doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108619

62 Hassaballah E-G., Keshta H-E., Latif-Abdel K-M., et al. A novel strategy for real-time optimal scheduling of grid-tied microgrid considering load management and uncertainties // *Energy*. 2024. Vol.299. 131419. Doi: 10.1016/j.energy.2024.131419

63 Hou J., Yu W., Xu Z., et al. Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty // *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol.216. 109037. Doi: 10.1016/j.epsr.2022.109037

64 Ahmadi S., Marcos T-V., Ali A-G., et al. A novel interval-based formulation for optimal scheduling of microgrids with pumped-hydro and battery energy storage under uncertainty // *International Journal of Energy Research*. 2022. Vol. 46, N9. pp. 11523-13110. Doi: 10.1002/er.8058

65 Zhou K., Zhou K., Yang S. Reinforcement learning-based scheduling strategy for energy storage in microgrid // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol.51. 104379. Doi:10.1016/j.est.2022.104379

66 Goh H-H., Shi S., Liang X., et al. Optimal energy scheduling of grid-connected microgrids with demand side response considering uncertainty // *Applied Energy*. 2022. Vol.327. 120094. Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120094

67 Nan B., Dong S., Tang K., et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load // *Power System Technology*. 2023. Vol. 47, N04. pp. 1340-1349. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0798

68 Sahar S-B., Mehdi A., Behnam M-I., et al. Optimal scheduling of a microgrid based on renewable resources and demand response program using stochastic and IGDT-based approach // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol.86, Pt. B. 111306. Doi: 10.1016/j.est.2024.111306

69 Kumar A., Verma A., Talwar R. Optimal techno-economic sizing of a multi-generation microgrid system with reduced dependency on grid for critical health-care educational and industrial facilities // *Energy*. 2020. Vol. 208. 118248. Doi: 10.1016/j.energy.2020.118248

70 Wen L., Zhou K., Yang S., et al. Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting // *Energy*. 2019. Vol.171. pp.1053-1065. Doi: 10.1016/j.energy.2019.01.075

71 Li Y., Wang R., Yang Z. Optimal Scheduling of Isolated Microgrids Using Automated Reinforcement Learning-Based Multi-Period Forecasting // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022. Vol. 13, N01. pp. 159-169. Doi: 10.1109/TSTE.2021.3105529.

72 Afrasiabi M., Mohammadi M., Rastegar M., et al. Multi-agent microgrid energy management based on deep learning forecaster // *Energy*. 2019. Vol. 186. 115873. Doi:10.1016/j.energy.2019.115873

73 Kim H.J., Kim M.K. A novel deep learning-based forecasting model optimized by heuristic algorithm for energy management of microgrid // *Applied Energy*. 2023. Vol.332. 120525. Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120525

74 Arriaga M., Cañizares C. A., Kazerani M. Northern lights: Access to electricity in Canada's northern and remote communities // *IEEE Power and Energy Magazine*. 2014; Vol. 12, N4. pp. 50-59. Doi: 10.1109/MPE.2014.2317963.

75 Hernandez-Aramburo C. A., Green T. C., Mugniot N. Fuel consumption minimization of a microgrid // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005. Vol. 41, N03. pp. 673-681. Doi: 10.1109/TIA.2005.847277.

76 Mohammad R E., Amjady N. Adaptive robust optimization framework for day-ahead microgrid scheduling // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol.107. pp. 213-223. Doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.029

77 Dong W., Sun H., Mei C., et al. Forecast-driven stochastic optimization scheduling of an energy management system for an isolated hydrogen microgrid // *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 277. 116640. Doi: 10.1016/j.enconman.2022.116640

78 Ciftci O., Mehrtash M., Kargarian A. Data-driven nonparametric chance-constrained optimization for microgrid energy management // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 16, N04. pp. 2447-2457. Doi: 10.1109/tii.2019.2932078

79 Ge X., Khazaei J. Physics-informed Convolutional Neural Network for Microgrid Economic Dispatch // *arXiv -EE-Systems and Control*. 2024. Doi: arxiv-2404.18362

80 Deng S., Zhong J., Liang H., et al. Optimal microgrid dispatch with 5G communication base stations: A knowledge-assist deep reinforcement learning method // *Electric Power Systems Research*. 2025. Vol.248. 111982. Doi: 10.1016/j.epsr.2025.111982

81 Luo R., Gao W., Zhao X., et al. A Two-Stage Green Energy Dispatch Scheme for Microgrid using Deep Reinforcement Learning // in IEEE Transactions on Green Communications and Networking. 2025. Doi: 10.1109/TGCN.2025.3560143

82 Yang T., Xu Z., Ji S., et al. Cooperative optimal dispatch of multi-microgrids for low carbon economy based on personalized federated reinforcement learning // Applied Energy. 2025. Vol. 378. Pt. A. 124641. Doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124641

83 Liu W., Mao Z. Microgrid economic dispatch using Information-Enhanced Deep Reinforcement Learning with consideration of control periods // Electric Power Systems Research. 2025. Vol. 239. 111244. Doi: 10.1016/j.eprsr.2024.111244

Авторы публикации

Чэнь Сяоюй – аспирант, кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. ORCID*: 0000-0001-8417-9463. schen@urfu.ru

Ду Ян – аспирант, кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. ORCID*: 0000-0001-6563-2621. erica002@163.com

Цинь Лисун – аспирант, кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. ORCID*: 0009-0008-2342-4961. 382445630@qq.com

Велькин Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. v.i.velkin@urfu.ru

References

1 Ghulomzoda AH, Safaraliev MKh, Lyukhanov EA. Modified Method for Synchronizing Microgrid with an External Isolated Power System. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021; 3(52):2-80. (In Russ). Doi:10.18503/2311-8318-2021-3(52)-72-80

2 Gu W, Wu Z, Bo R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014; 54:26-37. Doi: 10.1016/j.ijepes.2013.06.028

3 Upasana L, Nasreen B, Irraivan E, et al. An Enhanced Multi-Objective Optimizer for Stochastic Generation Optimization in Islanded Renewable Energy Microgrids. *Mathematics*. 2023; 11(9):2079. Doi: 10.3390/math11092079

4 Seddaoui N, Boulouma S, Rahmani L. A hybrid Improved Salp Swarm Algorithm and Harris Hawk Optimizer for energy planning in microgrids with minimum operating cost. *International Journal of Green Energy*. 2024; 22(1):72–89. Doi: 10.1080/15435075.2024.2406844

5 Wu X, Shan Y, Fan K. A Modified Particle Swarm Algorithm for the Multi-Objective Optimization of Wind/Photovoltaic/Diesel/Storage Microgrids. *Sustainability*. 2024; 16(03):1065. Doi: 10.3390/su16031065

6 Zhu X, Peng C, Geng H. Multi-Objective Sizing Optimization Method of Microgrid Considering Cost and Carbon Emissions. *2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Beijing, China*. 2022:2278-2283. Doi:10.1109/SPIES55999.2022.10082041.

7 Wang X, Wang S, Ren J, et al. Optimizing Economic Dispatch for Microgrid Clusters Using Improved Grey Wolf Optimization. *Electronics*. 2024; 13(16):3139. Doi: 10.3390/electronics13163139

8 Dong A, Lee S-K. The Study of an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Economic Dispatch in Microgrids. *Electronics*. 2024; 13(20):4086. Doi: 10.3390/electronics13204086

9 Rajagopalan A, Nagarajan K, Montoya OD, et al. Multi-Objective Optimal Scheduling of a Microgrid Using Oppositional Gradient-Based Grey Wolf Optimizer. *Energies*. 2022; 15(23): 9024. Doi:10.3390/en15239024

10 Maël R, Florian D, Dominique G, et al. Multi-Objective Optimization of Autonomous Microgrids with Reliability Consideration. *Energies*. 2021; 14(15):4466. Doi: 10.3390/en14154466

11 Younes Z, Alhamrouni I, Mekhilef S, et al. A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12(2):1985–1994. Doi: 10.1016/j.asej.2020.10.021

12 Karthik N, Rajagopalan A, Bajaj M, et al. Chaotic self-adaptive sine cosine multi-objective

- optimization algorithm to solve microgrid optimal energy scheduling problems. *Scientific Reports*. 2024; 14:18997. Doi: 10.1038/s41598-024-69734-4
- 13 Yang X, Leng Z, Xu S, et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ϵ -constraint method. *Renewable Energy*. 2021; 172:408-423. Doi: 10.1016/j.renene.2021.02.165
- 14 Zhao G, Luo J, Song N, et al. Multi-objective optimal dispatch of island microgrid considering a novel scheduling resource. *Electric Power Systems Research*. 2025; 241:111378. Doi:10.1016/j.epsr.2024.111378
- 15 Ren Z, Qu X, Wang M, et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2023; 13(3):789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.
- 16 Huang Y, He G, Pu Z, et al. Multi-objective particle swarm optimization for optimal scheduling of household microgrids. *Front. Energy Res*. 2024; 11:1354869. Doi:10.3389/fenrg.2023.1354869
- 17 Alabdullah MH, Abido MA. Microgrid energy management using deep Q-network reinforcement learning. *Alexandria Engineering Journal*. 2022; 61(11):9069-9078. Doi: 10.1016/j.aej.2022.02.042
- 18 Nguyen QM, Nguyen DL, Nguyen TK. A mixed-integer linear programming model for microgrid optimal scheduling considering BESS degradation and RES uncertainty. *Journal of Energy Storage*. 2024; 104(Pt B):114663. Doi: 10.1016/j.est.2024.114663
- 19 Amirhossein B, Hamidreza A, Somayeh M. Day-ahead optimal scheduling of microgrid with considering demand side management under uncertainty. *Electric Power Systems Research*. 2022; 209:107965. Doi: 10.1016/j.epsr.2022.107965
- 20 Tang W, Gao F. Optimal operation of household microgrid day-ahead energy considering user satisfaction. *High Voltage Engineering*. 2017; 43(1):140-148. Doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20161227019
- 21 He L. Research on optimal scheduling of multi-microgrid economics considering peak shaving and valley filling strategies. *Proceedings of Excellent Papers of Zhejiang Electric Power Society of China 2022 (Power Grid Technology)*. 2023:175-187.
- 22 Zhu L, Zhou X, Tang L, et al. Multi-objective optimal dispatch of microgrid using particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm. *Power System Technology*. 2017; 41(6):1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504
- 23 Xing Y, Liu L, Wang Y. An application model of multi-objective optimization algorithm. *Success (Education Edition)*. 2011; 5:242. Doi: CNKI:SUN:CJYJ.0.2011-05-211
- 24 Cao Z, Zhou L, Zhang Y, et al. Microgrid planning based on power supply reliability. *Power System Protection and Control*. 2015; 43(14):10-15. Doi: JournalArticle/5b3bd98ec095d70f00940949
- 25 Xu Y, Ai Q. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids. *Electric Power Automation Equipment*. 2016; 36(11):18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003
- 26 Xu T, Ai Q. Coordinated optimal scheduling method for active distribution networks containing microgrids. *Electric Power Automation Equipment*. 2016; 36(11):18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003
- 27 Yu Z, Guo L, Liu W, et al. Stochastic optimal planning software for stand-alone microgrids and its implementation. *Power System Automation*. 2015; 39(6):18-23. Doi: 10.7500/AEPS20140207002
- 28 Tong N, Li Y, Shen H, et al. Optimal scheduling of microgrids based on improved black hole algorithm. *Journal of Power Science and Technology*. 2021; 36(5):113-119. Doi: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.014
- 29 Li J, Yuan M. Green Energy Town Construction in Germany: Ideas, Strategies and Experiences. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Social Sciences*. 2015; 17(6). Doi: 10.16452/j.cnki.sdkjksk.20151225.010
- 30 Christie A. German Village Achieves Energy Independence... And Then Some. *BioCycle August 2011*. 2011. 52(8):37.
- 31 Kaldellis J, Zafirakis D. Prospects and challenges for clean energy in European Islands.The TILOS paradigm. *Renewable Energy*. 2020; 145:2489-2502. Doi: 10.1016/j.renene.2019.08.014
- 32 Notton G, Nivet M. -L, Zafirakis D, et al. Tilos, the first autonomous renewable green island in Mediterranean: A Horizon 2020 project. *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria*. 2017; 1:102-105. Doi:10.1109/ELMA.2017.7955410.
- 33 Boulogiorgou D, Ktenidis P. TILOS local scale Technology Innovation enabling low carbon energy transition. *Renewable Energy*. 2020; 146:397-403. Doi: 10.1016/j.renene.2019.06.130
- 34 Li W, Li E, Wang P. The Technical Status and Development Tendency of Microgrid. *Telecom Power Technology*. 2015; 5:202-207. Doi: CNKI:SUN:TXDY.0.2015-05-065
- 35 Zhu L, Zhou X, Tang L, et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads. *Power System Technology*. 2017; 41(6):1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504
- 36 Nikolaos E, Myronas G, Michael C. Optimal energy planning and scheduling of microgrids.

Chemical Engineering Research and Design. 2018; 131(03):318-332. Doi:10.1016/j.cherd.2017.07.030

37 Xue X, Ai X, Fang J, et al. Real-Time Schedule of Microgrid for Maximizing Battery Energy Storage Utilization. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022; 13(3):1356-1369. Doi:10.1109/TSTE.2022.3153609.

38 Moein B, Mona G. A Multi-Objective Optimization Scheme for Resilient, Cost-Effective Planning of Microgrids. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. 2020; 8:206325-206341. Doi:10.1109/ACCESS.2020.3038133

39 Qiu Y, Li Q, Ai Y, et al. Optimal scheduling for microgrids considering long-term and short-term energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2024; 93:112-137. Doi: 10.1016/j.est.2024.112137

40 Lian Y, Li Y, Zhao Y, et al. Robust multi-objective optimization for islanded data center microgrid operations. *Applied Energy*. 2023; 330:120344. Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120344

41 Zhu W, Guo J, Zhao G. Multi-Objective Dispatching Optimization of an Island Microgrid Integrated with Desalination Units and Electric Vehicles. *Processes*. 2021; 9(5):798. Doi: 10.3390/pr9050798

42 Huang Z, Xu L, Wang B, et al. Optimizing power systems and microgrids: A novel multi-objective model for energy hubs with innovative algorithmic optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 69(5):927-943. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.341

43 Jhon M, Juan G, Oscar G, et al. Techno-economic approach for energy management system: Multi-objective optimization algorithms for energy storage in standalone and grid-connected DC microgrids. *Journal of Energy Storage*. 2024; 102(Pt 1):114069. Doi: 10.1016/j.est.2024.114069

44 Zhang Z, Wang Z, Wang H, et al. Research on Bi-Level Optimized Operation Strategy of Microgrid Cluster Based on IABC Algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021; 9:15520-15529. Doi: 10.1109/access.2021.3053122

45 Ren Z, Qu X, Wang M, et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2023; 13(3):789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.

46 Hou H, Xue M, Xu Y, et al. Multi-objective economic dispatch of a microgrid considering electric vehicle and transferable load. *Applied Energy*. 2020. 262:114489.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114489

47 Mei Y, Li B, Wang H, et al. Multi-objective optimal scheduling of microgrid with electric vehicles. *Energy Reports*. 2022; 8:4512-4524. Doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.131

48 Zhang Y, Lv Y, Zhou Y. Research on Economic Optimal Dispatching of Microgrid Based on an Improved Bacteria Foraging Optimization. *Biomimetics*. 2023; 8(2):150. Doi: 10.3390/biomimetics8020150

49 Premadasa PND, Silva CMMRS, Chandima DP, et al. A multi-objective optimization model for sizing an off-grid hybrid energy microgrid with optimal dispatching of a diesel generator. *Journal of Energy Storage*. 2023; 68:107621. Doi: 10.1016/j.est.2023.107621

50 Qiao M, Yu Z, Dou Z, et al. Study on Economic Dispatch of the Combined Cooling Heating and Power Microgrid Based on Improved Sparrow Search Algorithm. *Energies*. 2022; 15(14):5174. Doi: 10.3390/en15145174

51 Shan J, Lu R. Multi-objective economic optimization scheduling of CCHP micro-grid based on improved bee colony algorithm considering the selection of hybrid energy storage system. *Energy Reports*. 2021; 7:326-341. Doi: 10.1016/j.egyr.2021.10.026

52 Jia S, Kang X. Multi-Objective Optimal Scheduling of CHP Microgrid Considering Conditional Value-at-Risk. *Energies*. 2022; 15(9):3394. doi:10.3390/en15093394

53 Veluchamy K, Veluchamy M. A new energy management technique for microgrid system using muddy soil fish optimization algorithm. *International Journal of Energy Research*. 2021; 45:14824-14844. Doi:10.1002/er.6758

54 Nagarajan K, Rajagopalan A, Angalaeswari S, et al. Combined Economic Emission Dispatch of Microgrid with the Incorporation of Renewable Energy Sources Using Improved Mayfly Optimization Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022; 2022(01):6461690. Doi: 10.1155/2022/6461690

55 Zhang Y, Zhou Y. Research on Microgrid Optimal Dispatching Based on a Multi-Strategy Optimization of Slime Mould Algorithm. *Biomimetics*. 2024; 9(3):138. Doi: 10.3390/biomimetics9030138

56 Zhang Y, Zhou H, Xiao L, et al. Research on economic optimal dispatching of microgrid cluster based on improved butterfly optimization algorithm. *International Transactions Electrical Energy Systems*. 2022. 2022(01):7041778. Doi: 10.1155/2022/7041778

57 Wang F, Xuan Z, Zhen Z, et al. A day-ahead PV power forecasting method based on LSTM-RNN model and time correlation modification under partial daily pattern prediction framework. *Energy Convers Manage*. 2020; 212:112766. Doi: 10.1016/j.enconman.2020.112766

58 Liu L, Yang G. Distributed Optimal Energy Management for Integrated Energy Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022; 18(10):6569-6580. Doi:10.1109/TII.2022.3146165.

59 Liang Y, Xu Z, Li H, et al. A random optimization strategy of microgrid dispatching based on

- stochastic response surface method considering uncertainty of renewable energy supplies and load demands. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023; 154:109408.
Doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109408
- 60 Luo L, Abdulkareem S-S, Rezvani A, et al. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty. *Journal of Energy Storage*. 2020; 28:101306. Doi: 10.1016/j.est.2020.101306
- 61 Yang M, Cui Y, Wang J. Multi-Objective optimal scheduling of island microgrids considering the uncertainty of renewable energy output. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023; 144:108619. Doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108619
- 62 Hassaballah E-G, Keshta H-E, Latif-Abdel K-M, et al. A novel strategy for real-time optimal scheduling of grid-tied microgrid considering load management and uncertainties. *Energy*. 2024; 299:131419. Doi: 10.1016/j.energy.2024.131419
- 63 Hou J, Yu W, Xu Z, et al. Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty. *Electric Power Systems Research*. 2023; 216:109037. Doi: 10.1016/j.epr.2022.109037
- 64 Ahmadi S, Marcos T-V, Ali A-G, et al. A novel interval-based formulation for optimal scheduling of microgrids with pumped-hydro and battery energy storage under uncertainty. *International Journal of Energy Research*. 2022; 46(9):11523-13110. Doi: 10.1002/er.8058
- 65 Zhou K, Zhou K, Yang S. Reinforcement learning-based scheduling strategy for energy storage in microgrid. *Journal of Energy Storage*. 2022; 51:104379. Doi:10.1016/j.est.2022.104379
- 66 Goh H-H, Shi S, Liang X, et al. Optimal energy scheduling of grid-connected microgrids with demand side response considering uncertainty. *Applied Energy*. 2022; 327:120094.
Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120094
- 67 Nan B, Dong S, Tang K, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load. *Power System Technology*. 2023; 47(04):1340-1349. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0798
- 68 Sahar S-B, Mehdi A, Behnam M-I, et al. Optimal scheduling of a microgrid based on renewable resources and demand response program using stochastic and IGDT-based approach. *Journal of Energy Storage*. 2024; 86(Pt B):111306. Doi: 10.1016/j.est.2024.111306
- 69 Kumar A, Verma A, Talwar R. Optimal techno-economic sizing of a multi-generation microgrid system with reduced dependency on grid for critical health-care educational and industrial facilities. *Energy*. 2020; 208: 118248. Doi: 10.1016/j.energy.2020.118248
- 70 Wen L, Zhou K, Yang S, et al. Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting. *Energy*. 2019; 171:1053-1065. Doi: 10.1016/j.energy.2019.01.075
- 71 Li Y, Wang R, Yang Z. Optimal Scheduling of Isolated Microgrids Using Automated Reinforcement Learning-Based Multi-Period Forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022; 13(01):159-169. Doi: 10.1109/TSTE.2021.3105529.
- 72 Afrasiabi M, Mohammadi M, Rastegar M, et al. Multi-agent microgrid energy management based on deep learning forecaster. *Energy*. 2019; 186:115873. Doi:10.1016/j.energy.2019.115873
- 73 Kim HJ, Kim MK. A novel deep learning-based forecasting model optimized by heuristic algorithm for energy management of microgrid. *Applied Energy*. 2023; 332:120525.
Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120525
- 74 Arriaga M, Cañizares CA, Kazerani M. Northern lights: Access to electricity in Canada's northern and remote communities. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2014; 12(4):50-59.
Doi: 10.1109/MPE.2014.2317963.
- 75 Hernandez-Aramburo CA, Green TC, Mugniot N. Fuel consumption minimization of a microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005; 41(03):673-681.
Doi: 10.1109/TIA.2005.847277.
- 76 Mohammad RE, Amjady N. Adaptive robust optimization framework for day-ahead microgrid scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019; 107:213-223. Doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.029
- 77 Dong W, Sun H, Mei C, et al. Forecast-driven stochastic optimization scheduling of an energy management system for an isolated hydrogen microgrid. *Energy Conversion and Management*. 2023; 277:116640. Doi: 10.1016/j.enconman.2022.116640
- 78 Ciftci O, Mehrtash M, Kargarian A. Data-driven nonparametric chance-constrained optimization for microgrid energy management. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020; 16(04):2447-2457. Doi: 10.1109/tii.2019.2932078
- 79 Ge X, Khazaei J. Physics-informed Convolutional Neural Network for Microgrid Economic Dispatch. *arXiv -EE-Systems and Control*. 2024. Doi: arxiv-2404.18362
- 80 Deng S, Zhong J, Liang H, et al. Optimal microgrid dispatch with 5G communication base stations: A knowledge-assist deep reinforcement learning method. *Electric Power Systems Research*. 2025;

48:111982. Doi: 10.1016/j.epr.2025.111982

81 Luo R, Gao W, Zhao X, et al. A Two-Stage Green Energy Dispatch Scheme for Microgrid using Deep Reinforcement Learning. *in IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2025. Doi: 10.1109/TGCN.2025.3560143

82 Yang T, Xu Z, Ji S, et al. Cooperative optimal dispatch of multi-microgrids for low carbon economy based on personalized federated reinforcement learning. *Applied Energy*. 2025; 378(Pt A):124641. Doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124641

83 Liu W., Mao Z. Microgrid economic dispatch using Information-Enhanced Deep Reinforcement Learning with consideration of control periods. *Electric Power Systems Research*. 2025; 239:111244. Doi: 10.1016/j.epr.2024.111244

Authors of the publication

Chen Xiaoyu – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID**: 0000-0001-8417-9463. *schen@urfu.ru*

Du Yang – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID**: 0000-0001-6563-2621. *erica002@163.com*

Qin Lisong – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID**: 0009-0008-2342-4961. *382445630@qq.com*

Vladimir I. Velkin – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *v.i.velkin@urfu.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **27.03.2025 г.**

Отредактировано **05.10.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.241

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-153-167

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ОТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЫ В ГРУНТЕ ТЕПЛИЧНОГО ХОЗЯЙСТВА

Уткин М.О., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vadd_93@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Отопление тепличного пространства в зимнее время было и остается одной из самых энергоемких статей затрат при эксплуатации тепличного хозяйства. Комбинирование возобновляемых источников энергии с высокотемпературными тепловыми накопителями позволяет сгладить дисбаланс генерации и потребления, однако данный подход требует верифицированных моделей теплообмена грунта для надежного проектирования подземных систем обогрева. ЦЕЛЬ. Численное моделирование и верификация процессов теплопередачи от трубы, размещенной в грунте, с учетом его влажности, для последующего применения в системах локального обогрева тепличного грунта. МЕТОДЫ. Проведены две серии лабораторных опытов: с высушенным (влажность менее 10%) и увлажненным (влажность около 45%) суглинком. Температуры регистрировались 20 датчиками DS18B20 и тепловизором UTi260V. Создана двумерная модель, построена сеточная модель. Выполнены нестационарные численные расчеты в ANSYS Fluent. В программе решалось уравнение нестационарной теплопроводности методом конечных объемов, учтены реальные теплофизические свойства грунта. РЕЗУЛЬТАТЫ. Средняя относительная погрешность между расчетными и экспериментальными температурами составила менее 6% для высушенного и около 4% для увлажненного грунта, что подтверждает адекватность модели. Увлажненный грунт прогревается на 15-20% быстрее и достигает на 2-3°C более высоких температур в зоне 2-4 см, что связано с уменьшением термического сопротивления насыщенной поровой структуры. Термограммы показали, что эффективная ширина прогрева одиночной трубы ограничена 1-2 см, ввиду этого необходимо использовать пучок труб или змеевик для равномерного воздействия на корнеобитаемый слой. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Верифицированная модель служит инструментом для оптимизации геометрии трубного контура с учетом влагосодержания почвы.

Ключевые слова: тепловой накопитель энергии; тепловые трубы; тепличное хозяйство; теплоперенос в грунте; влажность почвы; верификация эксперимента; подземный обогрев.

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061.

Для цитирования: Уткин М.О., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э. Численное и экспериментальное исследование теплопереноса от цилиндрической трубы в грунте тепличного хозяйства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 153-167. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-153-167.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER FROM A CYLINDRICAL PIPE IN GREENHOUSE SOIL

Utkin M.O., Dmitriev A.V., Zinurov V.E.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vadd_93@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE.* Heating of greenhouse spaces during the winter season has been and remains one of the most energy-intensive cost items in greenhouse operation. The integration of renewable energy sources with high-temperature thermal storage systems helps to mitigate the imbalance between energy generation and consumption; however, this approach requires validated ground heat transfer models for the reliable design of subsurface heating systems. *THE PURPOSE.* To perform numerical modeling and experimental validation of heat transfer from a buried pipe, considering soil moisture content, for subsequent application in localized greenhouse soil heating systems. *METHODS.* Two series of laboratory experiments were conducted using dried (moisture < 10%) and moistened (moisture ≈ 45%) loamy soil. Soil temperature was monitored using 20 DS18B20 sensors and a UTi260B thermal imager. A two-dimensional computational domain was developed, and a mesh grid was constructed. Transient numerical simulations were performed in ANSYS Fluent. The unsteady-state heat conduction equation was solved using the finite volume method, incorporating actual thermophysical properties of the soil. *RESULTS.* The average relative deviation between simulated and experimental temperatures was below 6% for dried soil and around 4% for moistened soil, confirming model accuracy. Moistened soil exhibited 15-20% faster heating and achieved 2-3 °C higher temperatures in the 2-4 cm depth range due to reduced thermal resistance in the saturated pore structure. Thermographic imaging showed that the effective heating width of a single pipe was limited to 1-2 cm, indicating the need for a pipe bundle or coil arrangement to ensure uniform heating of the root zone. *CONCLUSION.* The validated model serves as a tool for optimizing the geometry of subsurface pipe layouts based on soil moisture content.

Keywords: thermal energy storage; heat pipes; greenhouse heating; soil heat transfer; soil moisture; experimental validation; subsurface heating.

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-20061.

For citation: Utkin M.O., Dmitriev A.V., Zinurov V.E. Numerical and experimental study of heat transfer from a cylindrical pipe in greenhouse soil. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 153-167. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-153-167.

Введение (Introduction)

Зимнее тепличное овощеводство играет ключевую роль в устойчивом обеспечении населения продуктами питания, особенно в регионах с неблагоприятным для открытого грунта климатом [1]. В последние годы площадь зимних тепличных комплексов в России продолжает уверенно расти. По данным, озвученным на VI Сельскохозяйственном форуме-выставке «Тепличная отрасль – 2025», к концу 2024 года она достигла около 3,35 тыс. га, что примерно на 70 га больше, чем годом ранее. На том же форуме подчеркнуто, что приоритетом отрасли остаются строительство, реконструкция и модернизация производственных мощностей с целью довести площадь зимних теплиц до 3,4 тыс. га к концу 2025 года [2]. Однако обеспечение оптимального микроклимата в теплицах требует больших энергозатрат, прежде всего на отопление. Отопление теплиц остается одной из самых энергоемких статей. По разным оценкам, на него приходится от 30 до 70% совокупных эксплуатационных затрат в тепличном производстве в зависимости от климатической зоны [3]. В условиях России доля расходов на обогрев может достигать 30-50% в себестоимости овощей, выращенных в зимних теплицах [4]. Традиционно теплоснабжение теплиц базируется на сжигании ископаемого топлива. Прежде всего природного газа, реже угля или жидкого топлива, что не только повышает затраты, но и увеличивает углеродный след производства [5, 6]. Кроме того, конструкции теплиц характеризуются значительными потерями тепла: светопрозрачные ограждения (особенно пленочные) обладают низкой теплоизоляцией, из-за чего внутренняя температура быстро снижается без обогрева. Таким образом, высокие энергетические и финансовые издержки тепличного производства требуют разработки энергоэффективных технологий отопления.

Повышение энергоэффективности и снижение энергетических затрат на отопление теплиц остаются ключевыми задачами аграрной энергетики. В последние годы реализуются проекты по совершенствованию ограждающих конструкций, утеплителей, вентиляции и управления микроклиматом, а также по внедрению возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и утилизации низкопотенциального тепла, что снижает зависимость от ископаемого топлива [7].

Среди альтернативных решений применяются электрические системы обогрева – греющие кабели, почвенные электронагреватели и позисторные элементы, обеспечивающие стабильную температуру корнеобитаемого слоя. Наиболее перспективными признаны тепловые насосы воздуха и грунта: при среднем COP равным 3,5 они демонстрируют высокую энергоэффективность и позволяют сократить выбросы CO₂. Кроме того, те же установки могут работать на охлаждение, что важно для южных регионов [8].

Широко применяются и солнечно-биоэнергетические схемы. Известны пассивные («китайские» солнечные теплицы) и активные системы с солнечными коллекторами и ФЭП панелями. Их эффективность увеличивается при комбинации с биотопливными котлами [9]. В Китае, например, внедрены котельные на древесных пеллетах мощностью 1,2 МВт, что обеспечило двукратное снижение затрат за счет замещения угля [10].

Перспективный резерв – утилизация вторичного тепла. Тепличные хозяйства используют котлы-утилизаторы для отбора тепла дымовых газов газопоршневых и газотурбинных установок. Такие когенерационные системы одновременно покрывают тепловую нагрузку и подают CO₂ растениям [11].

Для сглаживания разбалансировки между генерацией ВИЭ и теплоснабжением теплиц все шире внедряются накопители энергии. Использование материалов с фазовым переходом (PCM), водяных и грунтовых теплоаккумуляторов позволяет повысить ночные температуры на 5-9°C и снизить энергопотребление на 10-14% [12].

Активные грунтовые аккумуляторы выполняются в виде трубчатого контура под теплицей: избыток тепла аккумулируется днем и возвращается ночью. В связке с тепловыми насосами система обеспечивает обогрев и охлаждение [13].

Таким образом, перспективным направлением является комбинированное использование ВИЭ и высокоэффективных тепловых накопителей энергии в системах обогрева теплиц. Накопители тепловой энергии аккумулируют избыток энергии, вырабатываемый ВИЭ в периоды пиковой генерации, и отдают ее в фазы дефицита, повышая надежность теплоснабжения [14]. На практике это реализуется, например, через буферные водяные баки: современные тепличные комплексы запасают дневное тепло от котельных или солнечных коллекторов и используют его ночью, что повышает стабильность и снижает расход топлива [15].

В Нидерландах внедрены сезонные системы хранения тепла в водоносных горизонтах: избыточное геотермальное или солнечное тепло летом закачивается в подземный водоносный пласт, зимой извлекается для отопления теплиц [16]. Для регионов с суровым климатом требуются аккумуляторы, способные работать при высоких температурах и минимальных теплопотерях. Здесь перспективны тепловые накопители энергии на расплавах солей и жидких металлах, обеспечивающие рабочий диапазон в несколько сотен градусов и высокую плотность энергии [17, 18].

Для уменьшения утечек тепла разрабатываются многослойные теплоизоляции с чередованием отражающих экранов и газовых прослоек, что позволяет длительно удерживать тепло при компактных размерах аккумулятора [19]. Такие решения особенно полезны, когда избыток электроэнергии от солнечных батарей или ветрогенераторов преобразуется в тепло и аккумулируется в высокотемпературных тепловых накопителях энергии для последующего использования. Внедрение технологий накопления энергии увеличенной емкости является необходимым условием для глубокой интеграции возобновляемой энергетики в энергосистему.

Практическую состоятельность интеграции накопителей энергии в распределенные и автономные энергосистемы подтверждают результаты отечественных исследований. Так, для локальных сетей предложен сверхпроводящий электрокинетический накопитель СПЭНЭ-1, выполняющий функции регулятора энергетических потоков [20]. Эксперименты с многоэлементными литий-ионными батареями показали, что корректная стратегия заряд-балансировки повышает КПД накопителя и снижает эксплуатационные потери [21]. В автономных дизельных энергокомплексах включение электрохимических накопителей позволило сократить расход топлива до 15% [22]. Недавние комплексные испытания модульного комплекса СПЭНЭ-1 подтвердили его работоспособность в низкотемпературных условиях и масштабируемость для распределенной энергетики [23].

Авторами работы был разработан тепловой накопитель энергии с высокотемпературным рабочим телом (рис. 1), представляющий собой вертикальный цилиндр с твердотельной графитовой теплоаккумулирующей средой, заключенной в вольфрамовый контейнер 3 и пронизанный центральным каналом 2 из того же металла [24]. В канале циркулирует высокотемпературный жидкометаллический теплоноситель –

олово 1, нагреваемое трубчатыми электронагревателями до 2000-2500°C, что обеспечивает высокую плотность аккумулируемой энергии при приемлемых удельных затратах энергии на перекачку. Для перемещения жидкого олова может быть использован магнитогидродинамический насос. Тепловой накопитель энергии включает двухконтурную теплоизоляцию, которая сведена к системе отражающих вольфрамовых экранов, разделенных инертным аргоном, и наружному слою минеральной ваты, что ограничивает теплопотери при внешних температурах $\leq 20^\circ\text{C}$ до нескольких процентов хранимого запаса. Герметичный патрубок 8 позволяет вакуумировать внутренний объем и заполнить его аргоном, предотвращая окисление графита при высоких рабочих температурах [25].

Представленный тепловой накопитель энергии (рис. 1) предлагается интегрировать в систему обогрева теплицы через тепловые трубы. Предлагаемая схема (рис. 2) содержит два взаимосвязанных контура [26]. В периоды энергетического профицита, когда солнечная или ветровая генерация превышает текущие нужды хозяйства, то жидкий металл (олово) циркулирует по герметичному кольцу при помощи магнитогидродинамического насоса-нагревателя 7, нагревая теплоаккумулирующую среду внутри теплового накопителя энергии 5 до 1500-2500°C. В периоды энергетического дефицита поток движется во второй контур: раскаленное олово проходит через теплообменный аппарат 8 (рис. 2).

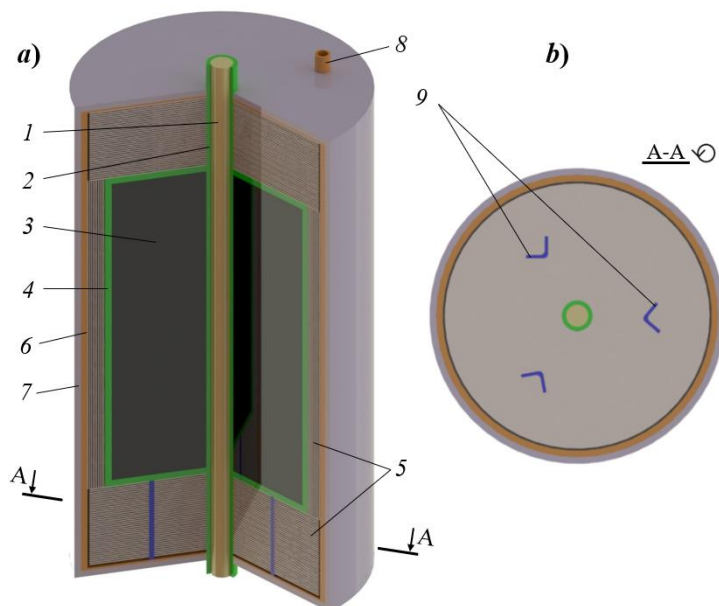


Рис. 1. Трехмерная модель накопителя тепловой энергии периодического действия: 1 – жидкометаллический высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – цилиндрический канал из тугоплавкого материала (вольфрам); 3 – теплоаккумулятор из твердого высокотемпературного рабочего тела (графит); 4 – цилиндрическая емкость из вольфрама для хранения теплоаккумулятора; 5 – вольфрамовое экранирование; 6 – цилиндрический металлический корпус; 7 – теплоизоляционный материал (минеральная вата); 8 – патрубок; 9 – опоры. а) вид со сложным разрезом; б) вид с наклонным разрезом начальной модели (без разрезов) секущей плоскостью в сечении А-А

Fig. 1. Three-dimensional model of a periodic action thermal energy storage: 1 – liquid metal high-temperature heat transfer fluid; 2 – cylindrical channel made of refractory material; 3 – heat accumulator made of solid high-temperature working substance; 4 – cylindrical container for storing the heat accumulator; 5 – shielding; 6 – cylindrical casing; 7 – thermal insulation; 8 – nozzle; 9 – supports. a) the view with a complex section; b) the view with an inclined section of the initial model (without sections) with a secant plane in section A-A

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

В конструкции теплообменника вольфрамовые трубки, по которым движется жидкое олово, окружены газовой прослойкой и помещены внутри цилиндрических труб 9 с протекающей по ним водой. Под действием теплового излучения вода нагревается и переходит в состояние насыщенного пара, который по трубопроводу 10 подается в корнеобитаемый слой теплицы, эффективно прогревая его до требуемой температуры.

Однако даже при правильно подобранной длине и диаметре тепловых труб распределение тепла в грунте остается неравномерным. Во-первых, насыщенный пар постепенно конденсируется, т. е. формируется продольный температурный градиент в корнеобитаемом слое. Во-вторых, теплопередача существенно зависит от состава и влажности почвы: при переходе от сухого суглинка к влажному суглинку коэффициент теплопроводности грунта возрастает, что изменяет локальную плотность теплового потока и максимальную глубину прогрева [27]. Численные исследования горизонтальных теплообменников показывают, что изменение содержания воды с 10 до 25% может сократить время выхода грунта на целевую температуру почти на 30% [28]. Аналогично, CFD-моделирование теплиц с камня-накопительными слоями выявило выраженный «клин» повышенных температур у входа и падение теплового потока на дальнем участке труб [29].

В этих условиях актуальным направлением исследований является применение верифицированного численного моделирования для прогноза распределения температур и тепловых потоков в грунте от нагретой трубы, с учетом переменной влажности и гранулометрического состава почвы.

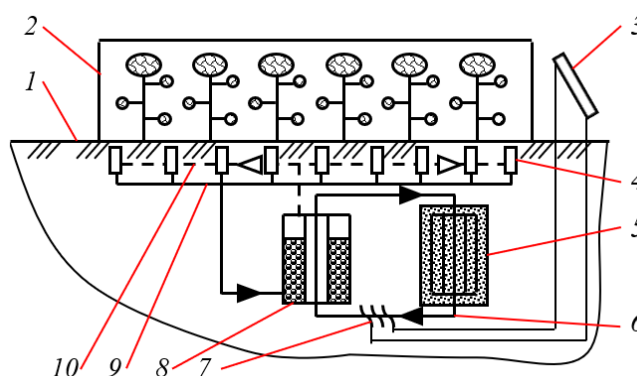


Рис. 2. Принципиальная схема использования теплового накопителя энергии для отопления тепличного комплекса: 1 – поверхность грунта; 2 – тепличное помещение; 3 – солнечные панели; 4 – тепловые трубы; 5 – тепловой накопитель энергии; 6 – контур циркуляции жидкого металла; 7 – насос-нагреватель; 8 – теплообменник; 9 – контур циркуляции воды; 10 – линия подачи пара

Fig. 2. Schematic diagram of using a thermal energy storage system for greenhouse heating: 1 – ground surface; 2 – greenhouse structure; 3 – solar panels; 4 – heat pipes; 5 – thermal energy storage (TES) unit; 6 – liquid metal circulation loop; 7 – pump-heater; 8 – heat exchanger; 9 – water circulation loop; 10 – steam supply line

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

Целью работы является численное моделирование и верификация процессов теплопередачи от трубы, размещенной в грунте, с учетом его влажности, для последующего применения в системах локального обогрева тепличного грунта.

Научная значимость исследования заключается в применении современных инструментов вычислительной гидродинамики в среде ANSYS Fluent для численного моделирования теплопереноса в грунте от линейного теплового источника.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения результатов моделирования для расчета и оптимизации систем локального подогрева корнеобитаемого слоя почвы в зимних теплицах. Разработанный подход позволяет повысить энергоэффективность тепличных хозяйств за счет рационального распределения тепловых потоков, адаптированных к конкретным почвенно-климатическим условиям и уровню влажности грунта.

Материал и методы (Material and methods)

Для проведения физических экспериментов был изготовлен лабораторный стенд (рис. 3), смонтированный на двух перфорированных монтажных панелях (90×30 см), соединенных мебельными уголками и установленных на жесткое основание. На верхней панели размещались элементы силовой части: два автоматических выключателя ИЕК ВА 47-29 (2P, 16A), ШИМ-модуль на 4 кВт и цифровой вольт-ампер-ваттметр D52-2066 с токовым датчиком 100 А. Эти устройства закреплены на DIN-рейку, что упрощает коммутацию и обеспечивает оперативный доступ к аппаратуре при настройке.

Нижняя панель служила опорой для пластикового контейнера (34×21×52 см).

Контейнер был заполнен 50 кг предварительно подготовленного грунта, уложенного послойно. По центру емкости, на глубине 5 мм от поверхности, закреплен трубчатый электронагреватель Redber (255 Вт, 300 мм). Подвод питания выполнен силиконовым термостойким кабелем ПУНВ 1×2,5 мм²; мощность ТЭНа задавалась ШИМ-регулятором и поддерживалась на уровне 100 Вт, максимальная температура корпуса нагревателя ограничивалась 200°С. Текущая температура ТЭНа контролировалась высокотемпературным терморезистором ЕТР-01А, подключенным к мультиметру Mastech MAS838.

Температурное поле грунта регистрировалось двадцатью цифровыми датчиками DS18B20. Они располагались в трех горизонтальных слоях: поверхностном (верхний уровень), среднем (2 см) и глубинном (4 см – нижний уровень) (рис. 4b). При этом было использовано по 6 точек в каждом ярусе. Два дополнительных датчика контролировали температуру корпуса ТЭНа и параметры воздуха. Сенсоры подключались к плате регистрации на контроллере ATmega 328 (чипсет CH340G). Адреса датчиков задавались в программе с помощью библиотеки microDS18B20. Связь с ПК осуществлялась по USB через гальвано-развязку ADUM 3160. Сбор данных выполнялся программой PuTTY с периодом 1 с, что обеспечивало непрерывный массив температурных значений. Для визуального контроля теплового поля каждые 15 мин проводилась тепловизионная съемка поверхности грунта портативным тепловизором UNI-T UTi260B (от -2 до +550 °С). Шесть мини-термогигрометров с выносными зондами регистрировали температуру и относительную влажность на поверхности каждые 5 мин.

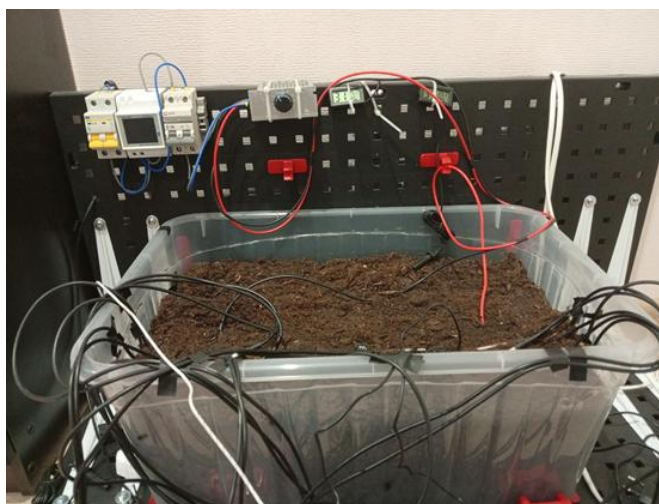


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки Fig. 3. The external view of the experimental setup

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

Визуализация и компоновка элементов лабораторной установки представлена на рисунке 4. Трехмерная модель экспериментального стенда с указанием ключевых компонентов представлена на рисунке 4a. Такая компоновка обеспечивает удобство размещения оборудования, термическую изоляцию контейнера от основания и возможность вариативной установки измерительных приборов. На рисунке 4c приведены координаты размещения датчиков в сечениях контейнера. Приведенная схема была использована при построении численной модели в ANSYS Fluent и при подготовке экспериментальных данных к верификации.

Для проверки влияния влагосодержания почвы было рассмотрено две серии экспериментов: первая серия – с высушенным грунтом (влажность $\leq 10\%$), вторая серия – с увлажненным грунтом (влажность $\approx 42-51\%$). Параметры каждой серии приведены ниже в таблицах 1 и 2.

Одним из ключевых параметров при моделировании теплопереноса в почве является ее плотность, от которой напрямую зависят теплоемкость и теплопроводность. Для получения достоверных расчетных данных в рамках настоящего исследования была определена плотность исследуемого грунта с использованием косвенного метода – по объему вытесненной жидкости. Метод основан на известном принципе Архимеда и позволяет достаточно точно определить плотность твердой фазы без применения сложного оборудования. Для проведения эксперимента использовалось следующее

оборудование: ареометр АОН-1 940-1000 ГОСТ 18481-81, Ареометр АОН-1 1000-1060 ГОСТ 18481-81, мерная стеклянная емкость объемом 250 мл, цифровые весы, тара для отбора пробы и дистиллированная вода. Перед основными измерениями проводилось определение плотности используемой воды с помощью ареометров.

Для повышения точности было выполнено 10 последовательных замеров. В результате установлено, что среднее значение плотности воды составило $1000,6 \text{ кг/м}^3$, что соответствует нормативным значениям для дистиллированной воды при температуре около 20°C . Далее осуществлялось взвешивание пустой тары для отбора пробы. Затем в нее засыпался исследуемый грунт, и тара повторно взвешивалась. После этого пробы последовательно помещались в мерную емкость с водой, в которой предварительно был зафиксирован исходный уровень жидкости. После помещения высушенного грунта измерялся новый уровень воды, позволявший определить объем вытесненной жидкости.

Таблица 1
Table 1

Параметры высушенного грунта в контрольной зоне
Parameters of dried soil in the control zone

Время, мин	Верхний уровень (глубина залегания 0 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	6,9	1	22
30	6,9	1	22
90	6,9	1	22
Время, мин	Средний уровень (глубина залегания 20 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7	1	22
30	7	1	22
90	7	1	22
Время, мин	Нижний уровень (глубина залегания 40 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7	8	22
30	7	8	22
90	7	8	22

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

В завершение проводилось финальное взвешивание пустой тары для исключения налипания или остаточной влаги, способной повлиять на точность измерений. Все три измерения показали высокую воспроизводимость.

Таблица 2
Table 2

Параметры увлажненного грунта в контрольной зоне
Parameters of moistened soil in the control zone

Время, мин	Верхний уровень (глубина залегания 0 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7,9	42	25
30	7,9	52	25
90	7,9	52	25
Время, мин	Средний уровень (глубина залегания 20 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7,5	25	25
30	7,5	25	24
90	7,5	25	24
Время, мин	Нижний уровень (глубина залегания 40 мм, от уровня грунта)		
	РН	Влажность, %	Температура
0	7,1	51	24
30	7,1	47	24
90	7,1	47	24

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

Масса пробы составила в среднем около 6,43 г, объем вытесненной воды – около 5 см³, а итоговые значения плотности – от 1280 до 1292 кг/м³. Среднее арифметическое значение по результатам трех замеров составило 1286,7 кг/м³. Полученная величина была использована на последующем этапе для численного моделирования процессов теплопереноса от трубчатого нагревателя в почвенной среде. Результаты позволяют утверждать, что исследуемый высушенный грунт является слабо увлажненным и однородным по составу, что подтверждается незначительным разбросом значений при многократных измерениях.

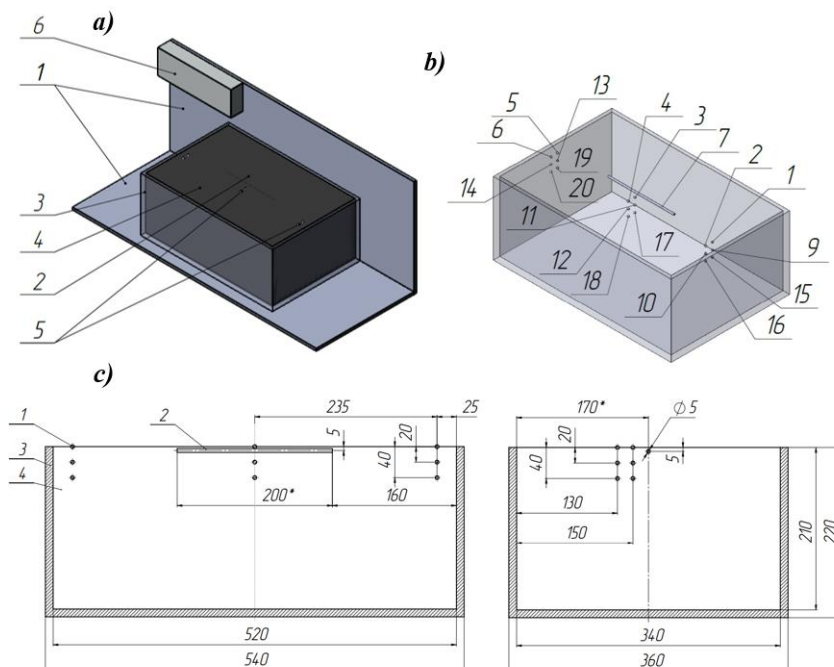


Рис. 4. а) Трехмерная модель экспериментальной установки: 1 – монтажные панели; 2 – резистор; 3 – контейнер пластиковый; 4 – грунт; 5 – датчик температуры; 6 – измерительный блок; б) Расположение и глубина залегания датчиков (аксонометрический вид): 1-6 – верхний уровень (поверхность грунта); 9-16 – средний уровень (глубина залегания 2 см); 15-20 – нижний уровень (глубина залегания 4 см); 7 – температура резистора, 8 (позиция не показана) – температура наружного воздуха; в) Схема расположения и глубина залегания датчиков

Fig. 4. a) Three-dimensional model of the experimental setup: 1 – mounting panels; 2 – resistor; 3 – plastic container; 4 – soil; 5 – temperature sensor; 6 – measurement unit; б) Arrangement and burial depth of sensors (axonometric view): 1-6 – upper level (soil surface); 9-14 – middle level (burial depth 2 cm); 15-20 – lower level (burial depth 4 cm); 7 – resistor temperature; 8 (position not shown) – ambient air temperature; в) Layout and depth of sensors

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

Также была исследована теплопередача в условиях повышенной влажности почвы. Для этого предварительно в сухой грунт было внесено 4 л дистиллированной воды с нейтральным уровнем pH равным 7 (табл. 2). В результате насыщения почвы вода равномерно распределилась по всему объему контейнера. Начальная массовая влажность составила 42% на верхнем уровне и достигала 51% на нижнем, снижаясь к концу эксперимента до 47% вследствие испарения. При этом значения pH оставались стабильными. Повышенное содержание влаги оказало влияние на физические характеристики грунта: в частности, его плотность уменьшилась с 1286 кг/м³ до 1280 кг/м³, что обусловлено структурным разбуханием и перераспределением пористости. Были также пересчитаны теплофизические параметры среды – теплоемкость составила 2921 Дж/(кг·°C), теплопроводность 0,13 Вт/(м·°C), что отражает повышение теплопередающей способности увлажненного субстрата.

Для проведения численного моделирования процессов теплопереноса от нагретой трубы в почвенной среде использовалась программная среда ANSYS Fluent, входящая в состав пакета ANSYS Workbench. Данная система основана на численном решении уравнений теплопроводности и энергии методом конечных объемов. Ранее численные исследования в среде ANSYS Fluent показали высокую точность моделирования

теплообмена при внешнем обтекании нагреваемой трубы [30]. Расчетная модель базировалась на нестационарной форме уравнения теплопроводности, учитывающей внутренний источник тепла:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; C_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·°C); T – температура, К; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C), Q – объемный источник тепла, Вт/м³.

Геометрия модели соответствовала габаритам физической установки. Для расчетов была построена двумерная расчетная сетка в модуле ANSYS Meshing с использованием структурированной схемы разбиения. Размер одного элемента – 5 мм, минимальная длина ребра – 2 мм. Для повышения точности в зоне контакта с нагревателем была реализована инфляция (inflation) с плавным переходом и числом слоев 5. Общее количество элементов составило 35705 (рис. 5).

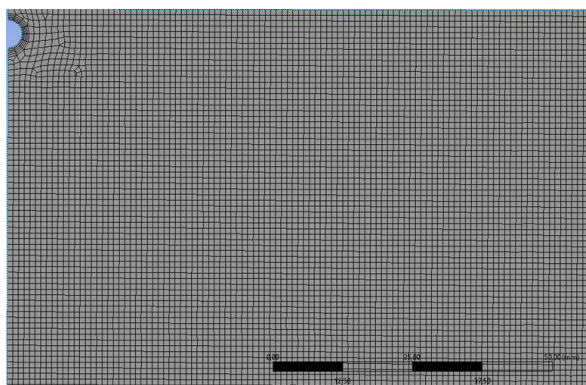


Рис. 5. Внешний вид расчетной сетки

Fig. 5. External view of the computational mesh

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

Расчет выполнялся в нестационарной постановке (transient) с шагом по времени 1 с и общим числом шагов 3600. В качестве метода инициализации использовалась Standard Initialization, начальная температура всей расчетной зоны была установлена на уровне 23°C. Учет энергии (Energy Equation) был активирован. Расчеты проводились с использованием 4 ядер процессора и 8 потоков, с включенной настройкой Double Precision. На каждом шаге выполнялось до 20 итераций, обеспечивая сходимость расчета по температурному полю. Следует отметить, что модель (рис. 5) реализована с учетом условия симметрии относительно вертикальной оси, проходящей через центр нагревателя. Это позволяет сократить вычислительную область в два раза без потери точности, что существенно снижает требования к ресурсам при расчете.

Результаты и обсуждение (Research results and discussion)

Тепловизионные изображения (рис. 6) позволили визуализировать температурное поле в области размещения ТЭНа. На изображении (a) видно, что при достижении температуры поверхности ТЭНа 95,1°C тепловое влияние ограничивается узкой зоной вокруг нагревателя. Изображение (b), полученное спустя 50 мин после момента (a), при температуре ТЭНа 154,5°C, демонстрирует аналогичную тепловую картину с незначительным увеличением зоны прогрева. Таким образом, даже при значительном росте температуры нагревателя, прогрев почвы на удалении более 1-2 см от ТЭНа остается ограниченным. Это подтверждает резкий градиент температур вблизи нагревателя и указывает на необходимость использования нескольких нагревательных элементов для равномерного воздействия на корнеобитаемый слой.

Для верификации результатов численного моделирования был проведен анализ температурных данных в контрольных точках, расположенных в центральной части контейнера: 3, 4, 11 и 12. Их выбор обусловлен максимальной равномерностью прогрева и отсутствием краевых эффектов. В остальных точках температурные изменения оказались незначительными и нехарактерными для анализа переходных процессов.

На рисунках 7 и 8 приведены графики сравнения численных и экспериментальных данных для двух вариантов грунта: высушенного и увлажненного. Из анализа данных таблиц видно, что характер теплопередачи существенно различается в зависимости от степени увлажнения почвы.

В случае высушенного грунта (рис. 7), температура в расчетных точках модели (3 и

11) достигает значений 31,8°C и 36,8°C соответственно, тогда как в экспериментальных точках (3 и 11) значения составляют 29,9°C и 33,2°C соответственно.

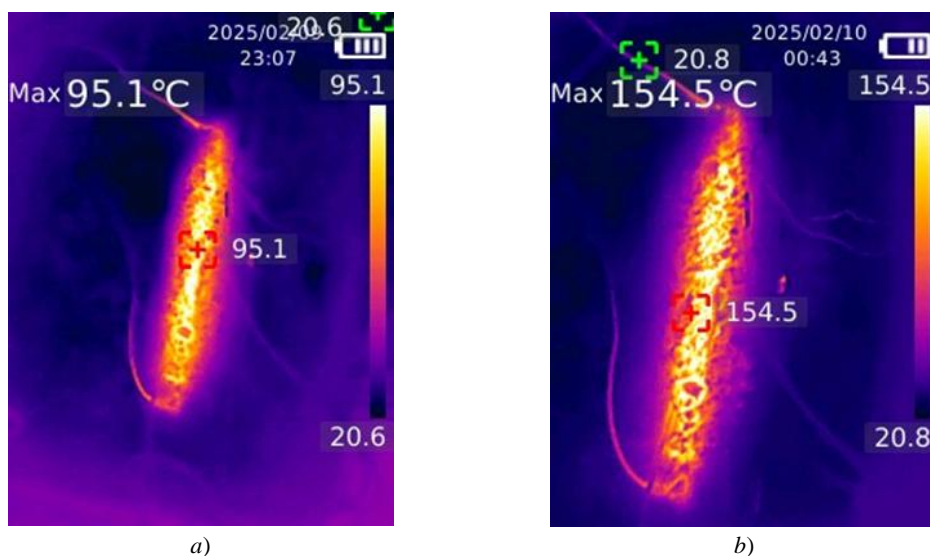


Рис. 6. Тепловизионные изображения нагревательного элемента в процессе эксперимента: (a) момент достижения температуры поверхности ТЭНа 95,1°C; (b) момент достижения температуры поверхности ТЭНа 154,5°C через 50 мин после измерения (a)

Fig. 6. Thermal images of the heating element during the experiment: (a) the moment the surface temperature of the heater reached 95,1°C; (b) the moment the surface temperature of the heater reached 154,5°C, 50 min after measurement (a)

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

Это демонстрирует хорошую сходимость моделирования с экспериментом, особенно в точках, удаленных от центра ТЭНа (точки 11 и 12), где теплоперенос идет преимущественно за счет теплопроводности. Небольшое расхождение между моделированием и экспериментом (до 2-3°C) может быть обусловлено локальными неоднородностями материала, различиями в теплофизических параметрах и тепловыми потерями в реальной системе.

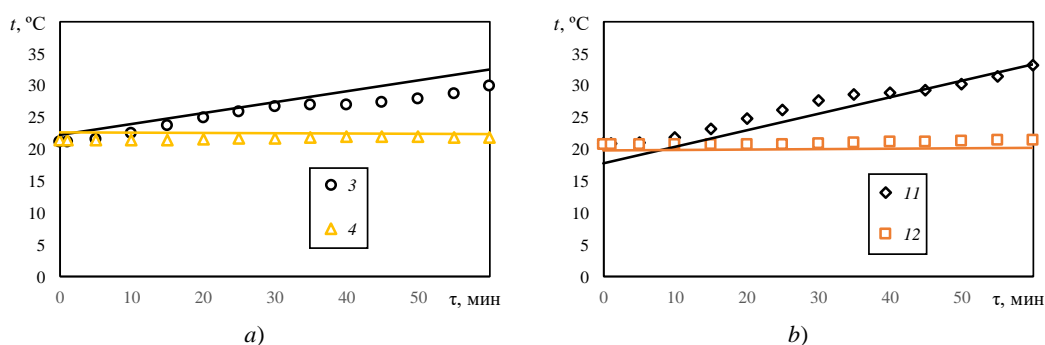


Рис. 7. Верификация результатов численного моделирования с экспериментальными данными для высушенного грунта: (a) температурные значения в точках 3 и 4, (b) температурные значения в точках 11 и 12. Линии – результаты численного моделирования, маркеры – данные физического эксперимента

Fig. 7. Verification of numerical simulation results against experimental data for dried soil (a) temperature values at points 3 and 4, (b) temperature values at points 11 and 12. Lines represent numerical simulation results; markers correspond to physical experiment data

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

В случае увлаженного грунта (рис. 8), наблюдаются как более высокие абсолютные температуры, так и более активный рост температуры во времени. Несмотря на высокую сходимость трендов, отмечается, что в некоторых точках практические данные превосходят численные, что может свидетельствовать о наличии дополнительных механизмов теплопереноса, включая капиллярное перемещение влаги и конвективную составляющую в микропорах. Например, температура в точке 3 достигает 35,5°C, тогда

как в соответствующей экспериментальной точке 3 – 33,4°C. Аналогичная тенденция наблюдается и в точке 11: расчетное значение – 30,9°C, экспериментальное – 33,3°C.

Сравнительный анализ кривых на графиках (рис. 7 и 8) показывает, что увлажненный грунт прогревается быстрее и интенсивнее, особенно в средних и нижних слоях (точки 11 и 12), что объясняется снижением сопротивления теплопередаче в насыщенной структуре.

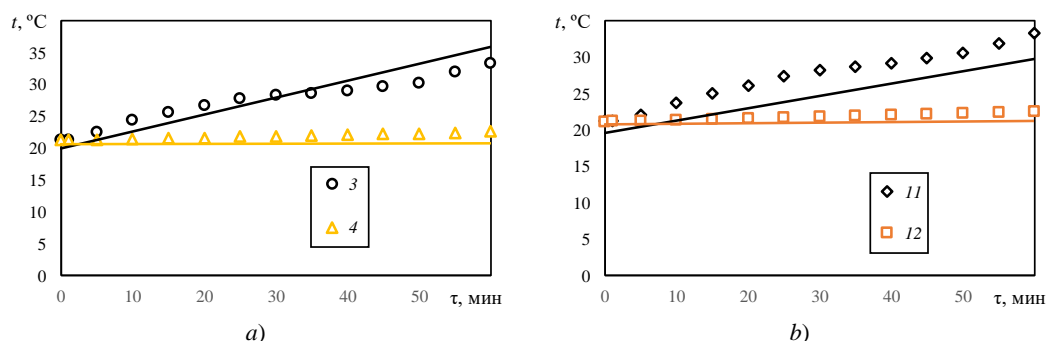


Рис. 8. Верификация результатов численного моделирования с экспериментальными данными для увлажненного грунта: (а) температурные значения в точках 3 и 4, (б) температурные значения в точках 11 и 12. Линии – результаты численного моделирования, маркеры – данные физического эксперимента

Fig. 8. Verification of numerical simulation results against experimental data for moistened soil: (a) temperature values at points 3 and 4, (b) temperature values at points 11 and 12. Lines represent numerical simulation results; markers correspond to physical experiment data

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

Таким образом, численная модель корректно описывает тепловые процессы как в высушенном, так и во влажном грунте, демонстрируя стабильную сходимость с экспериментальными наблюдениями. Средняя относительная погрешность между расчетными и измеренными значениями температуры в контрольных точках составляет менее 6% для высушенного грунта и около 4% для увлажненного. Наиболее высокая точность достигнута в точках, расположенных в средней зоне, где температурный градиент стабилен. Результаты также указывают на критическую зависимость эффективности прогрева от влажности среды, что должно учитываться при проектировании подземных систем обогрева, систем антиобледенения или инженерной инфраструктуры в агротехнических приложениях.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработана концепция применения высокотемпературного теплового накопителя энергии с жидкометаллическим теплоносителем для отопления тепличного комплекса. Модульный TES, связанный с тепловыми трубами, способен аккумулировать профицитную энергию ВИЭ и обеспечивать тепловую нагрузку теплицы в периоды энергетического дефицита, одновременно уменьшая потребление ископаемого топлива и углеродный след производства.

2. Экспериментальные термограммы показали, что одиночный линейный нагреватель формирует узкую зону эффективного прогрева (1-2 см). Для равномерного прогрева корнеобитаемого слоя необходим теплообменный пучок либо змеевик из параллельных труб, обеспечивающий перекрывающиеся тепловые поля и сглаженный температурный профиль по ширине грядки.

3. Построенная численная модель в ANSYS Fluent адекватно воспроизводит тепловые процессы в грунте. Средняя относительная погрешность между расчетными и измеренными температурами не превышает 6% для высушенного и 4% для увлажненного грунта.

4. Влагосодержание почвы является важным фактором эффективности подземного обогрева. Увлажненный грунт (влажность $\approx 45\%$) прогревается на 15-20% быстрее и достигает на 2-3°C более высоких температур, чем высушенный образец, вследствие уменьшения теплового сопротивления насыщенной поровой структуры.

При проектировании систем следует учитывать сезонную динамику влажности, возможный капиллярный перенос влаги и необходимость адаптивного управления тепловым потоком.

В последующих этапах работы планируется расширить модель за счет учета

фазовых превращений в контуре подачи пара. Особое внимание будет уделено конденсации насыщенного пара в процессе его транспортировки по трубопроводам и инфильтрации в грунт.

Литература

1. Soussi A., Zero E., Ouammi A., et al. Smart greenhouse farming: a review towards near zero energy consumption // *Discov Cities*. 2025. Vol. 2. Art. 55. doi: 10.1007/s44327-025-00096-w.
2. Тепличная отрасль – 2025 // *APK-news.ru*: сайт новостей агропромышленного комплекса Юга и Кавказа; 28 апр. 2025. Сочи; 2025. Доступно по: <https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-2025/>. Ссылка активна на 18 июля 2025.
3. Sun W., Wei X., Zhou B., Lu C., Guo W. Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: system design and implementation // *Applied Energy*. 2022. Vol. 325. Art. 119815. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119815.
4. Соковикова А.В. Повышение эффективности энергосбережения отопительно-вентиляционными установками защищенного грунта с применением в системе управления логических контроллеров // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2009. № 3–4(20–21). С. 48–49.
5. Boyacı S., Kocięcka J., Jagosz B., Atilgan A. Energy efficiency in greenhouses and comparison of energy sources used for heating // *Energies*. 2025. Vol. 18, N3. Art. 724. doi: 10.3390/en18030724.
6. Ahamed M.S., Guo H., Tanino K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. pp. 9–33. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
7. Cuce E., Harjunowibowo D., Cuce P.M. Energy use in greenhouses in the EU: a review recommending energy-efficiency measures and renewable-energy adoption // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, N10. Art. 5150. doi: 10.3390/app12105150.
8. Seo Y., Seo U.-J. Ground source heat pump (GSHP) systems for horticulture greenhouses adjacent to highway interchanges: a case study in South Korea // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 135. Art. 110194. doi: 10.1016/j.rser.2020.110194.
9. Prieto J., Ajnannadhif R.M., Fernández-del-Olmo P. Integration of a heating and cooling system driven by solar thermal energy and biomass for a greenhouse in Mediterranean climates // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 221. Art. 119928. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119928.
10. Huang T., Li H., Zhang G., Xu F. Experimental study on biomass heating system in the greenhouse: a case study in Xiangtan, China // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, N14. Art. 5673. doi: 10.3390/su12145673.
11. Ghaderi M., Reddick C., Sorin M. A systematic heat recovery approach for designing integrated heating, cooling and ventilation systems for greenhouses // *Energies*. 2023. Vol. 16, N14. Art. 5493. doi: 10.3390/en16145493.
12. Nishad S., Krupa I. Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: a review // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52. Art. 102241. doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
13. Tahery D., Roshandel R., Avami A. An integrated dynamic model for evaluating the influence of ground-to-air heat transfer system on heating, cooling and CO₂ supply in greenhouses // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 173. pp. 42–56. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.120.
14. Adesanya M.A., Rabiou A., Ogunlowo Q.O., et al. Experimental evaluation of hybrid renewable and thermal energy storage systems for a net-zero energy greenhouse: a case study of Yeosu-Si // *Energies*. 2025. Vol. 18, N10. Art. 2635. doi: 10.3390/en18102635.
15. Zhang X., Li Y., Wang P. Thermo-economic analysis of a low-cost greenhouse thermal solar plant with seasonal energy storage // *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 276. Art. 116626. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116626.
16. van der Stelt A., Rouwette N., Bloemendal J. Aquifer thermal energy storage for low-carbon greenhouse heating in the Netherlands // *Applied Energy*. 2024. Vol. 331. Art. 120545. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120545.
17. Fan M., Ding Y., Liang X. Molten salts tanks thermal energy storage: aspects to consider for renewable integration // *Energies*. 2022. Vol. 17, N1. Art. 22. doi: 10.3390/en17010022.
18. Reimann T., Neldner K. A perspective on high-temperature heat storage using liquid metal as heat-transfer fluid // *Energy Storage*. 2023. Vol. 3. Art. e530. doi: 10.1002/est2.530.
19. Li S., Chen H., Wang J. Modeling and implementation of multilayer insulation for small-scale high-temperature thermal energy storage tank // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 214. Art. 124567. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.124567.

20. Смоленцев Н.И., Кондрин С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. № 3–4. С. 53–60.

21. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. № 9–10. С. 140–145.

22. Федотов А.И., Федотов Е.А., Абдуллазянов А.Ф. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 3–17. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17.

23. Смоленцев Н.И., Бондарева В.Ю. Результаты разработки и экспериментальных исследований накопительного комплекса с накопителем энергии СПЭНЭ-1 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 121–131. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131.

24. Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., и др. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 166–179. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.

25. Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., и др. Оценка процесса переноса энергии в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом при его разрядке // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 4. С. 73–85. doi: 10.14529/power240409.

26. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Уткин М.О., и др. Численное моделирование нагрева теплового накопителя энергии для обогрева тепличного хозяйства // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 1(77). С. 47–53. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-47-53.

27. Li S., Sun T., Du Y., et al. Influence of moisture on heat transfer of ground heat exchangers in unsaturated soils // Renewable Energy. 2022. Vol. 193. pp. 1177–1185.

28. Liu Z., Du Y., Song C., et al. Effect of soil moisture content on thermal performance of ground source heat exchangers: An electromagnetism topology-based analysis // Energy Reports. 2023. Vol. 10. pp. 3914–3928.–

29. Bazgaou A., Fatnassi H., Bouharrou R., et al. CFD modeling of the microclimate in a greenhouse using a rock bed thermal storage heating system // Horticulturae. 2023. Vol. 9. Art. 183. doi: 10.3390/horticulturae9020183.

30. Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э., и др. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. № 2. С. 176–186. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.

Авторы публикации

Уткин Максим Олегович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9743-7107>. 209maks@mail.ru

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>. ieremiada@gmail.com

Зинуров Вадим Эдуардович – канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой «Инженерная графика» (ИГ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>. vadd_93@mail.ru

References

1. Soussi A., Zero E., Ouammi A., et al. Smart greenhouse farming: a review towards near zero energy consumption. *Discov Cities*. 2025;2:55. doi: 10.1007/s44327-025-00096-w.

2. Teplichnaya otrasl' – 2025. APK-news.ru: site of the agro-industrial complex news of the South and the Caucasus; 28 Apr 2025. Sochi; 2025. Available at: <https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-2025/>. Accessed: 15 Jul 2025. (In Russ.).

3. Sun W., Wei X., Zhou B., Lu C., Guo W. Greenhouse heating by energy transfer between greenhouses: System design and implementation. *Applied Energy*. 2022;325:119815. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119815.
4. Sokovikova A.V. Improving the energy efficiency of greenhouse heating and ventilation systems using logic controllers. *Vestn. Izhevsk. State Agric. Acad.* 2009;3–4(20–21):48–49. (In Russ.)
5. Boyacı S., Kocięcka J., Jagosz B., Atılgan A. Energy efficiency in greenhouses and comparison of energy sources used for heating. *Energies*. 2025;18(3):724. doi: 10.3390/en18030724.
6. Ahamed M.S., Guo H., Tanino K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosyst. Eng.* 2019;178:9–33. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
7. Cuce E., Harjunowibowo D., Cuce P.M. Energy use in greenhouses in the EU: A review recommending energy-efficiency measures and renewable-energy adoption. *Applied Sciences*. 2022;12(10):5150. doi: 10.3390/app12105150.
8. Seo Y., Seo U.-J. Ground source heat pump (GSHP) systems for horticulture greenhouses adjacent to highway interchanges: A case study in South Korea // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;135:110194. doi: 10.1016/j.rser.2020.110194.
9. Prieto J., Ajnannadhif R.M., Fernández-del-Olmo P. Integration of a heating and cooling system driven by solar thermal energy and biomass for a greenhouse in Mediterranean climates. *Applied Thermal Engineering*. 2023;221:119928. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119928.
10. Huang T., Li H., Zhang G., Xu F. Experimental study on biomass heating system in the greenhouse: A case study in Xiangtan, China. *Sustainability*. 2020;12(14):5673. doi: 10.3390/su12145673.
11. Ghaderi M., Reddick C., Sorin M. A systematic heat recovery approach for designing integrated heating, cooling and ventilation systems for greenhouses. *Energies*. 2023;16(14):5493. doi: 10.3390/en16145493.
12. Nishad S., Krupa I. Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;52:102241. doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
13. Tahery D., Roshandel R., Avami A. An integrated dynamic model for evaluating the influence of ground-to-air heat transfer system on heating, cooling and CO₂ supply in greenhouses. *Renewable Energy*. 2021;173:42–56. doi: 10.1016/j.renene.2021.03.120.
14. Adesanya MA, Rabiu A, Ogunlowo QO, et al. Experimental evaluation of hybrid renewable and thermal energy storage systems for a net-zero energy greenhouse: A case study of Yeosu-Si. *Energies*. 2025;18(10):2635. doi: 10.3390/en18102635.
15. Zhang X, Li Y, Wang P. Thermo-economic analysis of a low-cost greenhouse thermal solar plant with seasonal energy storage. *Energy Convers. Manag.* 2023;276:116626. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116626.
16. van der Stelt A, Rouwette N, Bloemendal J. Aquifer thermal energy storage for low-carbon greenhouse heating in the Netherlands. *Applied Energy*. 2024;331:120545. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120545.
17. Fan M, Ding Y, Liang X. Molten salts tanks thermal energy storage: aspects to consider for renewable integration. *Energies*. 2022;17(1):22. doi: 10.3390/en17010022.
18. Reimann T, Neldner K. A perspective on high-temperature heat storage using liquid metal as heat-transfer fluid. *Energy Storage*. 2023;3:e530. doi: 10.1002/est2.530.
19. Li S, Chen H, Wang J. Modeling and implementation of multilayer insulation for small-scale high-temperature thermal energy storage tank. *Int J Heat Mass Transf.* 2024;214:124567. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.124567.
20. Smolentsev N.I., Kondrin S.A. Superconducting electrokinetic energy storage for local electric networks. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017;19(3–4):53–60. (In Russ.)
21. Serdechnyi D.V., Tomashevsky Yu.B. Operational features of a multi-element lithium-ion battery-based energy storage system. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017;19(9–10):140–145. (In Russ.)
22. Fedotov A.I., Fedotov E.A., Abdullazyanov A.F. Use of electrochemical energy storage in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power plants. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(1):3–17. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. (In Russ.)
23. Smolentsev N.I., Bondareva V.Yu. Results of development and experimental research of the energy storage complex with SPENE-1 energy storage. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2024;26(6):121–131. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131. (In Russ.)
24. Chadaev A.N., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., et al. Algorithm for calculating a multilayer thermal insulation system of a thermal energy storage unit with a high-temperature working fluid. *Proceedings of the*

higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2024;26(6):166–179. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179. (In Russ.)

25. Chadaev A.N., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., et al. Evaluation of energy transfer in a thermal energy storage unit with high-temperature working fluid during discharge. *Bull. South Ural State Univ. Ser. Power Eng.* 2024;24(4):73–85. doi: 10.14529/power240409. (In Russ.)

26. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Utkin M.O., et al. Numerical modeling of thermal energy storage heating for greenhouse farming. *Vestn. Kazan State Agrar. Univ.* 2025;20(1(77)):47–53. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-47-53. (In Russ.)

27. Li S., Sun T., Du Y., et al. Influence of moisture on heat transfer of ground heat exchangers in unsaturated soils. *Renewable Energy.* 2022;193:1177–1185.

28. Liu Z., Du Y., Song C., et al. Effect of soil moisture content on thermal performance of ground source heat exchangers: An electromagnetism topology-based analysis. *Energy Reports.* 2023;10:3914–3928.

29. Bazgaou A., Fatnassi H., Bouharrou R., et al. CFD modeling of the microclimate in a greenhouse using a rock bed thermal storage heating system. *Horticulturae.* 2023;9:183. doi: 10.3390/horticulturae9020183.

30. Badretdinova G.R., Kalimullin I.R., Zinurov V.E., et al. Evaluation of turbulence models for external flow around a heated pipe. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS.* 2023;25(2):176–186. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186. (In Russ.)

Authors of the publication

Maksim O. Utkin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-9743-7107>. 209maks@mail.ru

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>. ieremiada@gmail.com

Vadim E. Zinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>. vadd_93@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **18.07.2025 г.**

Отредактировано **24.08.2025 г.**

Принято **13.09.2025 г.**



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УЗЛА НАГРЕВАНИЯ МАСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рагулин А.А.^{1,3}, Бронская В.В.¹, Бальзамов Д.С.²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³ПАО «СИБУР Холдинг», ПАО «Казаньоргсинтез» г. Казань, Россия
dbalzatov@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Вопросы эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в промышленности России остаются крайне важными, что подтверждается принятием ряда законодательных и нормативных документов на федеральном и региональном уровнях. Исторически сложившаяся структура энергокомплексов предприятий, включая производства с использованием масляных систем, формировалась в условиях низких цен на энергоносители, что привело к недостаточной энергоэффективности технологических процессов. В связи с этим актуальной задачей становится модернизация существующих узлов, в частности, систем нагрева масла, с применением современных методов технологического моделирования. **ЦЕЛЬ.** Исследование узла нагрева масла с целью оптимизации его теплового режима, снижения энергопотерь и разработки мероприятий по повышению энергоэффективности с использованием инструментов технологического моделирования является целью данного исследования. **МЕТОДЫ.** Для достижения поставленных целей применялись: системный анализ тепловых и технологических процессов, математическое и компьютерное моделирование теплообмена в узле нагрева масла, методы энерготехнологического комбинирования для выявления резервов энергосбережения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В рамках исследования проведены: анализ тепловых потерь в узле нагрева масла, моделирование тепловых потоков с учетом изменения вязкости и теплоемкости масла, оценка эффективности работы теплообменного оборудования и выявление «узких мест». Предлагаемые решения: внедрение дополнительного теплообменника для утилизации тепла отходящих газов, оптимизация режимов нагрева за счет автоматизации управления температурными параметрами, использование рекуперативных схем для повышения КПД системы. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Реализация предложенных мер позволит получить экономию в размере составил 6,55 млн рублей в год. Применение инструментов технологического моделирования при модернизации узла нагрева масла позволяет оптимизировать тепловые процессы, сократить энергопотери и повысить экономическую эффективность производства. Внедрение предложенных решений обеспечит значительную экономию энергоресурсов при относительно коротком сроке окупаемости. Реализация данного проекта внесет вклад в цифровую трансформацию процессов теплопередачи и энергоэффективности в нефтехимической промышленности за счет применения технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Это соответствует ключевым направлениям Стратегии научно-технологического развития РФ, включая переход к интеллектуальным производственным системам, обработку больших данных и внедрение методов автоматизированного управления. Таким образом, предлагаемый подход открывает новые возможности для цифровизации нефтехимических производств, повышая их эффективность, экологичность и конкурентоспособность в соответствии с приоритетами НТР РФ.

Ключевые слова: теплообменное оборудование; ТЛВ-330; кожухотрубчатый теплообменник; модернизация; технологическое моделирование; Aspen HYSYS; Aspen EDR; машинное обучение.

Для цитирования: Рагулин А.А., Бронская В.В., Бальзамов Д.С. Совершенствование методов расчета узла нагрева масла с использованием цифрового моделирования и машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 168-181. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-168-181.

IMPROVEMENT OF OIL HEATING UNIT CALCULATION METHODS USING DIGITAL MODELING AND MACHINE LEARNING

Ragulin A.A.^{1,3}, Bronskaya V.V.¹, Balzamor D.S.²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³SIBUR, Kazanorzsintez

dbalzamor@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE.* The issues of efficient use of fuel and energy resources in the Russian industry remain extremely important, which is confirmed by the adoption of a number of legislative and regulatory documents at the federal and regional levels. Historically, the structure of energy complexes of enterprises, including production using oil systems, was formed in conditions of low energy prices, which led to insufficient energy efficiency of technological processes. In this regard, the modernization of existing components, in particular, oil heating systems, using modern methods of technological modeling, becomes an urgent task. *THE PURPOSE.* The study of oil heating unit in order to optimize its thermal regime, reduce energy losses and develop measures to improve energy efficiency using technological modeling tools is the purpose of this study. *METHODS.* To achieve the set objectives the following methods were used: system analysis of thermal and technological processes, mathematical and computer modeling of heat exchange in the oil heating unit, methods of energy-technological combination to identify energy saving reserves. *RESULTS.* Within the framework of the research there were carried out: analysis of heat losses in the oil heating unit, modeling of heat flows taking into account changes in viscosity and heat capacity of oil, evaluation of efficiency of heat exchange equipment and identification of “bottlenecks”. Proposed solutions: introduction of an additional heat exchanger for waste gas heat recovery, optimization of heating modes by means of automation of temperature parameters control, use of recuperative schemes to increase system efficiency. *CONCLUSION.* Implementation of the proposed measures will result in savings of up to 6.55 million rubles per year. Application of technological modeling tools in modernization of oil heating unit allows to optimize thermal processes, reduce energy losses and increase economic efficiency of production. Implementation of the proposed solutions will provide significant energy savings with a relatively short payback period. The implementation of this project will contribute to the digital transformation of heat transfer processes and energy efficiency in the petrochemical industry through the application of artificial intelligence and machine learning technologies. This corresponds to the key directions of the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation, including the transition to intelligent production systems, big data processing and the introduction of automated control methods. Thus, the proposed approach opens up new opportunities for the digitalization of petrochemical industries, increasing their efficiency, environmental friendliness and competitiveness in accordance with the priorities of scientific and technological development of the Russian Federation.

Keywords: heat exchanger equipment; TLV-330; shell and tube heat exchanger; modernization; process modeling; Aspen Hysys; Aspen Exchanger Design and Rating (EDR); machine learning.

For citation: Ragulin A.A., Bronskaya V.V., Balzamor D.S. Improvement of oil heating unit calculation methods using digital modeling and machine learning. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 168-181. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-168-181.

Введение (Introduction)

Масляные теплообменные циклы используются для нагревания различных технологических сред. В отличие от традиционных теплоносителей – водяного пара и воды – масляные теплообменные циклы имеют ряд преимуществ, среди которых широкий температурный диапазон (от минус 115 до 410°C), равномерность распределения тепла, высокий коэффициент теплоотдачи, защита оборудования от коррозии и возможность организации замкнутого теплообменного цикла. Главное преимущество масляных теплообменных циклов – возможность достижения высоких температур сред при низких давлениях [1].

В рассматриваемом масляном теплообменном цикле используется высококипящий теплоноситель ТЛВ-330 (ТУ 2422-022-29727929-2001), представляющий собой смесь

полиалкилбензолов и получаемый алкилированием бензола различными альфа-олефинами [2].

В настоящее время уровень развития информационных технологий достиг того уровня, при котором есть возможность проверки различных гипотез, связанных с модернизацией и оптимизацией химико-технологических процессов, не сразу на реальных производствах в виде опытно-промышленных испытаний, а предварительно на математических моделях этих производств. Такая возможность предоставляется благодаря использованию различных инструментов технологического моделирования [3, 4].

Одной из основных задач технологического моделирования является определение оптимального режима протекания производственного процесса. При этом могут быть приняты различные критерии оптимальности, например, производительность установки, узла или отдельной технологической линии, конверсия или селективность процесса, чистота продукта [5].

Многие крупные компании нефтегазохимического сектора (ПАО «СИБУР Холдинг», ПАО «Татнефть», ПАО «Газпром нефть», ПАО «НК «Роснефть» и другие) активно используют инструменты технологического моделирования для проверки своих технологических гипотез.

Использование инструментов технологического моделирования в рамках оценки возможности модернизации узла нагревания масла позволит рассчитать требуемую тепловую нагрузку, рассчитать и подобрать необходимый теплообменный аппарат, а также оценить экономический эффект мероприятия.

Несмотря на большое количество доступных инструментов и сред для технологического и математического моделирования, среди которых представлены не только зарубежные (Aspen HYSYS, Aspen Plus, Aspen EDR, ChemCAD и др.), но и российские (Комфорт, GIBBS, ДВСИМ, АЭРОСИМ) разработки, предпочтение отдано именно программному обеспечению компании AspenTech ввиду большого опыта и высокого уровня доверия к продуктам на мировом рынке [6].

В качестве основных инструментов для технологического моделирования выбраны Aspen HYSYS (моделирование процессов нефтепереработки и процессов органического синтеза) и Aspen EDR (специализированное программное обеспечение для расчета и подбора теплообменного оборудования).

Цель исследования Модернизация узла нагревания масла путем дополнительного перенаправления потока масла через кожухотрубчатый теплообменник, обогреваемый природным газом.

Литературный обзор (Literature Review)

Моделирование узла нагрева масла с использованием современных инструментов позволяет решать проблемы существующих производств, повышать выход продукции и оптимизировать технологические процессы установки [1-3]. Эти результаты достигаются за счет разработки сценариев оптимизации, оценки эффективности оборудования при изменении режимных параметров и состава сырья [4-6].

Для моделирования химико-технологических процессов применяются специализированные симуляторы, позволяющие с высокой точностью воспроизводить работу промышленных установок через математическое описание физико-химических превращений. Среди наиболее востребованных в нефтегазохимической отрасли программных решений можно выделить Aspen HYSYS, Petro-SIM, GIBBS, «Аэросим» и другие аналогичные платформы [7-9].

Представленная методология позволяет детально анализировать исследуемый объект и выполнять комплексные расчеты, реализация которых в промышленных условиях сопряжена с техническими сложностями или представляет потенциальную опасность. Кроме того, для математического моделирования химико-технологических процессов всё активнее применяются алгоритмы машинного обучения [10-12].

Представленная методология позволяет получать достоверные технологические показатели, минуя этап сложных инженерных вычислений – исключительно за счет аппроксимационных коэффициентов, полученных в ходе тренировки модели. Инновационное направление в моделировании химико-технологических процессов предполагает интеграцию традиционных и машинно-обучаемых методов [13-15]. Изначально процесс рассчитывается в симуляционном пакете, а выходные данные структурируются в обучающую выборку для алгоритмов ИИ. Данная стратегия обеспечивает экспресс-оценку параметров процесса без потери точности прогнозирования.

Машинное обучение опирается на специализированные алгоритмы, способные выявлять скрытые взаимосвязи в исходных данных и формировать прогнозные решения

[16-19]. Ключевое преимущество таких моделей заключается в возможности генерирования выходных параметров технологического процесса без выполнения традиционных расчетных процедур – исключительно на основе выведенных в процессе обучения математических зависимостей. Современные ML-алгоритмы (Machine Learning) представляют собой самообучающиеся системы, которые анализируют входные параметры, определяют характерные закономерности и вырабатывают прогнозные решения [20].

Материалы и методы (Materials and methods)

Проделанную работу по исследованию возможности модернизации узла нагревания масла условно можно разделить на три этапа.

Первый этап – моделирование узла нагревания масла до и после модернизации в программном пакете Aspen HYSYS. На данном этапе производился сбор исходных данных для моделирования, среди которых, главным образом, температуры, давления, расходы (массовые или объемные) и составы входящих потоков, разработка гипотетического компонента по известным физическим свойствам рассматриваемого масла, непосредственное построение моделей узла нагревания до и после предполагаемой модернизации, проверка модели на адекватность и анализ результатов моделирования.

Второй этап – моделирование кожухотрубчатого теплообменника в Aspen EDR. На данном этапе производился сбор исходных данных на основании результатов предыдущего этапа, разработка модели теплообменника, корректировка модели с учетом индивидуальных параметров процесса и геометрии теплообменного оборудования и анализ результатов моделирования.

Третий этап – оценка экономической целесообразности предложенного мероприятия по модернизации и формирование рекомендаций. На данном этапе оцениваются капитальные и операционные затраты (при наличии), а также экономический эффект (как правило, годовой) внедрения предложенного мероприятия и принимается решение о целесообразности или нецелесообразности технологического решения. При необходимости более точной оценки жизнеспособности проекта проводится оценка чистого приведенного дохода NPV, внутренней нормы доходности IRR, индекса рентабельности PI и срока окупаемости PP.

Результаты (Results)

Теплоноситель ТЛВ-330 не имеет конкретного химического состава, что вызывает определенные трудности при моделировании узла нагревания в программном пакете Aspen HYSYS (нет возможности напрямую задать поток теплоносителя). По этой причине появилась необходимость создать гипотетический компонент, который по предоставленным физическим свойствам соответствует теплоносителю ТЛВ-330.

Гипотетический компонент в Aspen HYSYS представляет собой пользовательский компонент, не имеющий конкретного химического состава и отсутствующий в библиотеках программного обеспечения, который может быть определен с помощью задания различных физических свойств, например, температура кипения, плотность, молекулярная масса и другие.

Для теплоносителя ТЛВ-330 в открытых источниках есть зависимости плотности, теплоемкости, динамической вязкости и теплопроводности от температуры в диапазоне от 0 до 300°C [21].

Технология выбранного узла предполагает нагревание масла от 120 до 260°C при отсутствии различных фазовых переходов. Количество теплоты, которое необходимо сообщить теплоносителю для нагревания от начальной до конечной температуры без фазовых переходов можно оценить по формуле (1) [7]:

$$Q = c \cdot G \cdot (t_k - t_n) \quad (1)$$

где Q – требуемое количество теплоты, Вт; G – массовый расход среды, кг/с; c – теплоемкость среды, Дж/(кг·К); t_n и t_k – начальная и конечная температуры среды соответственно, °C или К.

По формуле (1) можно сделать вывод, что определяющим физическим свойством вещества при нагревании или охлаждении сред без фазовых переходов является теплоемкость.

Была проведена верификация созданной модели гипотетического компонента по плотности и теплоемкости масла. Результаты верификации представлены в таблице 1.

Верификация гипотетического компонента
Verification of a hypothetical component

Температура, °С	Плотность, кг/м ³		Отклонение, %	Теплоемкость, кДж/(кг·К)		Отклонение, %
	Факт	Модель		Факт	Модель	
0	865,00	863,41	0,18	1,70	1,69	0,48
20	853,00	852,62	0,04	1,78	1,78	0,12
40	842,00	841,81	0,02	1,86	1,87	0,59
60	832,00	830,95	0,13	1,94	1,96	0,92
80	820,00	820,03	0,00	2,05	2,04	0,33
100	810,00	809,01	0,12	2,13	2,13	0,14
120	788,00	797,89	1,25	2,18	2,21	1,33
140	798,00	786,64	1,42	2,26	2,29	1,29
160	776,00	775,25	0,10	2,34	2,37	1,19
180	765,00	763,71	0,17	2,42	2,44	1,02
200	755,00	751,98	0,40	2,50	2,52	0,79
220	740,00	740,06	0,01	2,56	2,59	1,30
240	732,00	727,90	0,56	2,64	2,67	0,95
260	722,00	715,48	0,90	2,71	2,74	0,93
280	712,00	702,77	1,30	2,79	2,80	0,49
300	701,00	689,71	1,61	2,86	2,87	0,37

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

Максимальное отклонение по плотности составило 1,61%, по теплоемкости – 1,30%, а значит, что гипотетический компонент очень точно описывает необходимые для оценки тепловой нагрузки физические свойства теплоносителя и может быть использован для моделирования.

Настройка гипотетического компонента осуществлялась по следующим параметрам: молекулярная масса Molecular Weight, нормальная температура кипения Normal Boiling Pt, плотность Ideal Liq Density, критическая температура Critical Temperature и критическое давление Critical Pressure. При этом оставшиеся параметры – критический объем Critical Volume и ацентричность Acentricity – рассчитываются на основании введенных параметров.

Окно настройки гипотетического компонента приведено на рисунке 1.

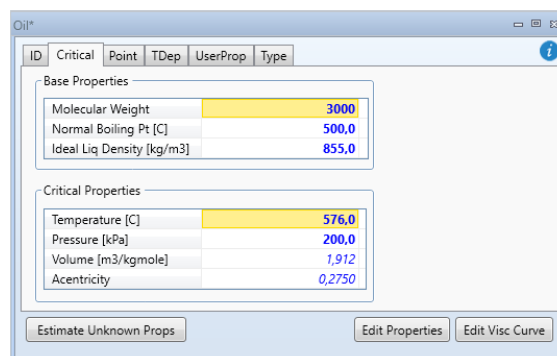


Рис. 1. Окно настройки гипотетического компонента Fig. 1. Hypothetical component configuration window

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

В разработанных моделях в Aspen HYSYS поток теплоносителя именуется «Oil», поток природного газа – «Gas», причем, если поток входящий, к нему добавляется «in», если поток выходящий – «out».

Исходные данные для моделирования представлены в таблице 2.

Исходные данные для моделирования
Initial data for modeling

Параметр	Единица измерения	Значение		
		Теплоноситель ТЛВ-330 (Oil)	Природный газ (Gas)	
Массовый расход	кг/ч	17 230,00	76 347,54	
Объемный расход	нм ³ /ч	–	239,7	
Начальная температура	°C	120,0	150,0	
Конечная температура	°C	260,0	–	
Начальное давление	кПа	230	4 900	
Состав потока	% об.	гипотетический компонент (верификация по физическим свойствам)	метан CH ₄	91,46
			этан C ₂ H ₆	4,89
			пропан C ₃ H ₈	0,16
			<i>i</i> -бутан C ₄ H ₁₀	0,03
			азот N ₂	3,23
			водород H ₂	0,03
		гелий He	0,20	

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

По исходным данным с учетом разработанного гипотетического компонента в Aspen HYSYS были разработаны упрощенные модели узла нагревания масла до и после модернизации.

Термодинамический пакет – Peng-Robinson.

Упрощенная модель узла нагревания масла до модернизации приведена на рисунке 2.

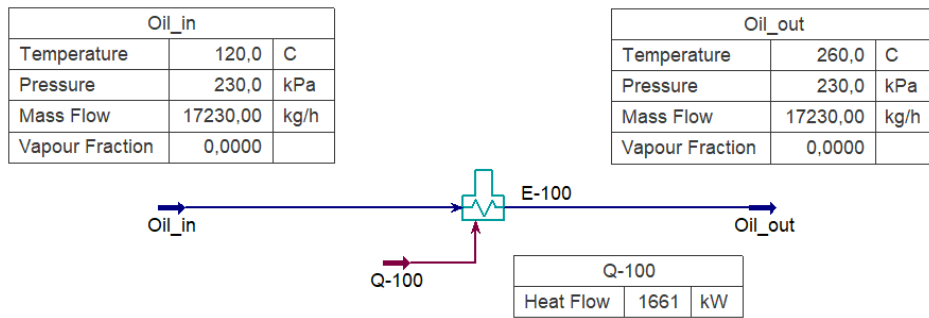


Рис. 2. Упрощенная модель узла нагревания масла до модернизации Fig. 2. Simplified model of oil heating unit before modernization

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

Упрощенная модель узла нагревания масла после модернизации приведена на рисунке 3.

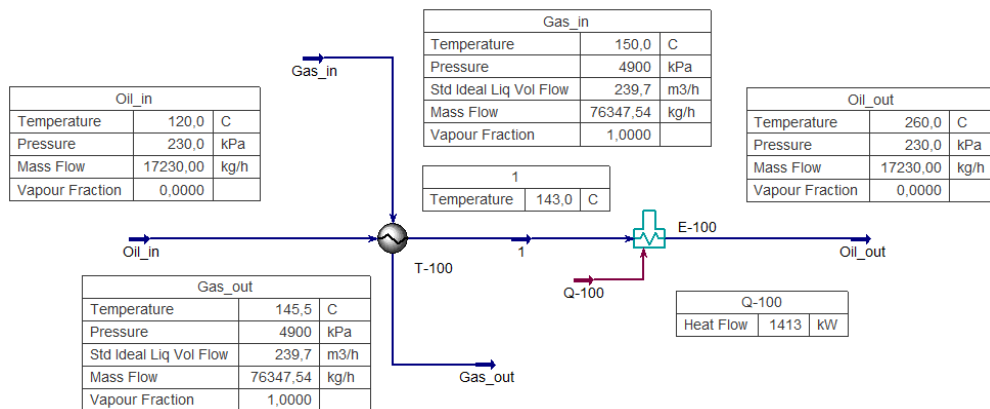


Рис. 3. Упрощенная модель узла нагревания масла после модернизации Fig. 3. Simplified model of oil heating unit after modernization

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

Проведен детальный расчет теплообменника Т-100 в Aspen EDR с целью более точного определения требуемой тепловой нагрузки и подбора аппарата и составлена тепловая диаграмма. В качестве исходных данных была использована модель теплообменника Т-100, представленная на рисунке 3 (импорт модели Aspen HYSYS в Aspen EDR).

По результатам расчета предлагается использовать одноходовой по трубному и межтрубному пространствам кожухотрубчатый теплообменник типа ВЕМ (по стандартам ТЕМА) с поверхностью теплообмена 460,8 м² (необходимая поверхность теплообмена – 449,3 м²). При этом движущая сила процесса нагревания масла – средняя логарифмическая разность температур – составляет 21,6°С. Тепловая нагрузка – 552 кВт.

Геометрические размеры предполагаемого теплообменника представлены на рисунке 4.

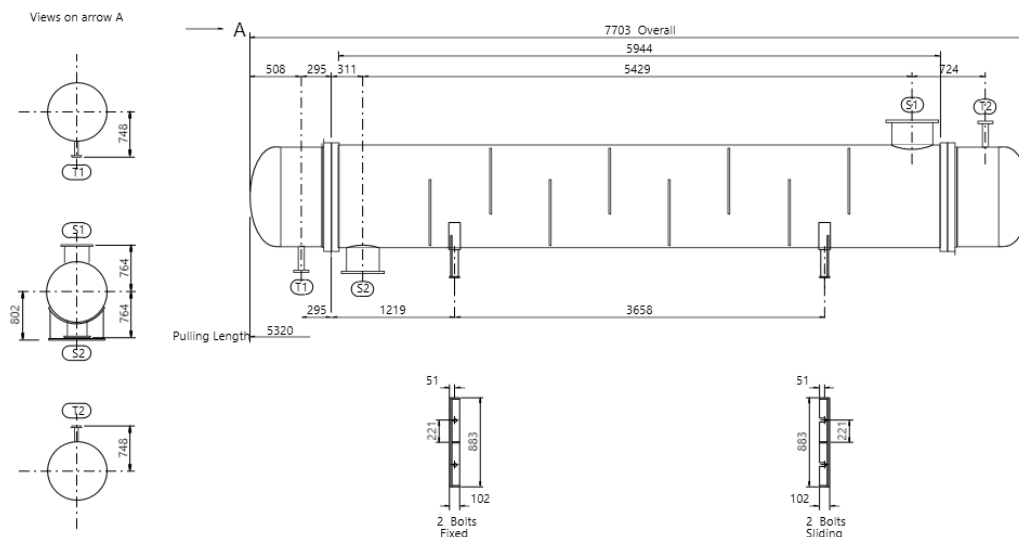


Рис. 4. Геометрические размеры кожухотрубчатого теплообменника из Aspen EDR *Fig. 4. Geometric dimensions of the shell and tube heat exchanger from Aspen EDR*
*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

При необходимости из Aspen EDR можно вывести различную информацию, например, геометрию предполагаемого теплообменника, число Рейнольдса для потоков, скорости потоков, материал изготовления, оценку вибрации, массу, ориентировочную стоимость и другие свойства.

Основным недостатком использования Aspen EDR является использование в качестве каталога для подбора теплообменного оборудования зарубежного стандарта ТЕМА (Tubular Exchanger Manufacturers Association), что, несомненно, представляет определенные трудности для проектировщиков.

На территории Российской Федерации подбор теплообменного оборудования регламентируется ГОСТ 31842-2012 «Теплообменники кожухотрубчатые. Технические требования».

Тепловая диаграмма процесса до и после модернизации узла нагревания приведена на рисунке 5.

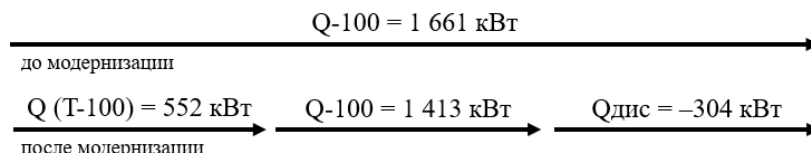


Рис. 5. Тепловая диаграмма *Fig. 5. Thermal diagram*
*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам расчета на текущая тепловая нагрузка составляет $Q-100 = 1\ 661\ \text{кВт}$. После модернизации за счет тепла природного газа можно нагреть масло до температуры примерно 143°С, что соответствует тепловой нагрузке $Q(T-100) = 552\ \text{кВт}$, нагревание масла от температуры 143 до 260°С требует тепловой нагрузки $Q-100 = 1\ 413\ \text{кВт}$. При этом дисбаланс тепловой энергии составил 304 кВт с отрицательным знаком.

С теоретической точки зрения, суммы тепловых потоков до и после модернизации должны быть одинаковыми. Различия возникли из-за того, что в Aspen EDR осуществляется подробный расчет теплообменника, в ходе которого учитываются перепад давления по потокам, загрязнения, конструкция, расположение и количество труб. Также существенной причиной может быть отклонение других физических свойств гипотетического компонента, помимо плотности и теплоемкости, верификация которых не проводилась. К таким физическим свойствам, вполне вероятно, могут относиться теплопроводность, динамическая и кинематическая вязкости, то есть свойства, которые оказывают прямое влияние на величины определяющих интенсивность теплообмена критериев – критериев Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта.

Экономический эффект мероприятия будет оцениваться по тепловой нагрузке, полученной именно при расчете в Aspen EDR.

В качестве дополнения по итогам расчетов на основании машинного обучения была разработана ML-модель, которая предсказывает, какое количество газа, которое нужно подавать в теплообменник Т-100 в зависимости от температуры и массового расхода масла.

В качестве базы данных для обучения и последующего тестирования статистической модели используется смесь экспериментальных данных, полученных непосредственно с установки, и теоретических данных, полученных из модели Aspen HYSYS.

Теоретические данные были сгенерированы по разработанной модели с помощью встроенной в MS Excel утилиты Aspen Simulation Workbook. Таким образом, в качестве входных данных модель принимает температуру и расход масла, в качестве выходных данных выдает массовый расход газа, подаваемый в теплообменник Т-100.

Общее количество значений составляет примерно 400.

Процесс создания регрессионной модели можно разделить на несколько этапов: обработка и очистка входных данных; разработка статистической модели; проведение тестов модели; оценка ошибки и отклонений; корректировка модели и проведение дополнительных тестов.

Анализ данных в Python производится с помощью библиотеки Pandas, которая позволяет преобразовать полученные из Aspen HYSYS данные, а с помощью библиотеки scikit-learn и встроенных в нее функций и алгоритмов машинного обучения разбить данные на группы, среди которых группы входных и выходных данных, а также группы данных для обучения и группы данных для тестирования. Разбиение на обучающие и тестовые данные происходит на 80 и 20% соответственно, при этом происходит так называемая псевдорандомизация данных.

Основной задачей машинного обучения в рамках данной работы является проведение статистического анализа и разработка регрессионной модели с определением соответствующих коэффициентов модели, которые описывают характеризующее уравнение, на основании полученных входных данных.

Наиболее простым и часто используемым является метод линейной регрессии, который в общем виде можно описать уравнением (2):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_n x_n, \quad (2)$$

где y – зависимая переменная; β_0, β_n – параметры (коэффициенты) регрессии; x_n – факторы модели (регрессоры); n – количество факторов.

В рамках данной работы уравнение регрессии в общем виде записывается в следующем виде:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \quad (3)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ – коэффициенты регрессии; x_1 – массовый расход масла, кг/ч; x_2 – температура масла, °С.

Оценить работу модели можно по показателю средней абсолютной ошибки между предсказанным и фактическим значением, который можно оценить с помощью встроенного модуля «sklearn.metrics».

Средняя абсолютная ошибка рассчитывается по формуле (4):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{\phi} - y_n|}{n}, \quad (4)$$

где y_{ϕ} – фактическое значение переменной; y_n – значение, предсказанное моделью; n – количество измерений.

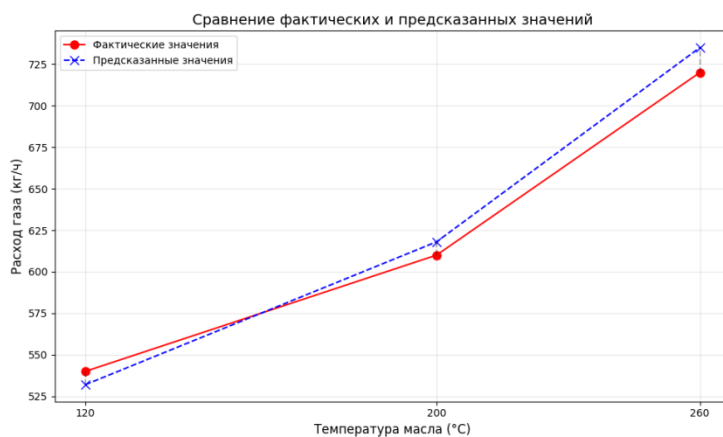


Рис. 6. Сравнение фактических и предсказанных значений расхода газа *Fig. 6. Comparison of actual and predicted gas flow rates*

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

Помимо средней абсолютной ошибки (MAE = 1.9%), модель оценивалась по следующим метрикам:

Коэффициент детерминации (R^2): 0.98, что указывает на высокую объясняющую способность модели.

Среднеквадратичная ошибка (RMSE): 2.3 кг/ч, что составляет менее 1.5% от диапазона значений расхода газа.

Точность предсказаний: 98.1% (доля случаев, где отклонение от фактических данных не превышает 3%).

Модель интегрирована в систему управления узлом нагрева (РИС) для:

Динамической корректировки подачи газа в зависимости от текущих параметров масла (расход, температура).

Прогнозирования нагрузки при изменении технологических режимов (например, при пуске/остановке оборудования).

Минимизации дисбаланса тепловой энергии (снижение отклонений до 5% против 15% при ручном управлении).

Пример: при увеличении температуры масла со 120°C до 200°C модель автоматически рассчитывает требуемый рост расхода газа на 18%, что подтверждается данными Aspen HYSYS.

В сравнение с традиционными методами Скорость расчетов ML-модель выдает результаты за 0.1 сек против 10–15 мин для детерминированного моделирования в Aspen HYSYS. Отклонение предсказаний от данных Aspen HYSYS не превышает 2.5%, что сопоставимо с погрешностью экспериментальных измерений. Модель адаптируется к изменениям параметров (например, составу масла) без пересмотра математической основы, в отличие от статических уравнений баланса.

Кроме того влияние ML на общие результаты расчетов

Сокращение сроков анализа режимов на 40%.

Оптимизация расхода газа с помощью ML дала дополнительный эффект 0.8 млн руб./год (к базовым 6.55 млн руб./год).

Модель может быть доработана для прогнозирования износа оборудования на основе данных о тепловых нагрузках.

Применение машинного обучения позволило не только подтвердить эффективность модернизации, но и создать инструмент для оперативного управления процессом с точностью, превышающей традиционные методы. Это открывает путь к цифровизации аналогичных узлов в нефтехимической отрасли. Для дальнейшего повышения точности целесообразно расширить обучающую выборку данными с промышленных установок и внедрить алгоритмы онлайн-обучения модели.

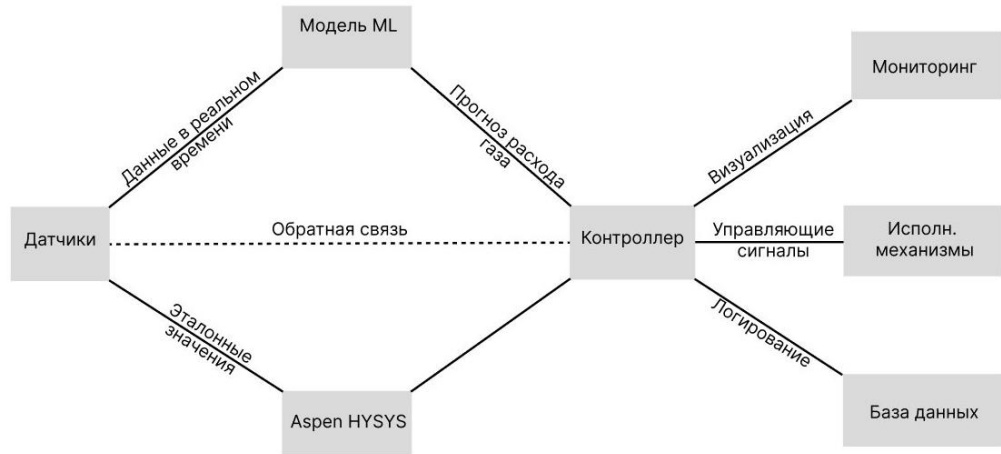


Рис. 7. Схема интеграции ML-модели в систему управления узлом нагрева Fig. 7. Integration of the ML model into the heating unit control system

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



Рис. 8. Схема интеграции ML-модели в систему управления узлом нагрева нефтепродуктов Fig. 8. Integration of an ML model into the control system of a heating unit for petroleum products

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

Экономический эффект

Экономический эффект предлагаемой модернизации обуславливается снижением потребления топливного газа, который необходимо подавать в печь E-100 для нагревания масла до требуемой температуры.

Рассчитаем годовую тепловую нагрузку Q_{Γ} по формуле (5):

$$Q_{\Gamma} = Q \cdot t, \quad (5)$$

где Q – тепловая нагрузка теплообменника, кВт (\equiv кДж/с); t – время, с.

$$Q_{\Gamma} = 552 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 1,74 \cdot 10^{10} \text{ кДж}$$

Потребление топливного газа $V_{\Gamma\Gamma}$, который преимущественно состоит из метана, можно рассчитать по формуле (6):

$$V_{\Gamma\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}}{r}, \quad (6)$$

где $r = 39\,860 \text{ кДж/м}^3$ – удельная теплота сгорания метана.

$$V_{\text{тг}} = \frac{1,74 \cdot 10^{10}}{39\,860} = 436,7 \text{ тыс. м}^3$$

Экономический эффект (ЭЭ) оценивается по формуле (7):

$$\text{ЭЭ} = V_{\text{тг}} \cdot P, \quad (7)$$

где $P = 15 \text{ руб./м}^3$ – стоимость метана.

$$\text{ЭЭ} = 436\,700 \cdot 15 \cdot 10^{-6} = 6,55 \text{ млн руб.}$$

Экономический эффект за счет сокращения потребления топливного газа в печь E-100 составил 6,55 млн рублей в год.

Заключение (Conclusions)

В ходе работы были построены модели узла нагревания масла до и после модернизации в Aspen HYSYS V14 и модель кожухотрубчатого теплообменника в Aspen EDR V14. Анализ полученных результатов показал технологическую и экономическую эффективность предлагаемой модернизации, которая позволит сократить потребление топливного газа, поступающего для нагревания масла, на 436,7 тыс. м³ в год.

В качестве дополнения ML-модели и статистического анализа разработана регрессионная модель, которая принимает температуру и массовый расход масла в качестве входных данных и предсказывает на их основе массовый расход газа в теплообменник T-100. Количество данных для обучения и тестирования – примерно 400. Точность модели – 98,1%.

Экономический эффект – 6,55 млн рублей в год.

Инструменты технологического моделирования (Aspen HYSYS, Aspen EDR) позволили подтвердить, что предположительная модернизация повысит технологическую и энергетическую независимость узла нагревания масла за счет экономии природного газа в качестве топлива.

Литература

1. Мануйко Г.В., Аминова Г.А., Дьяконов Г.С., Ахметов И.Г., Бронская В.В. Кинетическая неоднородность неодимовой каталитической системы, модифицированной метилалюмоксаном // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 3. С. 261.
2. Шатунов Д.Н., Камаева К.А., Малыгин А.В., Клинов А.В. Влияние конструкции сегментных перегородок на процесс теплообмена в газомасляном теплообменном аппарате // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 8. – С. 98-103.
3. Бронская В.В., Зиннурова О.В., Фирсин А.А., Шипин А.В. Цифровое моделирование установки газофракционирования с использованием методов машинного обучения // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 11. – С. 10-16. – DOI 10.17513/snt.40204.
4. Харитонова О.С., Бронская В.В., Зиннурова О.В., Фирсин А.А. Моделирование установки замедленного коксования в программе MATLAB // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2024. – № 2. – С. 29-37. – DOI 10.24143/2072-9502-2024-2-29-37.
5. Haibullina A., Khairullin A., Balzamor D., Ilyin V., Bronskaya V., Khairullina L. Local heat transfer dynamics in the in-line tube bundle under asymmetrical pulsating flow // Energies. 2022. Т. 15. № 15. С. 5571.
6. Бальзамов Д.С., Конахина И.А. Система энерготехнологического комбинирования высокотемпературного участка дегидрирования изоамиленов в изопрен // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2010. № 1(4). С. 16-25.
7. Бальзамов Д.С., Бронская В.В. Повышение эффективности использования тепловой энергии на теплотехнологическом участке производства этилена // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 103-115. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-103-115.
8. Артюшкин И.В., Максимов А.Е. Разработка автоматической системы управления процессом термохимического обезвоживания нефтяных эмульсий на основе искусственной нейронной сети // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 1 (53). С. 7–15.
9. Малыгин А.В., Емельянов И.И., Семин Р.В., Фазлыев А.Р., Зиятдинов Н.Н., Клинов А.В. Моделирование процесса мембранного разделения жидкой смеси в среде Aspen HYSYS. Тонкие химические технологии. 2025;20(1):75-88. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-1-75-88>.
10. Chen X., Wang N. Modeling a Delayed Coking Process with GRNN and Double-Chain Based DNA Genetic Algorithm // International Journal of Chemical Reactor Engineering. 2010. Vol. 8, Is. 1. DOI: 10.2202/1542-6580.2192.
11. Hayrullin A., Haibullina A., Sinyavin A., Ilyin V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 232. – С. 125916. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125916.

12. Деникеева А.У. Моделирование процесса получения газойля при помощи искусственной нейронной сети // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 26–1. С. 219–223.
13. Hayrullin A., Sinyavin A., Haibullina A. [et al.] Heat Transfer in Annular Channels with the Inner Rotating Cylinder and the Radial Array of Cylinders // Energies. – 2024. – Vol. 17, №. 23. – С. 6047. – DOI 10.3390/en17236047.
14. Мухаметзянова А.Г., Бронская В.В., Харитонова О.С. Нейросетевое моделирование гидродинамики потока в колонных аппаратах с насадочными элементами // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 12. С. 139–141.
15. Frolov I.N., Firsin A.A., Okhotnikova E.S., Yusupova T.N., Ziganshin M.A. The study of bitumen by differential scanning calorimetry: the interpretation of thermal effects // Petroleum Science and Technology. 2019. Т. 37, № 4. P. 417–424.
16. Laptev A.G., Lapteva E.A., Solovieva O.V., Klochkova V.A. Methods of Mathematical Modeling of Desorption of Poorly Soluble Gases in Packed Devices // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 4. – С. 1027-1035. – DOI 10.1134/S0040579525600147.
17. Bakhtadze N.N., Lototsky V.A. Knowledge-based models of nonlinear systems based on inductive learning // Intelligent Systems Reference Library. 2016. Vol. 98. P. 85–104.
18. Tun M.S., Lakshminarayanan S., Emoto G. Data Selection and Regression Method and Its Application to Softsensing Using Multirate Industrial Data // Journal of Chemical Engineering of Japan. 2008. Vol. 41, Is. 5. P. 374–383.
19. Шаймухаметов Д.Р., Мустафина С.А., Шаймухаметова Д.В. Прямое моделирование процесса дегидрирования метилбутенов в изопрен на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 24. С. 123–126.
20. Burlutsky E., Balzamor D., Bronskaya V. [et al.] Influence of Temperature on the Thermal Properties of the Core Material - the Coefficient of Temperature Conductivity, Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity // International Journal of Technology. – 2023. – Vol. 14, №. 2. – P. 443. – DOI 10.14716/ijtech.v14i2.6009.
21. Хайбуллина А.И., Зиннатуллин Н.Х., Ильин В.К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(1):59-67. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-59-67>

Авторы публикации

Рагулин Антон Александрович – студент Казанского национального исследовательского технологического университета, ПАО «СИБУР Холдинг», ПАО «Казаньоргсинтез», Управление организационными проектами и цифровизацией, Технологическое моделирование г. Казань, Россия.

Бронская Вероника Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия. dweronika@mail.ru

Бальзамов Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3877-7643>. dbalzamor@mail.ru

References

1. Manuiko G.V., Aminova G.A., Diakonov G.S., Akhmetov I.G., Bronskaya VV. Kinetic heterogeneity of neodymium catalytic system modified by methylalumoxane // Theoretical bases of chemical technology. 2015. Т. 49. № 3. P. 261.
2. Shatunov D.N., Kamaeva K.A., Malygin A.V., Klinov A.V. Influence of segmental partitions design on the heat exchange process in a gas-oil heat exchanger // Herald of technological university. 2024. Т. 27. № 8. P. 98-103.
3. Bronskaya V.V., Zinnurova O.V., Firsin A.A., Shipin A.V. Digital modeling of gas fractionation unit using machine learning methods // Modern high technologies. – 2024. – № 11 – P. 10-16. - DOI 10.17513/snt.40204.

4. Haritonova O., Bronskaya V., Zinnurova O., Firsin A. Modeling of a delayed coking plant in the MatLab program // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics. 2024. no. 2. pp. 29-37. DOI: <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-29-37>.

5. Haibullina A., Khairullin A., Balzamor D., Ilyin V., Bronskaya V., Khairullina L. Local heat transfer dynamics in the in-line tube bundle under asymmetrical pulsating flow // Energies. 2022. T. 15. № 15. P. 5571.

6. Balzamor D.S., Konakhina I.A. System of energy-technological combination of high-temperature dehydrogenation section of isoamylenes into isoprene // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. - 2010. - № 1(4). - P. 16-25.

7. Balzamor D.S., Bronskaya V.V. Increasing the efficiency of thermal energy use at the thermal technology section of ethylene production. Power engineering: research, equipment, technology. 2025; 27 (1): 103-115. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-103-115.

8. Artyushkin I.V., Maksimov A.E. Development of an automatic control system for thermochemical dehydration of oil emulsions based on an artificial neural network // Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2017. № 1 (53). P. 7-15.

9. Malygin A.V., Emel'yanov I.I., Semin R.V., Fazlyev A.R., Ziyatdinov N.N., Klinov A.V. Modeling of membrane separation of liquid mixture in Aspen HYSYS. *Tonk. Khim. Tekhnol. - Fine Chem. Technol.* 2025;20(1):75–88. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-1-75-88>.

10. Chen X., Wang N. Modeling a Delayed Coking Process with GRNN and Double-Chain Based DNA Genetic Algorithm // International Journal of Chemical Reactor Engineering. 2010. Vol. 8, Is. 1. DOI: 10.2202/1542-6580.2192.

11. Hayrullin A., Haibullina A., Sinyavin A., Ilyin V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 232. – P. 125916. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125916.

12. Denikeeva A.U. Modeling of the process of gasoil production using an artificial neural network // Priority scientific directions: from theory to practice. 2016. № 26-1. P. 219-223.

13. Hayrullin A., Sinyavin A., Haibullina A. [et al.] Heat Transfer in Annular Channels with the Inner Rotating Cylinder and the Radial Array of Cylinders // Energies. – 2024. – Vol. 17, №. 23. – P. 6047. – DOI 10.3390/en17236047.

14. Mukhametzhanova A.G., Bronskaya V.V., Kharitonova O.S. Neural network modeling of flow hydrodynamics in column apparatuses with nozzle elements // Herald of technological university. 2021. T. 24, № 12. P. 139-141.

15. Frolov I.N., Firsin A.A., Okhotnikova E.S., Yusupova T.N., Ziganshin M.A. The study of bitumen by differential scanning calorimetry: the interpretation of thermal effects // Petroleum Science and Technology. 2019. T. 37, № 4. P. 417–424.

16. Laptev A.G., Lapteva E.A., Solovieva O.V., Klochkova V.A. Methods of Mathematical Modeling of Desorption of Poorly Soluble Gases in Packed Devices // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 58, No. 4. – P. 1027-1035. – DOI 10.1134/S0040579525600147.

17. Bakhtadze N.N., Lototsky V.A. Knowledge-based models of nonlinear systems based on inductive learning // Intelligent Systems Reference Library. 2016. Vol. 98. P. 85–104.

18. Tun M.S., Lakshminarayanan S., Emoto G. Data Selection and Regression Method and Its Application to Softsensing Using Multirate Industrial Data // Journal of Chemical Engineering of Japan. 2008. Vol. 41, Is. 5. P. 374–383.

19. Shaimukhametov D.R., Mustafina S.A., Shaimukhametova D.V. Direct modeling of the process of dehydrogenation of methylbutene into isoprene on the basis of artificial neural networks // Herald of technological university. 2017. T. 20, № 24. P. 123-126.

20. Burlutsky E., Balzamor D., Bronskaya V. [et al.] Influence of Temperature on the Thermal Properties of the Core Material - the Coefficient of Temperature Conductivity, Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity // International Journal of Technology. – 2023. – Vol. 14, №. 2. – P. 443. – DOI 10.14716/ijtech.v14i2.6009

21. Haibullina A.I., Zinnatullin N.X., Ilyin V.K. Improving heat exchanger efficiency using the pulsed method of cleaning. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(1):59-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-59-67>

Authors of the publication

Anton A. Ragulin – Kazan National Research Technological University, SIBUR, Kazanorzsintez, Kazan, Russia.

Veronika V. Bronskaya – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. dveronika@mail.ru

Denis S. Balzamor – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:*
<https://orcid.org/0000-0003-3877-7643>. dbalzamor@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **14.04.2025 г.**

Отредактировано **30.09.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**



СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ РЕКУПЕРАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВТОРИЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Калинина М.В., Плотникова Л.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

esp_mvkalinina@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) является энергоемкой отраслью со значительными объемами неиспользованных вторичных энергоресурсов (ВЭР), в особенности низкопотенциальной теплоты (40-80°C). В условиях растущих требований к энергоэффективности и экологии рекуперация этих ВЭР из таких источников, как сточная и оборотная вода, вентиляционные выбросы, теплота охлаждения полупродуктов становится не просто перспективным направлением, а насущной необходимостью. Это позволяет сократить расход топлива, потребление энергии и вредные выбросы, повышая тем самым конкурентоспособность предприятий. **ЦЕЛЬ.** Целью исследования является повышение энергетической эффективности сложной промышленной тепло-технологической схемы целлюлозно-бумажного производства с использованием методов структурного и термодинамического анализа. Данные методы анализа позволяют объективно оценить потенциал переработки вторичных энергоресурсов и выбрать наиболее эффективные схемы систем рекуперации ВЭР. **МЕТОДЫ.** Эксергетический анализ выявил значительные неиспользуемые потери теплоты в целлюлозно-бумажном производстве, в частности, в сушильных установках с КПД всего 46.9%. Выявлено, что наибольший потенциал для рекуперации имеют потоки отработанного воздуха, сточных и оборотных вод, верхнего продукта колонн. Их утилизация с помощью теплонасосных установок позволяет существенно повысить энергоэффективность производства, снизив затраты на энергоносители и тепловое загрязнение окружающей среды. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Термодинамический анализ выявил значительные неиспользуемые потери в ключевых потоках производства (отработанный воздух, сточные и оборотные воды, верхний продукт колонн). Разработана система их рекуперации с помощью теплонасосных установок (ТНУ), которая позволяет повысить общий коэффициент использования энергии системы с 17.88% до 92.58%. Внедрение ТНУ обеспечивает существенную экономию тепловой энергии и снижает экологическую нагрузку производства. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Для решения этой проблемы разработана комплексная система рекуперации на основе термотрансформаторов – теплонасосных установок. Ее внедрение позволит утилизировать 10.13 МВт тепловой мощности из сбросных потоков, повысив общую энергоэффективность производства.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажное производство; энергоэффективность; вторичные энергоресурсы; низкопотенциальная теплота; рекуперация тепла; теплонасосные установки; эксергетический анализ; теплотехнологическая схема; энергосбережение; сточные воды; сушильные установки; термодинамический анализ.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2025-458 от 17.01.2025.

Для цитирования: Калинина М.В. Плотникова Л.В. Система комплексной рекуперации низкопотенциальной вторичной энергии в теплотехнологической схеме целлюлозно-бумажного производства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 182-194. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-182-194.

THE SYSTEM OF COMPLEX RECOVERY OF LOW-POTENTIAL SECONDARY ENERGY IN THE THERMAL TECHNOLOGY SCHEME OF PULP AND PAPER PRODUCTION

Kalinina M.V., Plotnikova L.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan Russia

esp_mvkalinina@mail.ru, mikhailovalv@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. Pulp and paper production is an energy-intensive industry with significant amounts of unused secondary energy resources (REM), especially low-potential heat (40-80°C). In the context of growing energy efficiency and environmental requirements, the recovery of these wind turbines from sources such as wastewater and recycled water, ventilation emissions, and heat cooling of intermediates is becoming not just a promising area, but an urgent necessity. This makes it possible to reduce fuel consumption, energy consumption and harmful emissions, thereby increasing the competitiveness of enterprises. purpose. The aim of the study is to increase the energy efficiency of a complex industrial heat and technological scheme of pulp and paper production using methods of structural and thermodynamic analysis. These analysis methods make it possible to objectively assess the potential of recycling secondary energy resources and select the most effective schemes of wind power recovery systems. **METHODS.** Exergetic analysis revealed significant unused heat losses in pulp and paper production, in particular, in drying plants with an efficiency of only 46.9%. It has been revealed that the flows of exhaust air, waste and recycled water, and the upper product of the columns have the greatest potential for recovery. Their utilization by means of heat pumping units can significantly increase the energy efficiency of production, reducing energy costs and thermal pollution of the environment. results. Thermodynamic analysis revealed significant unused losses in key production streams (waste air, wastewater and recycled water. the top product of the columns). A system for their recovery using heat pumping units (TNUS) has been developed, which makes it possible to increase the total energy utilization of the system from 17.88% to 92.58%. The introduction of TNW provides significant savings in thermal energy and reduces the environmental burden of production. conclusion. To solve this problem, a comprehensive heat recovery system based on thermal transformers – heat pump installations has been developed. Its implementation will make it possible to utilize 10.13 MW of thermal capacity from waste streams, increasing the overall energy efficiency of production.

Keywords: pulp and paper production; energy efficiency; secondary energy resources; low-potential heat; heat recovery; heat pumping units; exergetic analysis; thermal technology scheme; energy conservation; wastewater; drying units; thermodynamic analysis.

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2025-458 dated January 17, 2025.

For citation: Kalinina M.V., Plotnikova L.V. The system of complex recovery of low-potential secondary energy in the thermal technology scheme of pulp and paper production. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 182-194. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-182-194.

Введение (Introduction) и Литературный обзор (Literature review)

В современной промышленной теплоэнергетике особую значимость приобретает вопрос оптимизации потребления энергоресурсов. Одним из наиболее перспективных путей решения данной проблемы выступает внедрение технологий, направленных на повышение энергоэффективности производственных процессов посредством утилизации вторичных энергетических ресурсов. Это позволяет существенно сократить расход топлива и потребление тепловой и электрической энергии.

В связи с этим возникает острая необходимость в развитии и совершенствовании теоретических подходов к анализу эффективности энергетических процессов, а также в разработке методологических основ для проектирования современного оборудования, способного эффективно рекуперировать вторичные энергоресурсы.

Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) характеризуется высокой энергоемкостью и значительными объемами образующихся вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Особый интерес представляет утилизация низкопотенциальной теплоты, источником которой являются сточные воды, вентиляционные выбросы сушильных отделений, конденсаты и другие потоки с температурой 40-80°C. Эффективная рекуперация таких ВЭР требует системного подхода, объединяющего методы структурного и термодинамического анализа [1].

Организация систем утилизации низкопотенциальных ВЭР на основе системного подхода заключается не в простом добавлении теплоутилизационного оборудования, а в целостном анализе всей теплотехнологической схемы предприятия как единой

энергетической системы. Системный анализ позволяет выявить все источники низкопотенциальных ВЭР (сточные воды, дымовые газы, влажный воздух, конденсат и т.п.), оценить их температурный потенциал, количество и график поступления, а также определить потенциальных потребителей тепла (подогрев технологических растворов, отопление, подпиточная вода для котлов). Ключевой задачей является синтез такой системы рекуперации, которая обеспечит эффективное согласование во времени и по параметрам между нерегулярными, распределенными источниками низкопотенциального тепла и стабильными потребителями, часто требующими более высокого температурного уровня. Этот подход позволяет перейти от локальной утилизации к созданию интегрированной энерготехнологической системы с минимальными эксергетическими потерями [2].

Системный подход к утилизации низкопотенциальных ВЭР изначально получил широкое развитие в энергоемких отраслях, таких как нефтепереработка и нефтехимия. Это связано с рядом факторов:

- высокая энергоемкость процессов. Нефтехимические производства характеризуются большими объемами тепловых потоков на перегонку, крекинг и синтез, что создает значительные объемы вторичных энергоресурсов;

- наличие стандартных источников низкопотенциальных ВЭР. Типичными источниками являются продукты сгорания печей технологических нагревателей, охлаждающая вода с технологических аппаратов, конденсаты пара;

- отработанные технические решения. Для нефтехимии исторически разработаны и коммерциализированы такие решения, как установки утилизации тепла дымовых газов (экономайзеры), теплонасосные установки (ТНУ) для подогрева технологических потоков и системы рекуперации тепла от аппаратов воздушного охлаждения [3].

Исследования, проведенные для нефтехимического комплекса, показали, что интеграция трансформаторов теплоты в виде теплонасосных систем позволяет утилизировать тепло отходящих потоков с температурой 40-70°C для подогрева более холодных потоков до 90-120°C, что существенно снижает нагрузку на первичные энергоисточники. Этот опыт является ценным для разработки аналогичных решений в других отраслях, включая целлюлозно-бумажную промышленность.

Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) обладает уникальным набором особенностей, которые определяют специфику образующихся ВЭР. Оно обладает большим количеством низкопотенциальных потоков. Основными источниками низкопотенциальных ВЭР являются оборотные и сточные воды (30-50°C), теплый воздух от сушильных частей бумагоделательных машин, продукты колонн. Воздух из сушильных секций является разбавленным и имеет высокое влагосодержание, что требует применения методов конденсации влаги с одновременным извлечением тепла. Потоки низкопотенциальных ВЭР рассредоточены по всей территории производства, что усложняет задачу их централизованного сбора и утилизации. Некоторые потоки (например, конденсаты из варочных цехов) могут содержать летучие органические соединения, что требует применения коррозионностойких материалов в теплообменном оборудовании и усложняет процесс рекуперации.

Как отмечается в работе [4], именно низкопотенциальные ВЭР, составляющие значительную долю общих потерь, часто остаются неиспользованными на ЦБП из-за технической и экономической сложности их утилизации традиционными методами.

Для модернизации теплотехнологической схемы ЦБП с целью утилизации низкопотенциальных ВЭР наиболее перспективными являются трансформаторы теплоты, в частности ТНУ, которые позволяют повысить тепловую энергию с низкого температурного уровня на более высокий. В промышленности, включая ЦБП, находят применение следующие варианты ТНУ:

- пароконденсационные ТНУ. Это наиболее распространенный тип. В качестве рабочего тела могут использоваться различные хладагенты (аммиак) и др.). Их эффективность применения на ЦБП исследуется, например, для подогрева технологической воды теплом сточных вод [5]. Аммиак является предпочтительным хладагентом для крупных промышленных установок;

- абсорбционные ТНУ. Эти установки используют термохимический компрессор и приводятся от источника тепла средней температуры (сбросной пар, горячая вода, дымовые газы). Они особенно эффективны в условиях ЦБП, где имеются избытки пара или горячей воды. Могут быть использованы для охлаждения дымовых газов с одновременной генерацией полезного тепла [6];

- каскадные и гибридные системы. Для достижения максимальной эффективности предлагаются комбинированные системы, например, сочетание абсорбционных и

парокомпрессионных ТНУ, или интеграция ТНУ с тепловыми насосами, использующими в качестве рабочего тела влажный воздух (эжекторные или компрессионные термотрансформаторы) [7, 8].

Исследования, проведенные авторами, показывают, что внедрение таких систем на ЦБП позволяет не только значительно сократить расход топлива и выбросы парниковых газов, но и повысить надежность энергоснабжения предприятия за счет создания замкнутых тепловых контуров.

Таким образом, создание системы комплексной рекуперации низкопотенциальных ВЭР (НВЭР) в теплотехнологической схеме ЦБП является сложной, но экономически и экологически необходимой задачей. Ее успешное решение лежит на пути применения системного анализа, учета уникальных особенностей потоков ЦБП и широкого внедрения современных технологий, среди которых ключевую роль играют различные типы теплонасосных установок, адаптированные к условиям целлюлозно-бумажного производства.

Научная значимость исследования состоит в разработке системного подхода и методологии интеграции теплонасосных систем для рекуперации низкопотенциальной теплоты в целлюлозно-бумажном производстве, что позволяет создать энергоэффективные технологические схемы с минимальными потерями.

Практическая значимость исследования состоит в снижении затрат на топливо и энергию, уменьшении выбросов, повышении надежности энергоснабжения предприятий за счет внедрения теплонасосных установок и утилизации ранее неиспользуемых НВЭР.

Методика (Methodology)

Структурный анализ как этап системного анализа позволяет выявить взаимозависимости между элементами, определить замкнутые и разомкнутые последовательности, а также оптимизировать расчёт сложной многоконтурной системы с целью снижения ошибки при определении параметров ВЭР из-за неоднозначности и недостаточности исходных данных о параметрах энергетических и технологических потоков схемы. Это важный этап для понимания того, как энергетические потоки взаимодействуют в системе и где возникают основные потери.

Термодинамический анализ, основанный на применении эксергетического метода, позволяет оценить степень термодинамического несовершенства исследуемой системы, выявить потери от необратимости для всей системы и элементов, произвести оценку эффективности элементов в составе системы, определить величину технически работоспособной энергии.

Эксергия – это термодинамическая величина, которая характеризует полезную работу, которую можно получить от системы при её приведении в равновесие с окружающей средой. В отличие от энергии, эксергия учитывает не только количество, но и качество энергии.

Запишем формулу для определения термомеханической эксергии однородного вещества:

$$\Delta e = i_1 - i_0 - T_0(s_1 - s_0)$$

где:

- i_1, s_1 – энтальпия и энтропия в рабочем состоянии,
- i_0, s_0 – энтальпия и энтропия в состоянии окружающей среды,
- T_0 – температура окружающей среды.

Для теплового потока эксергия рассчитывается как:

$$e_q = Q \cdot (1 - (T_0/T)),$$

где T – средняя температура теплового потока.

Несмотря на высокие энергозатраты целлюлозно-бумажной промышленности, потенциал низкопотенциальных вторичных энергоресурсов (ВЭР) используется не в полной мере [9]. Анализ термодинамической эффективности всей технологической схемы производства бумаги показал, какие сбросные потоки обладают наибольшим потенциалом для утилизации. Использование этих потоков в ТНУ [10-12] позволяет организовать систему рекуперации ВЭР, что ведет к их повторному применению и снижению нагрузки на окружающую среду.

В результате эксергетического анализа были выявлены потоки с наибольшей эксергетической мощностью, которые в настоящее время используются неэффективно или теряются.

Основная задача анализа структуры внутренних и внешних связей состоит в установлении взаимозависимостей между элементами внутри теплотехнологической схемы и определении оптимальной последовательности ее расчета.

Проведение же анализа структуры связей (структурного анализа) позволяет выявить зависимости между элементами схемы, выделить замкнутые и разомкнутые последовательности элементов, определить оптимальную последовательность ее расчета с минимизацией итераций [13-15].

Фрагмент структурной схемы представлен на рисунке 1, включающей 166 единиц теплообменного, разделительного и вспомогательного оборудования.

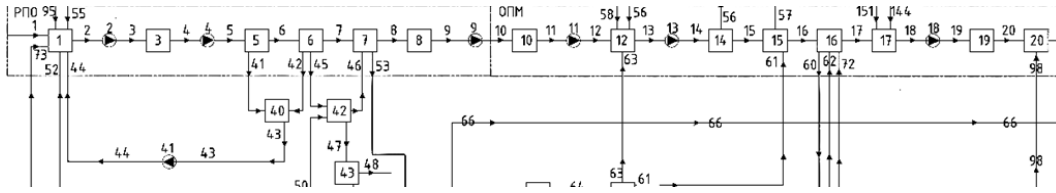


Рис. 1. Структурная схема (фрагмент) для размольно-подготовительного участка теплотехнологической схемы ЦБП: число в квадрате – номер элемента в структурной схеме; 1 – гидроразбавитель; 2, 4, 9, 41 – насосы; 3, 8, 40 – бассейны; 5 – вихревой очиститель; 6, 42 – сепаратор; 7 – сгуститель; 43 – вибросортировка; РПО – размольно-подготовительный отдел

Fig. 1. Block diagram (fragment) for the grinding and preparatory section of the scheme of the CBP: the number squared in the block diagram; 1 – hydraulic diluent; 2, 4, 9, 41 – pumps; 3, 8, 40 – pools; 5 – vortex cleaner; 6, 42 – separator; 7 – thickener; 43 – vibration sorting; RPO – grinding and preparatory department

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

Утилизация потоков с высокой эксергетической мощностью позволяет повысить энергоэффективность теплотехнологической схемы производства бумаги, снизить затраты на энергоносители и уменьшить тепловые потери. Наибольшие потери эксергии выявлены в сушильных установках КДМ (элементы 34-37), где эксергетический КПД составляет всего 46,9%. Эти аппараты являются основными потребителями тепловой энергии и имеют значительный потенциал для повышения эффективности энергопотребления за счет утилизации вторичных энергоресурсов.

Поток 117 (отработанный теплый воздух) предлагается направить в ТНУ для подогрева сухого воздуха, подаваемого в сушильные камеры. Это позволит сократить расход пара на технологический процесс сушки.

Поток 85 (оборотная вода) с более низким температурным потенциалом может быть направлен на подогрев свежей воды для технологических нужд, в системы вентиляции, отопления вспомогательных помещений.

Поток 197 (сточная вода) при вторичном использовании направляется из прудов-отстойников в технологический цикл для использования в различных процессах размольно-подготовительного отдела (для роспуска макулатуры и разбавления массы), в цеху первичного полуфабриката, на промывку щепы в варочно-промывном отделе; вторичная же ее энергия предлагается к использованию в системе охлаждения оборудования и на нужды горячего водоснабжения.

Поток 253 (верхний продукт колонн). В процессах разделения при производстве спирта вариантом включения теплового насоса является использование энергии верхнего продукта колонн для подогрева нижней части – куба колонн. Производство спирта сопровождается выходом большого количества теплой воды после конденсации водно-спиртовых паров в дефлегматорах. Эту воду можно использовать для подогрева самой колонны, то есть предлагается прямая рекуперация тепла от верхнего продукта колонн для подогрева нижней части через ТНУ.

Результаты расчетов (Calculation results)

Анализ производственной схемы показал наличие сотен контуров и минимально необходимое число разрываемых потоков – 20 (включая ключевой №24). Термодинамический анализ выявил значительные потери тепла и эксергии в отработанном воздухе бумагоделательных машин (рис. 2) и теплой воде после охлаждения щелоков.

В таблице 1 представлены расчеты потенциала для следующих потоков: воздух 117 от сушильных установок 34-37, оборотная вода 85 в бассейне подсеточной воды 54, верхний продукт колонны 253 и сточные воды 197. Также был определен расход энергоносителя, который может быть получен за счет ВЭР, поскольку при создании системы рекуперации критически важно точно оценить объем замещаемого энергоресурса.

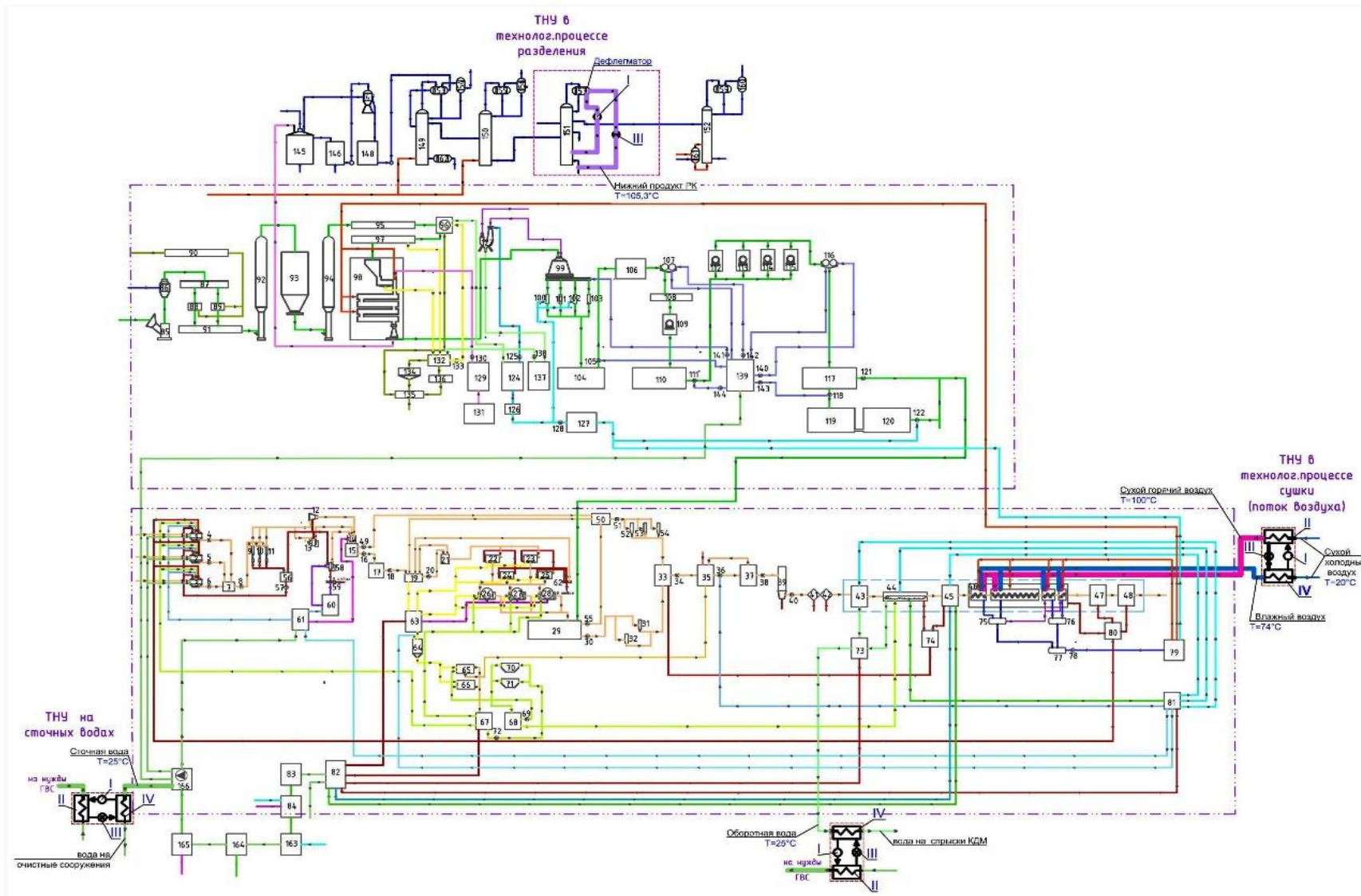


Рис. 2. Технологическая схема производства бумаги с включением ТНУ

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

Fig. 2. Technological scheme of paper production including TNU

Результаты расчета термодинамического потенциала потоков вторичных энергетических ресурсов

The results of calculating the thermodynamic potential of secondary energy resources flows

№ потока	85	117	197	253	Итого
Тепловая мощность, отведенная $Q_{отв}$, кВт	20783,68	8089,98	663,47	1357,14	30894,27
Эксергетическая мощность, отведенная $E_{отв}$, кВт	1749,12	1620,33	45,64	237,95	3653,04
Принимаемая в утилизационном аппарате тепловая мощность, $Q_{пол}$, кВт	3454,31	5057,16	264,77	1357,14	10133,38
Принимаемая в утилизационном аппарате эксергетическая мощность, $E_{пол}$, кВт	557,00	1459,89	31,11	237,95	2285,95
Вид используемого потока	оборотная вода	теплый воздух	сточные воды	продукт колонн	

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

На рисунке 2 изображена технологическая схема производства бумаги с указанием мест установки теплонасосных установок. Расчеты тепловых и эксергетических показателей для всех аппаратов показали, что максимальный достижимый тепловой КПД составляет 92,58%, а эксергетический – 83,51%. Фактические значения коэффициента системного использования (КСИ) вторичных энергоресурсов (ВЭР) достигли 20,7% и 17,88% соответственно. Анализ выявил, что значительный потенциал для повышения энергоэффективности заложен в потоках, сбрасываемых в окружающую среду: это воздух из сушильных установок (№34-37), теплота охлаждения верхнего продукта колонн, а также сточные и оборотные воды. Их утилизация с помощью теплонасосных установок (ТНУ) для рекуперации низкопотенциальных ВЭР позволит полезно использовать данные тепловые потери.

Интеграция теплонасосной установки (рис. 3) в контур оборотной воды позволяет стабилизировать технологические параметры производства, нарастить объемы выпуска продукции и снизить экологическую нагрузку от картоноделательной машины (КДМ) на рассматриваемом целлюлозно-бумажном производстве.

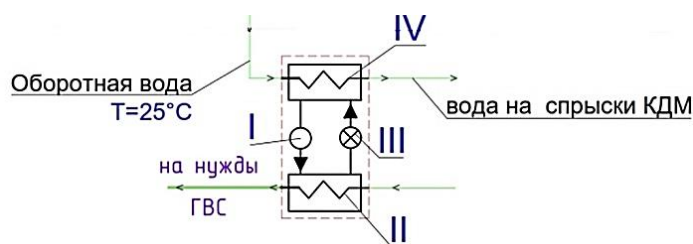


Рис. 3. Включение ТНУ в схему циркуляции оборотной воды: I – компрессор, II – конденсатор, III – дроссельный клапан, IV – испаритель
Fig. 3. Inclusion of TNCs in the circulating water circuit: I – compressor, II – condenser, III – throttle valve, IV – evaporator

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

В процессе сушки воздуха важно, чтобы он был подогрет. С использованием потенциала отработанного воздуха возможно снизить затраты теплоты на процесс подогрева воздуха. В свою очередь потенциал отработанного воздуха, предложено повысить в тепловом насосе (рис. 4). Холодный воздух поступает в конденсатор теплового насоса, где он нагревается за счет теплоты отработанного воздуха и направляется в сушильную камеру.

В качестве низкопотенциального источника тепла для ТНУ используется отработанный влажный воздух, выходящий из сушильной камеры. Он имеет повышенную

температуру, но обычно это тепло не утилизируется. На рисунке 4 же предложена утилизация тепловых отходов (отработанного воздуха), что повышает общий КПД системы.

Таким образом, ТНУ позволяет вернуть часть теплоты, теряемую с отработанным воздухом и повторно использовать его в основном технологическом процессе, повышая энергоэффективность сушки.

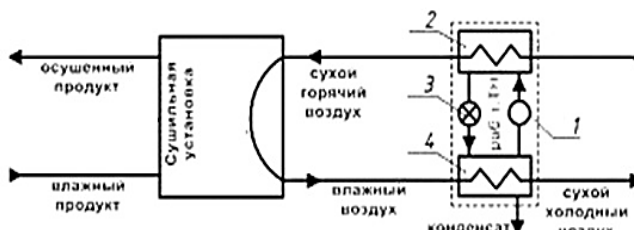


Рис. 4. Включение ТНУ в технологические процессы сушки: схема включения термотрансформатора; 1 – компрессор, 2 – конденсатор; 3 – дроссельный клапан; 4 – испаритель; раб.т. ТН – рабочее тело теплового насоса

Fig. 4. Inclusion of TNCs in the technological processes of drying: circuit diagram of the thermal transformer; 1 – compressor, 2 – condenser; 3 – throttle valve; 4 – evaporator; working fluid of the heat pump

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

Включение ТНУ в технологический процесс с использованием сточных вод цеха первичного полуфабриката позволяет создать классическую схему отбора теплоты низкопотенциального источника энергии и направления в систему отопления и ГВС (рис. 5). В качестве низкопотенциального источника тепла выступают сточные воды цеха первичного полуфабриката. Эти воды, являясь побочным продуктом производства, имеют повышенную температуру, и их тепло обычно безвозвратно теряется. В предлагаемой схеме сточные воды проходят через испаритель (1.4) ТНУ, где охлаждаются, отдавая свое тепло циркулирующему хладагенту. Компрессор (1.1) сжимает хладагент, значительно повышая его температуру. В конденсаторе (1.2) горячий хладагент отдает эту теплоту потоку воды, которая циркулирует в системе отопления и/или горячего водоснабжения (ГВС). Производится нагрев воды для системы отопления и ГВС предприятия.

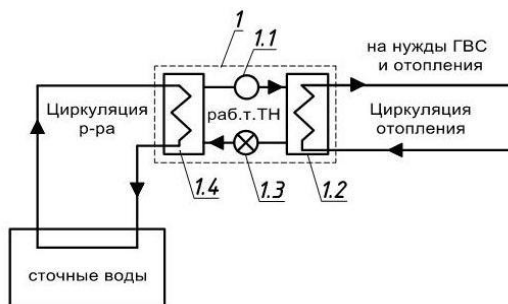


Рис. 5. Включение ТНУ в процесс очистки сточных вод: 1.1 – компрессор, 1.2 – конденсатор, 1.3 – дроссельный клапан, 1.4 – испаритель

Fig. 5. Inclusion of TNCs in the wastewater treatment process: 1.1 – compressor, 1.2 – condenser, 1.3 – throttle valve, 1.4 – evaporator

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

Таким образом, утилизируется бросовое тепло от сточных вод, которое в противном случае просто сбрасывалось бы в окружающую среду. Снижается потребление основного топлива (газа, мазута и т.д.) для целей отопления и ГВС.

Данное решение позволяет превратить теплые сточные воды в энергетический ресурс, сокращая затраты на теплоносители и уменьшая тепловое загрязнение окружающей среды.

Также для экономии энергии в спиртовом производстве предложено использовать теплоту паров, выходящих с верха ректификационной колонны, для подогрева её нижней части. Согласно схеме на рисунке 6, предложение реализуется с помощью теплового насоса (выбрана энергоэффективная схема ТНУ открытого типа).

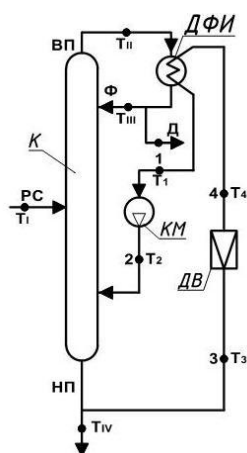


Рис. 6. Ректификационная колонна с ТНУ: К – ректификационная колонна; ДФИ – дефлегматор; 3 – дроссельный вентиль; 4 – компрессор
 Fig. 6. Rectification column with TNU: K – distillation column; DFI – deflector; 3 – throttle valve; 4 – compressor
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве источника теплоты для ТНУ используются водно-спиртовые пары (верхний продукт), выходящие из ректификационной колонны. Эти пары обладают значительной скрытой теплотой конденсации, которая обычно отводится в дефлегматоре и теряется с охлаждающей водой либо уходит с воздухом в окружающую среду в случае использования в качестве охладителей воздушных холодильников. В предлагаемой схеме энергия паров верхнего продукта колонн направляется в испаритель ТНУ (роль которого играет дефлегматор ДФИ), где они конденсируются, отдавая свое тепло хладагенту (роль которого играет нижний продукт колонн). Хладагент испаряется и далее сжимается в компрессоре, что повышает его температуру. Сжатый горячий хладагент поступает в конденсатор, который встроен в нижнюю часть (куб) колонны. В конденсаторе хладагент отдает тепло кубовой жидкости (нижнему потоку), которая является основным потребителем тепла в процессе ректификации.

Тепло, необходимое для кипячения кубовой жидкости, частично или полностью обеспечивается за счет утилизации тепла паров верхнего продукта. Снижается нагрузка на основную греющую систему колонны (котел, паровой подогрев). Повышается энергетическая автономность процесса разделения, что ведет к значительной экономии энергоресурсов. Это решение замыкает энергетический контур внутри технологической установки, используя отводимую теплоту для покрытия собственных потребностей процесса, что является ярким примером глубокой энергоэффективности.

Таким образом, разработана система рекуперации низкопотенциальных ВЭР целлюлозно-бумажного производства с применением ТНУ на сточной и оборотной воде, теплоте отходящего воздуха и конденсации водно-спиртовых паров (табл. 2).

Таблица 2
 Table 2

Сравнительная характеристика вариантов включения ТНУ в производство
 Comparative characteristics of options for including TNCs in production

Варианты	1	2	3	4
Источник сбросной энергии	Сточные воды	Оборотная вода	Теплая вода при конденсации водно-спиртовых паров	Теплота уходящего воздуха бумагоделательной машины
Температура источника вторичной энергии, °С	25-35	34-38	64-73	40-74
Потребитель вторичной энергии	Технологические процессы	Горячее водоснабжение	Технологические процессы	Технологические процессы
Температура нагреваемого потока, °С	45	55	110	110

Продолжение таблицы 2

Схема ТНУ	Парокомпрессионный закрытого типа	Парокомпрессионный закрытого типа	Парокомпрессионный открытого типа	Парокомпрессионный закрытого типа
Коэффициент трансформации μ	3,02	3,06	5,12	2,85
Эксергетический КПД η_e	0,1	0,15	0,52	0,303
Кол-во сэкономленной тепловой энергии, кВт	361,1	536,4	783,14	3126,0
Экономия тепловой энергии, тунт/год	382,3	576,23	843,06	3369,65
Тепловой КСИ системы после утилизации одного из потоков ВЭР (относительно 17,88%)	28,5 %	42,3 %	20,7 %	45,9 %
Тепловой КСИ системы после утилизации всех потоков ВЭР	92,58 %			

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

Варианты модернизации повышают тепловой КСИ системы с 17,88% до 61,8%, 20,7% и 45,9% соответственно. Внедрение всех перечисленных теплонасосных установок позволяет поднять тепловой КСИ до уровня теплового КПД.

Заключение (Conclusion)

ЦБП было рассмотрено как объект структурно-термодинамического анализа, была проведена оценка термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги на основе выявленной оптимальной последовательности расчета. Для анализа термодинамической эффективности основными источниками информации стали теплотехнологическая схема производства бумаги и параметры материальных и энергетических потоков – температура, давление, расход, состав, тепловая и эксергетические мощности.

Были составлены тепловые и эксергетические балансы каждого элемента, групп элементов/блоков и всей теплотехнологической схемы в целом. Рассчитаны тепловые и эксергетические КПД. Наибольшие потери эксергии наблюдаются в сушильных установках КДМ (элементы 34-37), где эксергетический КПД составляет всего 46,9%. Так максимально достижимый тепловой КПД составил 92,58%, эксергетический – 83,51%. Определен тепловой и эксергетический коэффициенты системного использования (КСИ), отражающие реальное использование ВЭР – 20,7% 17,88%.

Выявлено, что среди отведенных потоков часть представляет собой потоки, сбрасываемые в окружающую среду, т.е. тепловые потери, которые можно полезно использовать и потери, которые невозможно использовать в системе.

Разработана система комплексной рекуперации низкопотенциальной вторичной энергии в теплотехнологической схеме ЦБП.

Система комплексной рекуперации низкопотенциальных ВЭР целлюлозно-бумажного производства с ТНУ на сточной и оборотной воде, теплоте уходящего воздуха бумагоделательной машины, теплоте при конденсации водно-спиртовых паров позволила выявить потоки для включения в систему утилизации сбросной энергии для целлюлозно-бумажного производства с общей возможной к принятию тепловой мощностью 10,13 МВт в виде теплоты охлаждения полупродуктов, теплоты отработанного воздуха, теплоты сточных вод и 2,29 МВт эксергии соответствующих потоков.

Литература

1. Шелгинский Е. А. Полезное использование ВЭР в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. – С. 578-580. – EDN GLSDRL.
2. Плотникова Л.В., Торкунова Ю.В. Программное обеспечение системного анализа сложноструктурированных промышленных комплексов при разработке энергосберегающих мероприятий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). – С. 140-154.
3. Рекуперация и аккумулирование вторичных энергетических ресурсов на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса / Ю. В. Ваньков, Л. В. Плотникова, Ш. Г. Зиганшин, А. Р. Загретдинов. – Санкт-Петербург: Издательство «Наукоемкие технологии», 2024. – 142 с. – ISBN 978-5-907804-203. – EDN QDKPAB.
4. Шелгинский Е. А. Анализ эффективности использования тепловых ВЭР на основе органического цикла Ренкина в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский, А. Я. Шелгинский // Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 90-95. – DOI 10.24223/1999-5555-2022-15-2-90-95. – EDN DAYIVO.
5. Шелгинский Е. А. Анализ и расчет схемы утилизации теплоты ВЭР в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студентов и аспирантов, Москва, 13–15 марта 2025 года. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2025. – С. 765. – EDN MJGVFA.
6. Шелгинский Е. А. Полезное использование ВЭР в производстве азотной кислоты / Е. А. Шелгинский, Ю. В. Яворовский // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. – С. 578-580. – EDN GLSDRL.
7. Бу Дакка Б. Рекуперация тепла с использованием органического цикла Ренкина / Б. Бу Дакка, И. А. Султангузин, Ю. В. Яворовский // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2021. – № 5. – С. 51-57. – DOI 10.24160/1993-6982-2021-5-51-57. – EDN EBEZUW.
8. Повышение энергетической и экологической эффективности теплоэлектроцентрали на основе применения абсорбционных трансформаторов теплоты / Ю. В. Яворовский, И. А. Султангузин, А. И. Бартенев [и др.] // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2020. – № 4. – С. 89-97. – DOI 10.24160/1993-6982-2020-4-89-97. – EDN BBYBWC.
9. Скобелев Д.О. Формирование инфраструктуры ресурсно-технологической трансформации промышленности. Экономика устойчивого развития. - 2020. № 1. - с. 162-167.
10. Плотникова Л.В., Калинина М.В. Структурно-термодинамический анализ теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025;27(3):218-232. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232>.
11. V. P. Meshalkin, T. N. Gartman, T. A. Kokhov, L. B. Korelstein. Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. Doklady Chemistry. – 2018. – Vol. 482, No. 2. – P. 246-250. – DOI 10.1134/S0012500818100087.
12. Чахирев, Л. В. Использование программного обеспечения системного анализа для управления энергоэффективностью и структурой энергетических систем / Л. В. Чахирев, В. В. Плотников, Л. В. Плотникова // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 92-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко, Казань, 21–26 сентября 2020 года / Ответственный редактор Н.И. Воропай. Том Выпуск 71. Книга 3. – Казань: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2020. – С. 90-99. – EDN DZTVVF.
13. Луканин П.В., Казаков В.Г., Зверев Л.О. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022;24(4):178-191. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.
14. Назмеев, Ю. Г. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности / Ю. Г. Назмеев, И. А. Конахина. – М.: Московский энергетический институт, 2001. – 364 с. – ISBN 5-7046-0698-9. – EDN XGNUVV.
15. Красавина Е.О., Плотникова Л.В. Энергосберегающий тепловой насос в системах промышленного разделения веществ // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2016, № 4 (32), С. 95-105.

Авторы публикации

Калинина Марина Владимировна – ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8005-312X>. esp_mvkalinina@mail.ru

Плотникова Людмила Валерьяновна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7215-8152> mikhailovalv@mail.ru

References

1. Shelginsky, E. A. Useful use of VER in the production of nitric acid. E. A. Shelginsky, Yu. V. Yavorovsky. Intensification of heat and mass transfer processes, industrial safety and ecology : Proceedings of the VI All-Russian Student Scientific and Technical Conference, Kazan, May 24-26, 2022. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2022. pp. 578-580. EDN GLSDRL.
2. Plotnikova L.V., Torkunova Yu.V. Software for system analysis of complex-structured industrial complexes in the development of energy-saving measures. Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2022. Vol. 14. No. 1 (53). – pp. 140-154.
3. Recovery and accumulation of secondary energy resources at the enterprises of the oil refining complex. Yu. V. Vankov, L. V. Plotnikova, Sh. G. Ziganshin, A. R. Zagretdinov. – Saint Petersburg: Science-intensive Technologies Publishing House, 2024. – 142 p. - ISBN 978-5-907804-203. – EDN QDKPAB. Lykov A.V. Heat and mass transfer. Moscow: Energiya, 1971. 324 p.
4. Shelginsky E. A., Yavorovsky Yu.V., Shelginsky A. Ya. Analysis of the efficiency of using thermal power plants based on the organic Rankine cycle in the production of nitric acid. Reliability and safety of energy. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – pp. 90-95. – DOI 10.24223/1999-5555-2022-15-2-90-95. – EDN DAYIVO.
5. Shelginsky, E. A. Analysis and calculation of the heat recovery scheme of VER in the production of nitric acid. E. A. Shelginsky, Yu. V. Yavorovsky. Radioelectronics, electrical engineering and power engineering : Abstracts of the Thirty-first International Scientific and Technical Students and postgraduates, Moscow, March 13-15, 2025. – Moscow: Raduga Center for Printing Services, LLC, 2025. – p. 765. – EDN MJGVFA.
6. Shelginsky, E. A. Useful use of VER in the production of nitric acid. E. A. Shelginsky, Yu.V. Yavorovsky. Intensification of heat and mass transfer processes, industrial safety and ecology : Proceedings of the VI All-Russian Student Scientific and Technical Conference, Kazan, May 24-26, 2022. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2022. pp. 578-580. EDN GLSDRL.
7. Bu Dhaka, B. Heat recovery using the Rankine organic cycle. B. Bu Dhaka, I. A. Sultanguzin, Yu. V. Yavorovsky. Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the Moscow Institute of Energy. – 2021. – No. 5. – pp. 51-57. – DOI 10.24160/1993-6982-2021-5-51-57. – EDN EBEZWU.
8. Improving the energy and environmental efficiency of a thermal power plant based on the use of absorption heat transformers. Yu. V. Yavorovsky, I. A. Sultanguzin, A. I. Bartenev [et al.]. Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the Moscow Institute of Energy, 2020, No. 4, pp. 89-97. DOI 10.24160/1993-6982-2020-4-89-97. EDN BBYBWC.
9. Skobelev D.O. Formation of the infrastructure of resource and technological transformation of industry. Economics of sustainable development. - 2020. No. 1. -pp. 162-167.
10. Plotnikova L.V., Kalinina M.V. Structural and thermodynamic analysis of the thermal technology scheme of pulp and paper production. News of higher educational institutions. Energy problems. 2025;27(3):218-232. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232>
11. V. P. Meshalkin, T. N. Gartman, T. A. Kokhov, L. B. Korelstein. Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. Doklady Chemistry. – 2018. – Vol. 482, No. 2. – P. 246-250. – DOI 10.1134/S0012500818100087.
12. Chakhirev, L. V. The use of system analysis software for energy efficiency management and the structure of energy systems. L. V. Chakhirev, V. V. Plotnikov, L. V. Plotnikova. Methodological issues of reliability research of large energy systems : Proceedings of the 92nd meeting of the International Scientific Seminar named after Yu.N. Rudenko, Kazan, September 21-26, 2020. The responsible editor is N.I. Voropai. Volume Issue 71. Book 3. Kazan: Federal State Budgetary Institution of Science, L.A. Institute of Energy Systems. Melentyev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020, pp. 90-99. – EDN DZTVVF.
13. Lukanin P.V., Kazakov V.G., Zverev L.O. The concept of modernization of energy technology complexes in the Central industrial complex. News of higher educational institutions. Energy problems. 2022;24(4):178-191. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.

14. Nazmееv, Yu.G. Organization of energy technology complexes in the petrochemical industry / Yu.G. Nazmееv, I. A. Konakhina. – М.: Moscow Power Engineering Institute, 2001. – 364 p. – ISBN 5-7046-0698-9. – EDN XGNUVV.

15. Krasavina E.O., Plotnikova L.V. Energy-saving heat pump in industrial separation systems. Bulletin of Kazan State Power Engineering University, 2016, No. 4 (32), pp. 95-105.

Authors of publication

Marina V. Kalinila – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0009-0006-8005-312X>. esp_mvkalinina@mail.ru

Lyudmila V. Plotnikova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-7215-8152>. mikhailovalv@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **21.08.2025 г.**

Отредактировано **13.09.2025 г.**

Принято **10.10.2025 г.**

Сдано в набор 15.10.2025 г.

Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая

Тираж 500 экз.

Подписано к печати 00.00.2025 г.

Усл. печ. л. 18,3

Заказ № 5324

Дата выхода в свет г.00.00.2025 г.

Формат 60*90/8

Уч.изд. л. 11,62.

Цена свободная